Changement Climatique et Territoires Actes XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie Rennes 2020

Valerie Bonnardot, Hervé Quénol

▶ **To cite this version:**

Valerie Bonnardot, Hervé Quénol. Changement Climatique et Territoires Actes XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie Rennes 2020. 2020. hal-02934526

HAL Id: hal-02934526
https://hal.science/hal-02934526

Submitted on 22 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Association Internationale de Climatologie

XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES

Actes colloque AIC Rennes 2020

Editeurs scientifiques
Valérie BONNARDOT & Hervé QUENOL
Université Rennes 2, LETG-Rennes UMR 6554 CNRS

Colloque organisé par le laboratoire **LETG-RENNES**, UMR 6554 LETG CNRS / Université Rennes 2

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES

@illustration couverture : G. Morin, LETG

SOMMAIRE

INTRODUCTION DES ORGANISATEURS 5

HOMMAGE A JEAN-PIERRE MARCHAND 9

RESUMES ETENDUS 17

INDEX DES AUTEURS 715

INDEX DES MOTS CLES 722

KEYWORDS INDEX 729

TABLE DES MATIERES 736

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES

Actes du colloque organisé à Rennes
du mercredi 1er au samedi 4 juillet 2020
(annulé pour raison sanitaire Covid-19)

COMPOSITION DU COMITE D'ORGANISATION

Vincent DUBREUIL
Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Jean NABUCET
CNRS UMR 6554 LETG

Sébastien BRUNEAU
Responsable administratif, Université Rennes 2

Roselyne BILLY
Gestion administrative, Université Rennes 2, UMR 6554 LETG

Claudie PERON
Gestion administrative, CNRS, UMR 6554 LETG

Clémentine CHARMONT
Gestion éditoriale, Université Rennes 2

Franck BARAER
Météo-France, Direction Interrégionale Ouest

Emmanuel Bouriau
AUDIAR

Xavier FOISSARD
TerraClima

Alain Hervé LE GALL
multiCOM, OSUR, Université Rennes 1 / CNRS

Igor SNIRIK
Post-doctorant associé LETG-Rennes

Fanny GAUTIER
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Gwenaël MORIN
Doctorante, UMR 6554 LETG-Rennes

Pedro MUTTI
Doctorant, UMR 6554 LETG-Rennes

Jeanne THIBAULT
Doctorante, UMR 6554 LETG-Brest

EDITEURS SCIENTIFIQUES

Valérie BONNARDOT & Hervé QUENOL
Université Rennes 2, LETG-Rennes UMR 6554 CNRS

En partenariat avec :

Réalisation et mise en page des Actes :
Clémentine CHARMONT

Les opinions défendues dans cet ouvrage n'engagent que les auteurs ; elles ne sauraient être imputées aux institutions auxquelles ils appartiennent ou qui ont financé leurs travaux.

© LETG, 2020
ISBN 978-2-907696-26-5

INTRODUCTION AU XXXIII° COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRE RENNES 2020

Valérie BONNARDOT et Hervé QUENOL

LETG-Rennes UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2

AIC Rennes 2020 : le 33ème colloque de l'AIC …… et/ou le premier annulé ! Quelle manière inédite de commencer l'introduction ! Après l'organisation de l'édition 2010, le laboratoire LETG-Rennes organisait à nouveau le colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (AIC2020) mais cette édition restera comme étant le premier colloque de l'AIC annulé depuis la création de l'association en 1988 ! En effet, nous aurions dû accueillir à Rennes du 1er au 4 juillet les participants du 33ième colloque annuel de l'AIC mais la crise sanitaire mondiale liée à la pandémie COVID-19 en a inévitablement décidé autrement. Vue l'évolution de celle-ci au mois de mars, ainsi que les nombreuses incertitudes liées aux mesures de (dé-) confinement variables selon les pays et aux restrictions des échanges aériens, nous avons eu le regret d'annoncer dès le début du mois d'avril, l'annulation de ce colloque issue d'une lourde mais sage décision conjointe du comité d'organisation, du Directeur de LETG-Rennes, du Directeur de l'UFR Sciences Sociales de l'Université Rennes 2 ainsi que du Président et du Conseil d'administration de l'AIC. Toutefois, les futurs participants ayant soumis leur texte et les membres du comité scientifique ayant déjà fourni un important travail d'évaluation à cette date, nous avons décidé de maintenir la publication des actes.

Le laboratoire LETG-Rennes organisateur de cette 33ième édition est une composante de l'UMR 6554 LETG « Littoral Environnement Télédétection Géomatique » de l'INstitut Ecologie et Environnement du CNRS. Ses travaux de recherche, entre autres ceux sur l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique et aussi ceux sur l'adaptation de la métropole rennaise au changement climatique, ont dicté le choix du thème principal du colloque : « changement climatique et territoires », et deux sessions spéciales : « changement climatique et ville » et « changement climatique et viticulture ». Ce thème permet aussi d'illustrer l'approche originale de la question du changement climatique par les géographes qui tient du fait, à la fois de leur positionnement à l'interface nature/société, au caractère intégré de leurs recherches, à leur intérêt particulier pour les imbrications d'échelles (spatiales et temporelles) adaptées aux différents enjeux sociétaux et finalement à leur intégration au sein d'un réseau d'échanges rassemblant acteurs économiques, organismes professionnels, élus et chercheurs relevant d'autres disciplines avec qui ils collaborent sur des enjeux territoriaux précis.

L'objectif de ce colloque était ainsi de faire le point sur les connaissances des conséquences du changement climatique à l'échelle des divers territoires dans le monde en réunissant la communauté scientifique internationale travaillant sur les impacts du changement climatique aux diverses échelles du territoire urbain et rural. Plus largement, ce colloque se voulait être aussi un lieu de rencontre et de diffusion des connaissances actuelles dans tous les domaines touchant au climat.

En ouverture du colloque et des deux sessions spéciales, nous aurions eu l'honneur de recevoir trois conférenciers qui avaient chaleureusement accepté notre invitation. Nous les remercions grandement !! :

- Hervé Le Treut (Professeur à Sorbonne Université et à l'Ecole Polytechnique, Membre de l'Académie des Sciences) qui devait intervenir en conférence d'ouverture sur « *le rôle des territoires face au changement climatique* »,
- Valéry Masson (Directeur de recherche au CNRM à Toulouse) qui devait intervenir pour la session « changement climatique et ville » sur « *Ville et changement climatique : une nécessaire approche pluridisciplinaire* »,
- et Nathalie Ollat (Ingénieure de Recherche INRAe, directrice de l'UMR EGFV 1287 à Bordeaux) qui devait intervenir pour la session « changement climatique et viticulture » sur « *l'adaptation au changement climatique de la filière vigne et vin en France* ».

Nous aurions eu également le plaisir de vous emmener visiter deux de nos sites d'étude : le site labellisé CNRS de « l'Observatoire de recherche en écologie et environnement urbain des Prairies Saint-Martin » et une parcelle de vigne à Saint-Jouan-des-Guérets dans le Val de Rance illustrant l'adaptation des territoires au changement climatique (et ainsi les 2 sessions spéciales), respectivement un îlot de fraicheur à Rennes et le développement de la vigne commerciale en Bretagne. Profitant de la visite sur la parcelle de vigne, l'Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons (ARVB), que nous remercions, avait prévu une dégustation de vins bretons en préambule au repas de gala à « l'Auberge de la Porte » à Saint-Jouan-des-Guérets.

L'excursion post-conférence quant à elle était prévue dans le Morbihan (pour changer de la traditionnelle visite du Mont Saint Michel et de Saint Malo) avec une visite sur le site du barrage démantelé de Pont-Sal en cours de re-végétalisation (proposée par nos collègues Simon Dufour et Anne-Julia Rollet que nous remercions chaleureusement) et une inévitable balade en bateau sur le Golfe du Morbihan en dégustant un plateau de fruits de mer.

Une des particularités de cette édition rennaise de l'AIC était l'organisation d'un "*Climathon*" » en prélude au colloque sous la houlette dynamique des doctorants et post doctorants de l'UMR LETG. Il s'agissait d'un challenge à destination des étudiants (master 2, doctorants) et jeunes chercheurs. A partir d'un jeu de données commun abordant la thématique "changement climatique et territoires", des équipes pluridisciplinaires devaient répondre à cette problématique en un temps imparti. L'équipe gagnante aurait bénéficié des droits d'accès aux conférences et se serait vue attribuer une récompense lors du colloque. Nous remercions au passage au sein du comité d'organisation, Gwenaël Morin pour cette initiative ainsi que pour son temps consacré à la structuration et aux illustrations du site internet du colloque.

C'était aussi pour nous l'occasion, le jour de ses 78 ans, de rendre hommage à Jean-Pierre Marchand, Professeur de Géographie à l'Université Rennes 2 à la retraite et ancien directeur de LETG-Rennes (anciennement COSTEL !) dont les recherches, proposant une géographie générale des territoires en intégrant les contraintes naturelles essentiellement climatiques, s'intègrent à la thématique principale de ce colloque « changement climatique et territoires », le territoire étant le centre des

préoccupations pour les géographes, ou, comme il aime à le dire, « le climat n'a de sens que si les hommes et les territoires sont intégrés ». A travers ses différentes participations aux colloques de l'AIC (huit au total), Jean-Pierre a présenté soit des réflexions générales sur la notion de risque climatique et de phénomènes extrêmes (Caen 2004) ou sur le climat et la géographie régionale (Montpellier 2008), soit des recherches originales consacrées à la climatologie historique du Bas Maine et du nord de l'Anjou montrant i) comment des données uniquement textuelles pouvaient aider à cerner la variabilité climatique, les risques de crues, l'adaptabilité dans le très long terme des vignobles et estimer leurs fiabilités dans des régions dénuées de données mesurées ; et ii) comment le climat se comporte à la fois acteur et récepteur des variations multi scalaires des territoires et de leurs usages et ce à toutes les échelles de temps et d'espace (Rennes 2010, Rovereto 2011, Grenoble 2012, Dijon 2014, Besançon/Lausanne 2016 et Rennes 2020). Les références de ses contributions sont listées en page 13.

Nous voulons très chaleureusement remercier nos collègues du LETG-Rennes, Vincent Dubreuil et Hervé Regnauld, pour leur contribution à cet hommage : Vincent, qui n'a pas manqué d'ingéniosité dans la rédaction du texte (il était à bonne école !) retraçant son impressionnante carrière (voir texte en pages 9-13), et Hervé pour la synthèse de sa carrière d'enseignant qu'il a su exprimer talentueusement sous forme de dessins caricaturaux (en pages 14-15). Un décodeur est peut-être utile/nécessaire à la lecture et compréhension du texte et des dessins !

Nos remerciements s'adressent à tous les partenaires qui avaient répondu positivement à notre demande en s'impliquant financièrement : l'Université Rennes 2, le CNRS, l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, Météo-France, la Région Bretagne, Rennes Métropole et la Ville de Rennes.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des membres du comité d'organisation constitués de membres de l'UMR LETG (sites de Rennes et Brest), de l'OSUR, de Météo-France, de TerraClima et de l'AUDIAR, et plus particulièrement au sein de ce comité, Roselyne Billy et Claudie Péron, gestionnaires administratives (Université Rennes 2 et UMR 6554 LETG-Rennes) qui s'étaient largement investies dans les préparatifs du colloque (inscriptions et logistiques diverses) au moment de la décision de l'annulation.

Enfin nous voulons remercier tous les auteurs pour leurs contributions et vous présenter ce volume des actes Rennes 2020.

A la suite de l'appel à contribution pour ce colloque, 208 propositions ont été reçues et 148 se sont concrétisées en résumés étendus de 6 pages témoignant de la vigueur des recherches menées par les climatologues géographes de l'AIC sur le thème « changement climatique et territoires ». Sur les 148 résumés soumis au comité scientifique, 119 résumés ont été acceptés pour publication et sont présentés dans ce volume par ordre alphabétique du nom du premier auteur. Faute de programme et de sessions, un index des mots clés classés par catégories (outils, méthodes, variables, objet de recherche, espaces géographiques) a été inséré pour faciliter au besoin la recherche d'articles sur des points spécifiques. Les contributions proviennent de 22 pays qui sont, par ordre alphabétique : Algérie, Belgique, Bénin, Brésil, Bulgarie, Burkina Faso, Canada, Congo, Côte d'Ivoire, France, Italie, Liban, Madagascar, Maroc, Niger,

Roumanie, Sénégal, Slovénie, Suisse, Togo, Tunisie et Uruguay. Si les résumés en langue française sont largement majoritaires (99), le nombre des résumés en anglais n'est pas négligeable (20) et représente ainsi environ 17% du total des résumés. L'ouverture à l'anglais aurait permis une recrudescence des contributions de la part de collègues d'Europe de l'Est (notamment Roumanie, Bulgarie et Slovénie) mais également du Brésil et de pays hispanophone comme l'Uruguay. On dénombre un total de 355 auteurs et co-auteurs.

Pour les actes, nous remercions vivement, d'une part, les 42 membres du comité scientifique international pour leur dévouement à relire de manière attentive les textes qui leur ont été confiés et sans qui ce volume n'aurait pas eu la qualité scientifique souhaitée :

ARVOR Damien (France)
BARAER Franck (France)
BARETTE Natalie (Canada)
BEN BOUBAKER Habib (Tunisie)
BIGOT Sylvain (France)
BONNARDOT Valérie (France)
BOURIAU Emmanuel (France)
CAMBERLIN Pierre (France)
CANTAT Olivier (France)
DAHECH Salem (France)
DROGUE Gilles (France)
DUBREUIL Vincent (France)
DOUTRELOUP Sébastien (Belgique)
EL MELKI Taoufik (Tunisie)
ELY Deise (Brésil)
FALLOT Jean-Michel (Suisse)
FOISSARD Xavier (France)
FORTIN Guillaume (Canada)
FOURMENT Mercedes (Uruguay)
FRATIANNI Simona (Italie)
FUNATSU Béatriz (France)
HOLOBÂCĂ Iulian (Roumanie)
KASTENDEUCH Pierre (France)
KERMADI Saida (France)
LE ROUX Renan (France)
MADELIN Malika (France)
MARTIN Nicolas (France)
MENDONCA Francisco (Brésil)
MICHOT Véronique (France)
MORON Vincent (France)
PLANCHON Olivier (France)
QUENOL Hervé (France)
RICHARD Yves (France)
ROME Sandra (France)
RONCHAIL Josyane (France)
SALOUI Abdelmalik (Maroc)
SOUBEYROUX Jean-Michel (France)
TRABOULSI Myriam (Liban)
ULLMANN Albin (France)
VANNIER Clémence (Nouvelle-Zélande)
VISSIN Expedit (Bénin)
ZAHARIA Liliana (Roumanie) ;

et d'autre part, Clémentine Charmont qui a minutieusement homogénéisé l'ensemble des textes et mis en forme ce volume final avec la plus grande patience et le plus grand soin. Ce travail éditorial final a pu être possible grâce aux subventions de l'Université Rennes 2, de l'UMR LETG, du site rennais de l'UMR, et du CNRS-INEE (préservées malgré l'annulation du colloque) ainsi qu'une subvention sollicitée à l'AIC à titre exceptionnel. Nous leur en sommes extrêmement reconnaissants.

En vous souhaitant bonne lecture !

Qui sait, peut-être nous retrouverons-nous à Rennes dans quelques années ? Nous vous proposerons peut-être à nouveau ce programme ….. avec une plus large palette de vins bretons à déguster !

JEAN PIERRE MARCHAND :

UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DU LIEN CLIMAT-TERRITOIRE

Vincent DUBREUIL, LETG-Rennes (ex. COSTEL !).

Jean Pierre Marchand est né à Laval le 2 juillet 1942. Nous aurions donc dû souhaiter son anniversaire pendant le XXXIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie qui devait se tenir à Rennes du 1er au 4 juillet 2020. Un virus venu de Chine en décida autrement. Mais la diffusion mondiale de la pandémie COVID-19 ne doit que peu au hasard et sa logique géographique, produit de contraintes humaines et environnementales, aurait surement inspiré JPM pour de nombreuses séances de cours. Car c'est bien cette interaction entre le physique et l'humain à l'échelle des territoires qui a marqué la carrière d'enseignant-chercheur de JPM. L'originalité du parcours est remarquable, impossible à cataloguer, mais fondamentalement marquée par l'espace géographique, les territoires organisés par les sociétés où s'expriment des contraintes physiques et notamment climatiques. Si les approches sont théoriques, elles sont toujours illustrées par des exemples précis : l'Irlande, l'Europe du Nord-Ouest, la Chine, la Bretagne et la Mayenne. Recruté Professeur à l'Université Rennes 2 en 1987 sur un profil « géographie physique, interface milieux naturels sociétés », il exerce aussi les responsabilités locales et nationales qui vont avec la charge professorale : c'est sous son autorité de « despote éclairé », comme il aime se définir parfois, que COSTEL accèdera au statut d'UMR reconnue par le CNRS. Mais reprenons l'histoire depuis le début…

QUEL BEAU METIER, PROFESSEUR !

Le choix de la climatologie résulte de circonstances familiales (son père fait son service militaire à la base d'Istres comme prévisionniste météo et le météorologue aime gérer l'averse et noter toutes les pluies), de rencontres avec certains enseignants (Michel Denis, Charles Pierre Péguy, François Durand-Dastes) et un goût pour les maths, qu'il veut changer en géographie. L'attrait pour la géographie est précoce également, dès le lycée ; de famille orléanaise, il naît et habite Laval, puis, arrivé à Rennes, parfois confronté à des velléités autonomistes, il n'a pas peur, de se présenter comme Jacobin et Français « depuis Hugues Capet » ! Après une maîtrise en 1968, il

obtient l'agrégation de géographie en 1969, une occasion d'approfondir sa connaissance des territoires et des noms de lieux, des Monts du Cantal au Pont du Jura ; et même s'il trouve que Macon a un drôle de nom, il n'est pas du genre à confondre le Doubs du Gard ou s'égarer sur le col qui conduit à l'Aveyron.

Mais les canicules ne l'emballent pas et ses travaux de thèse l'amènent finalement en Irlande sur les traces de James Joyce, de la Grande famine irlandaise, pays où le gros temps sévit et des avis de tempêtes. Publiée en 1985, la thèse recevra le prix « Alexandre de la Roquette » en 1987 par la Société de Géographie de Paris, prix qui récompense un travail consacré à l'Europe du nord et qui compte parmi ses prestigieux précédents lauréats : Nansen, Amundsen, Nordenskjöld, Paul-Emile Victor, J. Malaurie. La classe des grands pour ce jeune homme qui ne sortait pourtant pas de l'Ecole des Mines de Paris ! Pour André Hufty « c'est un travail pionnier notamment dans la mesure où il pose de manière habile le problème de l'unité de la géographie ». Le titre et le contenu de la thèse posent les bases théoriques de sa trajectoire scientifique : les contraintes (climatiques) de l'organisation de l'espace, l'approche statistique et systémique qu'il développera dans de nombreux articles. La « synoptique » est mobilisée pour comprendre les aléas et la statistique emprunte beaucoup à la dynamique de l'ER-30 à laquelle il participe. Membre également du Groupe Dupont depuis 1978 et de ses bons cahiers et colloques, il s'intéresse aux aspects théoriques qui fondent un certain renouveau de la discipline géographique à la charnière des années 1980-1990. Dans cette perspective, il collabore encore au dernier ouvrage de Charles Pierre Péguy (Espace, temps, complexité) paru en 2001.

Le cas irlandais sera repris dans son cadre régional européen dans l'aventure de la collection « Géographie Universelle » RECLUS BELIN dont il sera membre pendant dix ans du comité de rédaction sous la responsabilité de Roger Brunet et directeur du volume sur l'Europe du nord. Adepte de la chorématique, il voit les berges, les fronts pionniers ou la pire dune comme des discontinuités spatiales : il met en œuvre cette approche sur les territoires et les populations du Cap Nord aux Finisterres dans des pays modernes et industrialisés mais où les contraintes physiques n'ont, pour autant, jamais été absentes.

Plus original, sera le grand pas vers la Chine réalisé dans la foulée avec Jean Pierre Larivière. Une occasion d'approfondir mais aussi de tester l'universalité de la démarche systémique et de l'analyse spatiale. La climatologie passe un peu au second plan pendant cette période et c'est une vision personnelle de la géographie des territoires qui se développe. Le poids des contraintes physiques y est tout aussi variable que celui de l'économie ou le social quelque part entre l'epsilon et le déterminisme. Il propose une approche conceptuelle du territoire où le « système territorial peut être assimilé à un jeu de contraintes positives ou négatives en interactions ». Le paysage qui en résulte est aussi une production sociale, perçue et appropriée différemment dans le temps par les acteurs : sur ce thème, il emprunte (et collabore) aussi bien avec l'école bisontine qu'avec les historiens ou les écologues.

La climatologie réapparaît à l'occasion des travaux du groupe de travail sur les risques climatiques du GDR-CNRS-RICLIM, toujours dans l'optique de comprendre et analyser les systèmes territoriaux. En fin de carrière, il s'intéresse au changement climatique car, outre qu'il trouve l'effet de serre exotique, la rencontre avec les

mémoires de Guillaume le Doyen dans le Maine et l'Anjou lui permet d'intégrer l'analyse textuelle dans l'étude des temps longs du climat… Une fois encore, pour JPM le climat n'est pas une fin en soi, il ne prend un sens en géographie qu'à la condition d'y inclure les dimensions sociales et territoriales.

On retrouve cette vision sociale et systémique dans le rôle institutionnel joué par JPM dans toute sa carrière.

C'EST QUOI LE PIXEL ?

JPM aura été un acteur engagé dans les institutions de la Recherche et de l'enseignement supérieur. Son engagement a été syndical, dans la poursuite du mouvement anti-mandarinal post 1968, ancré à gauche (mais pas la gauche « molle ») même s'il s'est souvent senti plus proche des positions nationales de son syndicat que du « canal historique » local !

Il a exercé durant sa carrière des fonctions d'administration tant au niveau rennais qu'au niveau national. C'est ainsi que pendant deux mandats il a été membre du Comité National de la Recherche Scientifique (élu à la section 39 du Comité national du CNRS de 1995 à 2003) et qu'il a été appelé par le Comité national d'Evaluation des Universités à des fonctions d'expert chargé des aspects de la recherche. De 1996 à 2000, il a été membre du Comité du Programme interdisciplinaire de recherche sur environnement-vie-société (PIR-EVS) du CNRS.

Au niveau régional, il a effectué différentes missions d'expertises (Conseil régional de Bretagne, Commissions préparatoires au CPER, etc…) et siégé plusieurs années comme membre du Conseil scientifique de l'environnement de la Région Bretagne. Au niveau local, il a régulièrement été élu dans les différents conseils de l'Université de Rennes 2 et été Directeur de l'UFR de Géographie ainsi que membre de différentes Commissions de Spécialistes.

Il a surtout dirigé pendant 10 ans l'équipe COSTEL qui est passée pendant cette période du statut d'équipe universitaire à une équipe associée au CNRS sous différents labels : GDR 887 de 1990 à 1993, EP 31 en 1991, URA 1687 de 1994 à 1995 puis, finalement, en 1996 la création de l'UMR 6554 CNRS qui deviendra LETG (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique) dont il sera le premier directeur du site rennais. L'étiquette CNRS est un peu son « bébé » et les thésards et collègues du labo sa deuxième famille. Avec ses collègues Robert Bariou, Daniel Lecamus et Jean Mounier, il œuvre à la stabilisation et la reconnaissance de l'équipe en alliant rigueur scientifique et bonne humeur. Ainsi, pour les réunions de labo, plus le choix dans la date, il instaure les « mardis de COSTEL », une certaine idée de la science et de la convivialité où, après les discussions scientifiques et administratives, il préfère le Paddy irlandais au goût du blanc sec.

Il est l'artisan de la reconnaissance institutionnelle de COSTEL (Climat et Occupation des Sols par TELédétection), un comble pour lui se prétendant parfois être « ni télédétecteur ni climatologue » ! Mais si JPM n'est pas un télédétecteur, il le devient en fait un peu par percolation, se familiarisant aux indices de végétation, aux bandes passantes, aux inversions de lignes pour brancher les colonnes, aux images radar où les parasites brouillent l'écoute. Pour lui, la valeur du pixel n'est rien si son

étude ne passe pas par une réflexion géographique, les images de télédétection lui offrant l'opportunité de reposer la question de l'autocorrélation spatiale, la construction des modèles, celle de l'analyse (fondamentale selon lui) des résidus.

Par délégation et pour mettre le pied à l'étrier des jeunes collègues, il les aide à porter des thèses, faisant du « thésard » la pierre angulaire du développement de l'équipe, assurant le brassage et le renouvellement des générations et la stimulation intellectuelle. Pour JPM, quoi de mieux qu'une belle thèse, construite dans un collectif bienveillant ? Et combien de ces thésards devenus docteurs sont désormais ses collègues chercheurs, chercheuses, Professeurs, Maître ou Maîtresse de Conférences ? A toute occasion, sa dimension humaine a permis de mettre les échecs en valeur et de contribuer à élargir sa famille des géographes costellien(ne)s.

JPM est une sorte de synthèse de curiosité intellectuelle, non pas désordonnée mais au service d'une démarche géographique originale et qui s'est forgée par une confrontation d'idées permanente au sein de la géographie mais aussi en dehors de la discipline (GDR RICLIM, Pôle Armoricain de Recherche en Environnement, ancêtre du CAREN et de l'OSUR…). Impliqué tout à la fois dans l'animation scientifique et l'administration de l'enseignement supérieur et de la recherche, il aura contribué à établir et faire reconnaître une certaine vision de la climatologie géographique et un pôle désormais bien identifié à Rennes 2.

PRINCIPAUX OUVRAGES :

- 1985 : Contraintes climatiques et espace géographique, le cas irlandais, Ed Paradigme, Caen, 336p.

- 1996 : Europe du Nord, Europe Médiane, Tome IX Géographie universelle, Belin, Reclus, Paris, 479p. (avec P. Riquet).

- 1997 : Le climat, l'eau et les hommes, PUR, Rennes, 333 p. (avec V.Dubreuil).

- 1999 : Géographie de la Chine, Armand Colin, Coll U, Paris, 297p. (avec J.P. Larivière).

CONTRIBUTIONS DE JEAN PIERRE MARCHAND AUX COLLOQUES DE L'AIC :

1. Marchand J.-P., 2004 : Les risques climatiques extrêmes, Actes XVIIème colloque de l'AIC (Climat, mémoire du temps : Les relations climat-espace-société), Caen, France, 193-196.

2. Marchand J.-P., 2008 : Le climat et la géographie régionale : l'exemple des géographies universelles, Actes XXIème colloque de l'AIC (Climat et risques climatiques en Méditerranée), Montpellier, France, 431-435.

3. Marchand J.-P., Planchon O., Bonnardot V., 2010 : Le climat vécu, une aide à la détermination des climats passés : les hivers froids à Laval (1481-1537), Actes XXIIIème colloque de l'AIC (Risques et Changement Climatique), Rennes, France, 373-378.

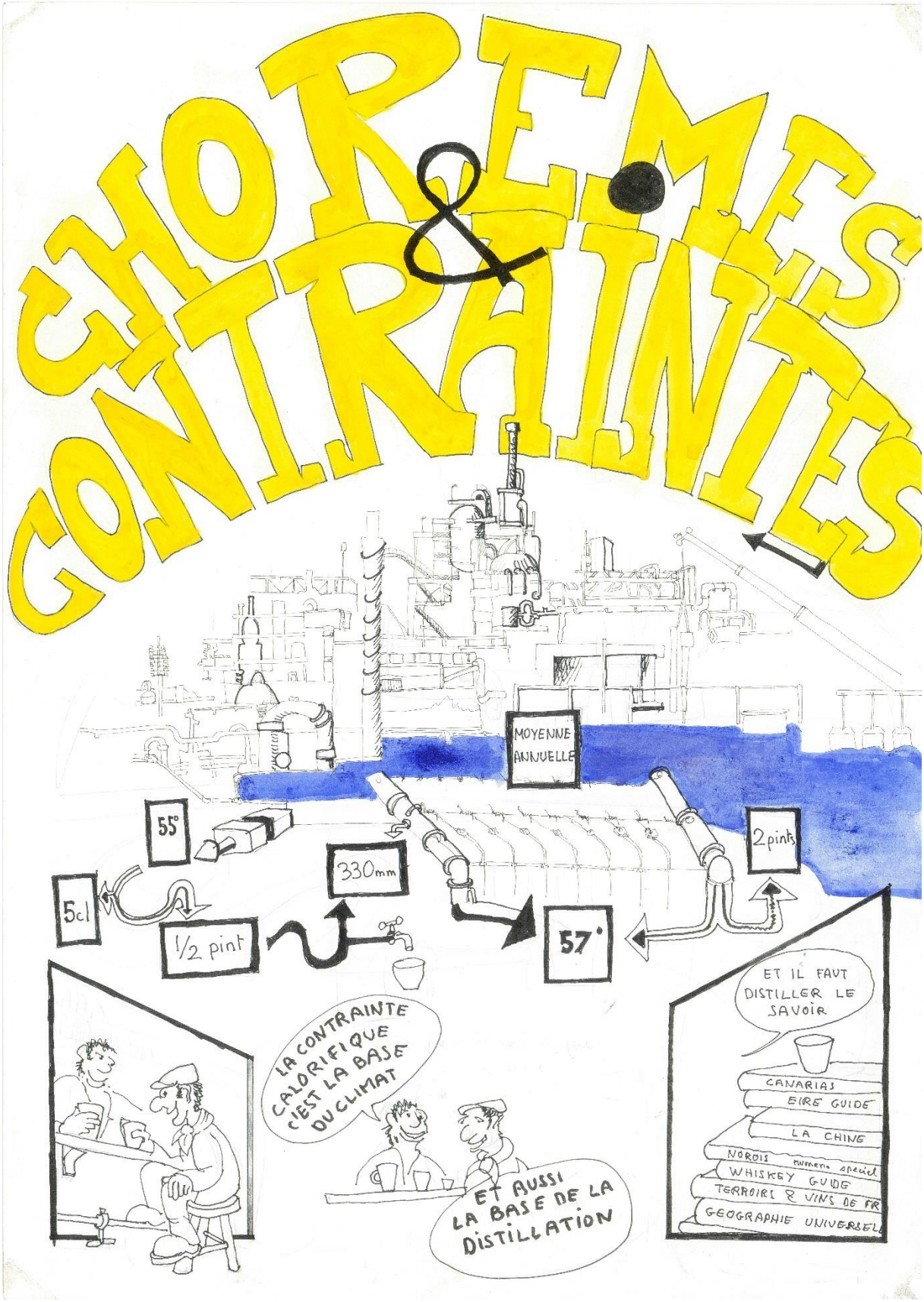
4. Marchand J.-P., Bonnardot V., Planchon O., Dubreuil V., 2011 : La vigne, le vin et le climat vus par un notable lavallois au début XVIème siècle. Actes du XXIVème colloque de l'AIC (Climats montagnards et risques), Rovereto, Italie, 381-386.

5. Marchand J.-P., Bonnardot V., 2012. Les territoires du risque et le climat à Laval (1480-1537). Actes du 25ième colloque de l'AIC (Les climats régionaux : observation et modélisation), Grenoble, France, 499-504.

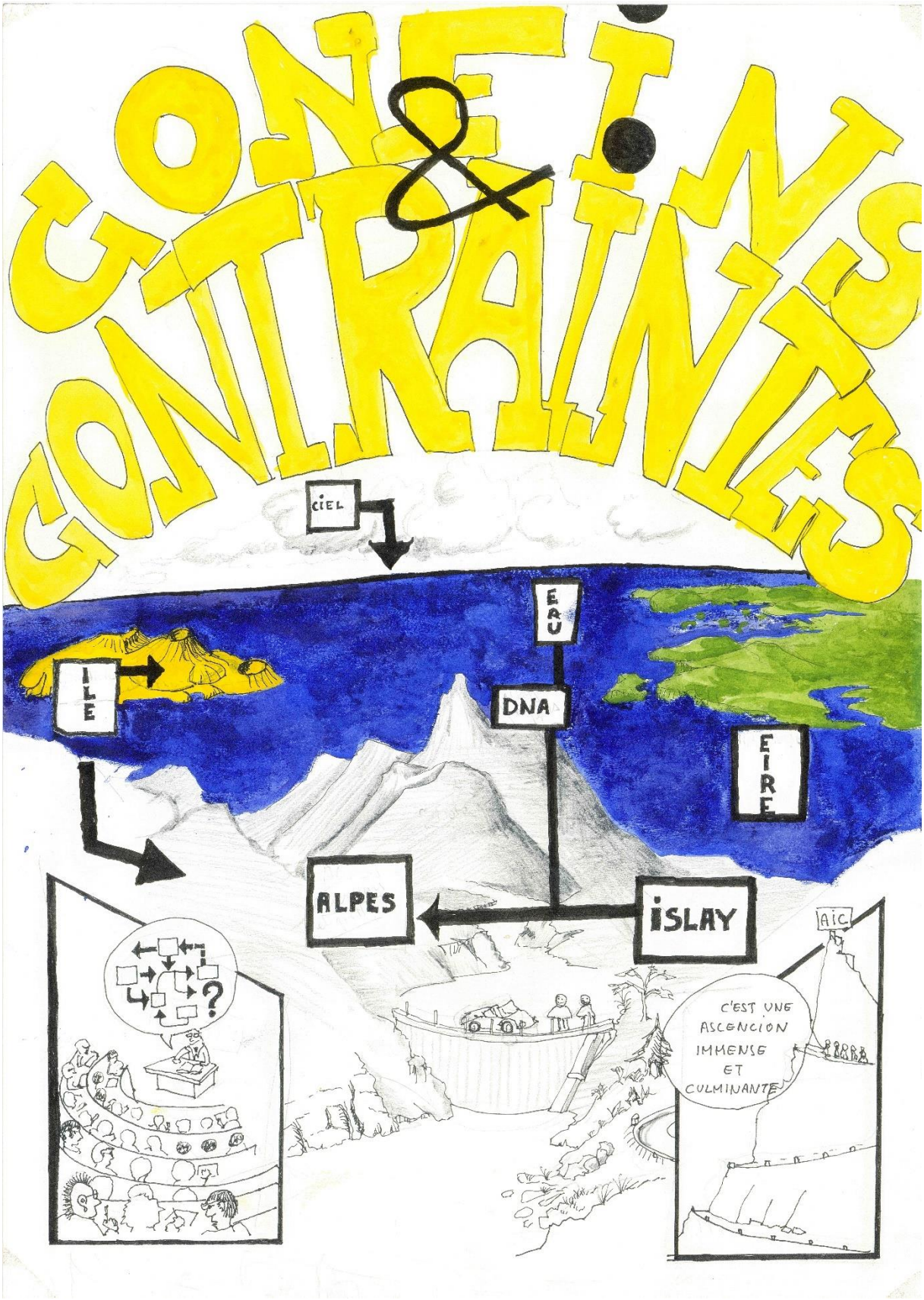
6. Marchand J.-P., Planchon O., Bonnardot V., Dubreuil V., 2014 : Laval, une station représentative du climat vécu de l'Ouest de la France (1480-1789) ? Actes du XXVIIème colloque de l'AIC (Climat : système et interactions), Dijon, France, 733-738.

7. Marchand J.-P., Planchon O. et Bonnardot V., 2016 : La variabilité des types de temps mensuels au XVIIIème siècle à Laval : approche méthodologique ». XXIXème colloque de l'AIC (Climat et pollution de l'air), Besançon, Lausanne, 315-319.

8. Marchand J.-P. et Bonnardot V., 2020 : Entre société, variabilités et changements climatiques : l'exemple de l'évolution du vignoble en Mayenne. Actes du XXVIIème colloque de l'AIC 2020 (Changement climatique et territoires), Rennes, France, 457-462.



Hervé REGNAULD, LETG_Rennes



Hervé REGNAULD, LETG_Rennes

RESUMES ETENDUS DES COMMUNICATIONS ET POSTERS PREVUS

CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION SONORE DANS L'AGGLOMERATION DE SFAX

ABDMOULEH M.A., DAHECH S.

Université de Paris, Faculté Sociétés et Humanités, UFR GHES UMR 8586 du CNRS (PRODIG), Paris, France (abdmouleh.mohamedali@yahoo.com ; salem.dahech@gmail.com)

Résumé : *Ce travail a pour objectif d'analyser les variations spatiales du niveau sonore aux pieds des bâtiments et par étage au centre-ville de Sfax, pendant l'heure de pointe matinale. Basé sur 187 points de mesure du niveau sonore, moyennant la méthode des mesures itinérantes, ce projet montre que le niveau du bruit au pieds des bâtiments dépasse 80 décibels dB(A) d'après des routes principales. Le nombre de véhicules, les coups de klaxons expliquent une grande part du niveau sonore. Dans les balcons des immeubles, le bruit baisse aux étages supérieurs par rapport au rez-de chaussée et au premier étage.*

Mots clés : *cartographie 3D ; SIG ; simulation ; trafic routier ; pollution sonore*

Summary: ***Noise pollution mapping in the Sfax urban area.*** *The purpose of this work is to analyze the spatial variations in the sound level at the feet of buildings and by floor in downtown Sfax, during the morning rush hour. Based on 187 sound level measurement points, using the traveling measurement method, this project shows that the noise level at the feet of buildings exceeds 80 decibels (dB) near main roads. The number of vehicles, the blows of horns explain a large part of the noise level. In the balconies of buildings, noise decreases on the upper floors compared to the ground floor and the first floor. the number of vehicles.*

Key words: *3D mapping; GIS; simulation; road traffic; noise pollution*

Introduction

Dans les zones urbaines le son est un élément essentiel de l'environnement quotidien. La ville a toujours tendance à concentrer plus de sources de bruit, d'où la rareté des environnements sonores agréables en ville. Le bruit est lié fortement au processus d'urbanisation et au développement de l'industrie et des transports (OMS, 2011 ; Paschalidou, et *al*., 2019). Pour assurer un niveau de bruit modéré, il est primordial de trouver les éléments qui agissent sur ce phénomène. Le bruit est considéré comme une source de nuisance. En effet, il est la première source de plaintes et l'une des premières sources de conflits, au travail, entre voisins, entre collectivités et usagers (Dahech et Rekik, 2012). Le bruit peut affecter gravement la santé des individus et troubler la tranquillité des populations (Zannin et Ferraz., 2016, Stoter., et *al*., 2020). L'impact du bruit sur la santé comprend la gêne, les troubles auditifs, l'intelligibilité de la parole, les troubles du sommeil, les maladies cardiovasculaires, les maladies mentales, l'interférence dans l'exécution de tâches complexes et la modification des comportements sociaux : troubles d'apprentissage (Basner et *al*., 2014, Minichilli et *al*., 2018). « Les nuisances sonores sont au cœur des problèmes de la société moderne » ; elles évoluent selon les époques, les lieux et les perceptions (Amous, 2008). Des études récentes permettent d'analyser la variation spatiale des niveaux du bruit, déterminer la population affectée et comment l'atténuer (Quiñones-Bolaños et *al*., 2016 ; Kaddoura et *al*., 2017). Une approche pluridisciplinaire est recommandée pour étudier le bruit dans la ville (Roulier, 1998). Dans ce travail nous représentons la répartition spatiale du bruit induit par le transport routier à Sfax (Tunisie). Nous montrons la répartition du bruit, dans les rues de la zone étudiée, pendant les heures de pointes, dans un premier temps. Ensuite, dans un deuxième temps, le bruit mesuré à différents étages, au niveau des balcons des immeubles est cartographié d'une façon ponctuelle. Enfin, dans un troisième temps, nous tentons une modélisation du bruit à différents étages, représentée par une cartographie en 3D.

1. Zone d'étude, méthodes et données

La ville de Sfax, au centre-est tunisien (Fig.1A), compte environ 600 000 habitants, se caractérise par sa dynamique économique. Elle concentre diverses activités industrielles et tertiaires et se caractérise par un trafic routier dense. Le comptage des véhicules par la municipalité de Sfax donne environ 50 000 voitures par jour au centre-ville de Sfax avec un pic important le matin (5550 voitures/heure au croisement avenue Majida Boulila/ avenue 14 janvier) (Fig.1B). Nous nous limiterons aux quartiers de Sfax Eljadida et au centre-ville européen où se concentrent les commerces et les administrations. La collecte de données s'est déroulée de 7h30 à 9h00. Nous avons réalisé un travail de prospection et d'analyse des sites à enjeux où il existe un trafic routier dense avant de choisir les immeubles du centre-ville de Sfax, siège des mesures. Les relevés se sont déroulés durant les jours ouvrables au niveau des balcons des immeubles durant la période du pic matinal du trafic routier. 187 points d'enregistrement ont été choisis en fonction de la densité du trafic routier et de l'exposition au bruit. Les mesures sont réalisées par deux capteurs de type EXTECH 407764 équipés d'un enregistreur réalisant une mesure toutes les 5 secondes. Le travail a été réalisé instantanément par 2 équipes réalisant des mesures semi- itinérantes avec un arrêt de 5 minutes par point et une cadence de 5 secondes. La totalité de l'espace a été balayée avec un espacement d'environ 300 m entre chaque point de mesure. Le même travail a été refait trois fois afin de valider et confirmer les résultats obtenus. Outre les relevés près de la chaussée, 187 mesures au niveau des balcons des immeubles sont effectuées à différentes hauteurs : au premier, au troisième et au sixième étage. Les points de mesure sont prédéfinis et localisés par GPS. Les mesures ont été réalisées, durant les jours ouvrables, par temps calme parce que les conditions atmosphériques instables pourraient influencer la propagation acoustique en milieu extérieur (Aumond, 2011). Ce type de temps est très fréquent dans la zone d'étude, particulièrement durant la saison chaude (Dahech, 2007). A chaque point de mesure, nous avons associé l'heure de l'enregistrement, le nombre de véhicule, des informations sur l'activité (atelier, commerce…), la distance par rapport au rond-point, la proximité par rapport au mur et la chaussée. L'analyse de la circulation routière, basée sur le comptage des véhicules dans une dizaine de ronds-points et carrefours de la ville en 2007, d'après le Recensement général de la circulation en 2007 fourni par la Direction Générale des Ponts et Chaussées et Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routier, montre que les grands ronds-points du centre-ville sont les plus embouteillés (MEAT, 2007). Ces variables sont sollicitées pour modéliser le bruit suivant la méthode statistique de régression multiple. Les mesures ponctuelles réalisées au niveau des balcons des immeubles ont été extrapolées à l'ensemble des deux quartiers étudiés en tenant compte des variables explicatives du bruit. La moyenne des niveaux de bruit ainsi que le bruit maximum et minimum atteint sur la période totale de l'enregistrement pour chaque point sont notées. Les immeubles sont choisis en se référant à leur milieu environnant (activités, occupation du sol), la proximité aux croisements et leur architecture d'une manière à couvrir des échantillons représentatifs. La digitalisation des bâtiments est faite à partir du fond Google Earth daté de 2013. Il faut tenir compte dans la digitalisation et la détermination des hauteurs des bâtiments de plusieurs variables comme la distance à la voirie, la situation en première ou en seconde position par rapport à l'artère principale.

2. Simulation des niveaux sonores induits par le trafic routier

Les immeubles donnants sur la voie principale sont exposés à un bruit qui atteint un niveau supérieur à 78dB(A). En effet, nous relevons environ 350 véhicules/5mn. Cependant, on enregistre un niveau sonore inférieur à 70dB(A) près des routes secondaires drainant environ 180 véhicules/5mn. Alors que des niveaux inférieurs à 64dB(A) sont observés loin des axes routiers, au pied des bâtiments donnant sur des cours (Fig.1). Les niveaux les plus élevés, proches de 85 dB(A), sont enregistrés aux bords des avenues Majida Boulila, Carthage et 14 janvier ainsi que dans les principales artères de la ville européenne où nous comptons plus de 300 voitures/5mn (avenues Farhat Hached et 18janvier) (Fig.1). Nous avons recensé, durant la période de pointe matinale des jours ouvrables entre 7h30 et 8h30 environ 5700 véhicules/heure

au niveau des croisements routiers jouxtant la Médina, où le niveau sonore moyen dépasse 85 dB(A). En dehors des principaux croisements et des voies principales, le bruit baisse dans les rues secondaires comme dans la rue Habib Achour et rue de Mauritanie (67-70dB(A) dans la ville européenne (Fig.1D).

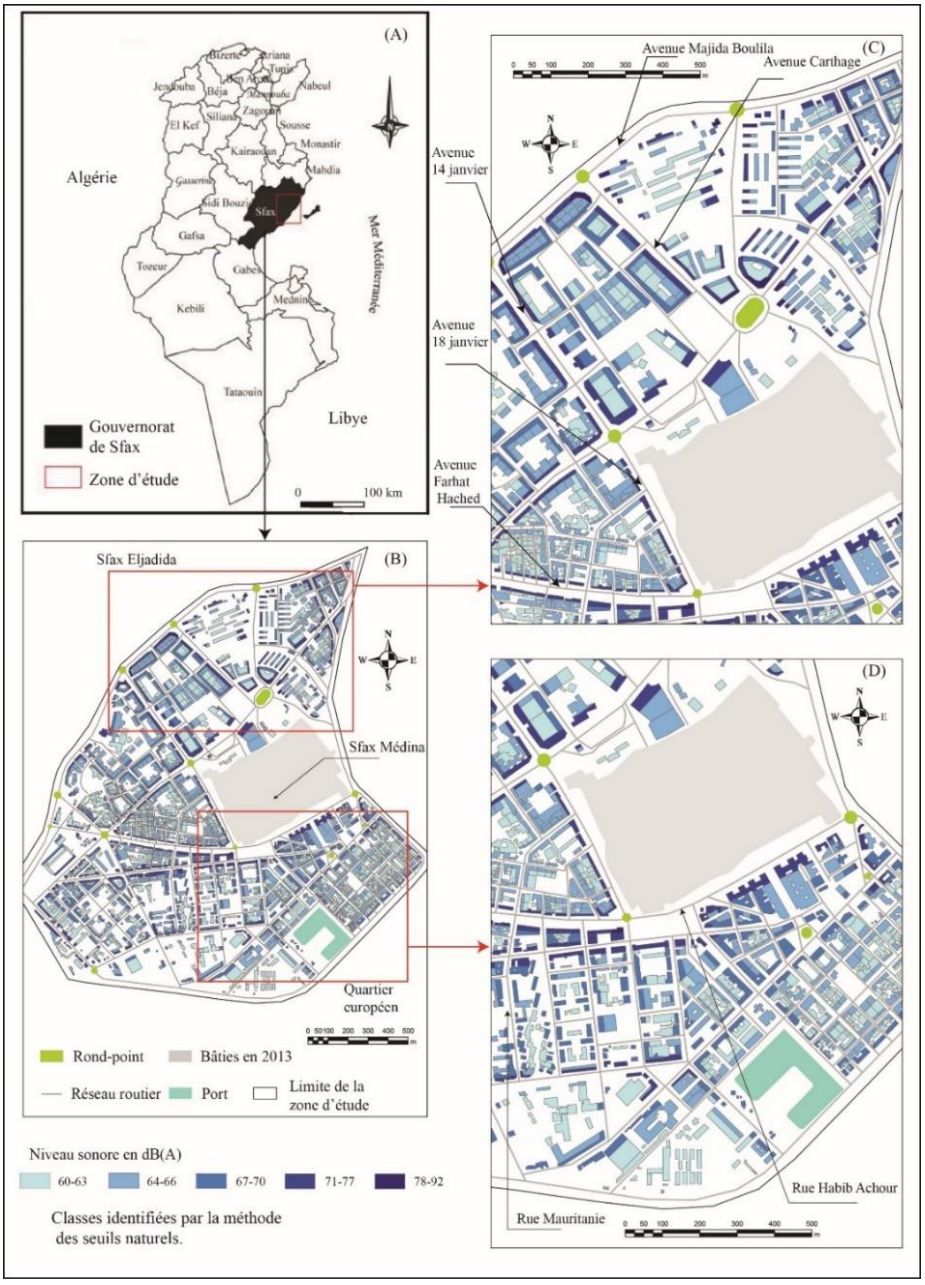


Figure 1. Localisation de Sfax (A) ; répartition spatiale du bruit au pied des bâtiments au centre-ville de Sfax (en dehors de la Médina, B) : à Sfax Eljadida (C) et au quartier européen (D) (Moyenne de 5 minutes par point, de 7h30 à 9h, validée trois fois, en mai 2013, pas de temps 5 secondes, capteur EXTECH).

3. Représentation ponctuelle du bruit au niveau des balcons des bâtiments

Les résultats issus des campagnes de mesures diurnes confirment la corrélation qui existe entre l'exposition sonore et la proximité des sources de bruit. Une très forte corrélation positive qui se traduit par un coefficient de corrélation r=0.85. Le premier étage enregistre un niveau sonore plus élevé que celui des balcons des étages supérieurs. En moyenne, une valeur de 67 dB(A) est observée au premier étage. Cette valeur passe à 64 dB(A) au troisième pour atteindre 58-60 dB(A) au sixième étage (Tab.1). Le premier étage, plus bruyant que ceux situés au-

dessus, enregistre un niveau de bruit élevé près des principaux axes routiers où les valeurs instantanées maximales, suite à des coups de klaxons répétés, dépasse 70dB(A) (Fig.2). Parmi les rues les plus animées, nous citons Majida Boulila, Farhat Hached et 14 janvier. La baisse systématique du bruit au 6ème étage est induite par l'éloignement de la source du bruit (frottement des roues avec la chaussée, klaxon, coup de frein, passage de train...

Tableau 1. Niveau sonore dans le centre-ville de Sfax au niveau des balcons des immeubles à différents étages (Moyenne de 5 minutes par point, de 7h30 à 9h, validée trois fois, en mai 2013, pas de temps 5 secondes, capteur EXTECH).

	1ère étage	3ème étage	6ème étage
Niveau sonore dB (A) voix principale	70-71	69-70	68-70
Niveau sonore dB (A) voix ordinaire	65-67	64-66	61-64
Niveau sonore dB (A) voix secondaire	60-61	58-59	55-57

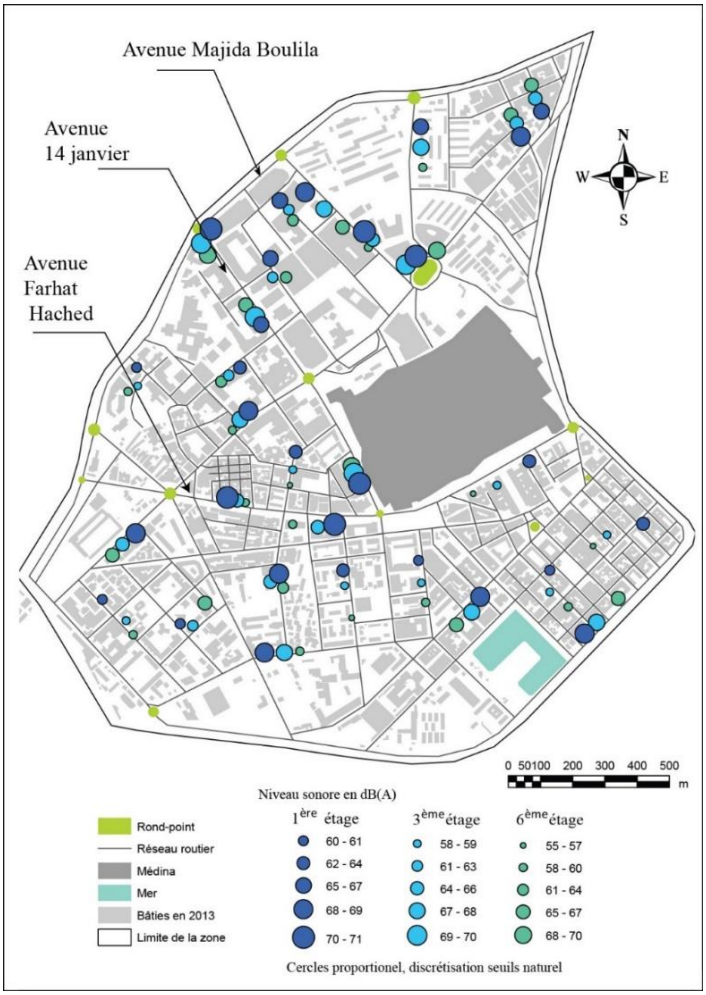


Figure 2. La répartition spatiale du niveau sonore dans le centre-ville de Sfax au niveau des balcons des immeubles à différents étages (Moyenne de 5 minutes par point, de 7h30 à 9h, validée trois fois, en mai 2013, pas de temps 5 secondes, capteur EXTECH).

4. Création d'un prototype cartographie SIG 3D du bruit diurne au niveau des balcons des immeubles à différents étages et à l'intérieur des cours

Les niveaux de bruit mesurés ponctuellement sont extrapolés en tenant compte des facteurs discriminants : la densité du trafic routier, la proximité aux croisements, les activités

économiques, la hauteur de la mesure. Les valeurs simulées sont ensuite calquées sur une maquette 3D, réalisée par nos soins. Ci-dessous nous présentons quatre échantillons permettant de voir la répartition spatiale du bruit à différents étages de chaque immeuble et à l'intérieur des cours (Fig.3). Les résultats obtenus montrent une baisse progressive du bruit en s'éloignant de la surface. Dans l'échantillon A, choisi près de la Médina, nous montrons la répartition spatiale à proximité du rondpoint qui sépare l'avenue 14 janvier du 18 janvier. On remarque un niveau sonore élevé au premier et au deuxième étage de 68 à 70 dB(A). En revanche, près d'un axe routier secondaire le niveau baisse à 62-64 dB(A). Cette baisse est plus considérable à l'intérieur des cours où le bruit chute à 60 dB(A). Le troisième étage enregistre un niveau allant de 62 à 64dB(A) près des axes majeurs, mais dans les bâtiments longeant les axes secondaires le niveau diminue à 59 -61dB(A). Au niveau du sixième étage le niveau du bruit baisse à 59 -61dB(A) au bord des axes principaux et atteint 55dB(A) du côté des cours des immeubles. Les fenêtres B et D, présentent la situation à proximité de l'avenue Habib Bourguiba, formé de 4 voies, dans le quartier européen. Le niveau sonore varie de 68 à 70 dB(A) au niveau du premier étage à cause d'un trafic routier intense. Cependant, au sixième étage le bruit devient plus faible allant de 55 à 58 dB(A). Aux alentours du vieux port la circulation devient à sens unique le long de la rue Ali Bachhamba d'où une baisse du bruit : un niveau sonore de 59- 61 dB(A) au niveau du premier étage suite à un trafic fluide (90 véhicule/5mn) (Fig.4A, B, C, D).

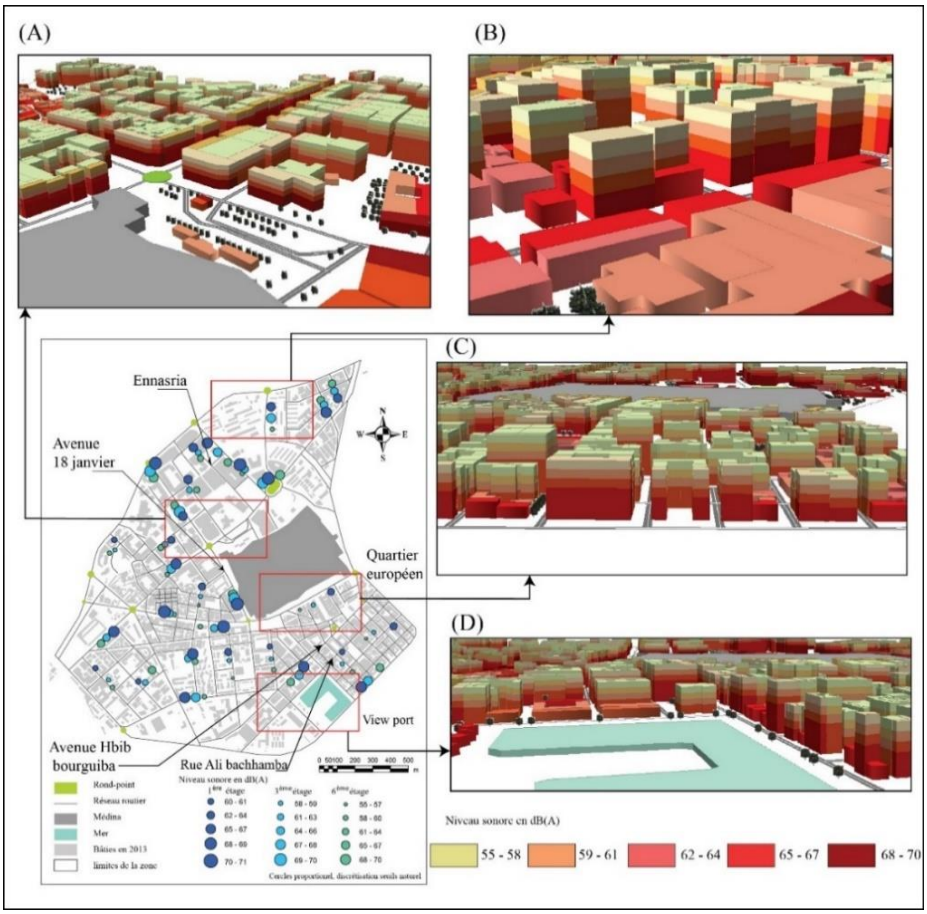


Figure 3. Représentation en trois dimensions de la répartition spatiale du bruit diurne dans le centre-ville de Sfax au niveau des balcons des immeubles à différents étages (mesures réalisées entre avril et juillet 2013, capteur EXTECH).

Conclusion

Ce travail étudie la variation du niveau du bruit au pied des bâtiments et à différents étages de chaque immeuble. Les résultats issus des campagnes de mesures confirment la corrélation

r=0.85qui existe entre le niveau sonore et la proximité des sources de bruit : le trafic routier. D'une part les mesures ponctuelles du bruit au niveau des croisements et des rondpoints routiers montrent la présence de plusieurs pics dépassant 90 dB(A) causés par de coups de klaxon répétés. Le dépassement de la norme OMS fixée à 50 dB(A) sont fréquents. Aux pieds des bâtiments le niveau de bruit s'élevé dans les zones dépourvues d'obstacles à la propagation. Les résultats confirment également l'ampleur du niveau sonore fort, dépassant parfois 80 dB(A) dans l'ensemble du centre-ville particulièrement près des grands axes comme à Sfax Eljadida et dans le quartier européen. Le niveau du bruit mesuré dans les balcons des immeubles baisse d'environ 8 dB(A) au sixième étage par rapport au premier à proximité des principaux axes routiers. La différence du bruit d'un étage à autre devient mois accentués dans les balcons donnant sur les cours.

Bibliographie

Abdmouleh M.A., Dahech S., 2014. Répartition spatiale de la pollution sonore dans l'agglomération de Sfax de la mesure à la modélisation. 8ème édition des Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Aire (JIQA), 10 & 11 février à Villeneuve d'Ascq Lille, 16p.

Amous E., 2008. *Son et bruit*. Ecole nationale supérieure de création industrielle, Master spécialisé création nouveaux média, 36p.

Aumond P., 2011. *Modélisation numérique pour l'acoustique environnementale : simulation de champs météorologiques et intégration dans un modèle de propagation*. Thèse de doctorat à l'Université du Maine. 132p.

Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332.

Dahech S. et Rekik F., 2012. Trafic routier et pollution sonore à Sfax (Tunisie méridionale) : étude pluridisciplinaire. *Pollution atmosphérique* N° 125, 259-274.

Dahech S., 2007. *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309p. + annexes.

Kaddoura, I., Kröger, L., & Nagel, K. 2017. An activity-based and dynamic approach to calculate road traffic noise damages. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 335–347.

MEAT., 2007. Ministère de l'Environnement de l'Aménagement du Territoire- Direction Générale des Ponts et Chaussées. Recensement général de la circulation, Tunis, 374p.

Minichilli, F., Gorini, F., Ascari, E., Bianchi, F., Coi, A., Fredianelli, L., … Cori, L., 2018. Annoyance Judgment and Measurements of Environmental Noise: A Focus on Italian Secondary Schools. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 208. doi: 10.3390/ijerph15020208.

Paschalidou, A. K., Kassomenos, P., & Chonianaki, F., 2019. Strategic Noise Maps and Action Plans for the reduction of population exposure in a Mediterranean port city. *Science of The Total Environment.*

Quiñones-Bolaños, E. E., Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M., 2016. A traffic noise model for road intersections in the city of Cartagena de Indias, Colombia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 149–161. doi: 10.1016/j.trd.2016.05.007.

Stoter, J., Peters, R., Commandeur, T., Dukai, B., Kumar, K., & Ledoux, H. 2020. Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 80, 101424.

WHO, 2011. Burden of disease of environmental noise. Quantification oh healthy life years lost in Europe. European Centre of Environment and Health and JRC, EU.

Zannin, P., Ferraz F., 2016. *Noise pollution in urban and industrial environments. Measurements and noise mapping*. New York, Nova Science Publishers, 356p.

Zannin, P.H.T., Ferraz, F., 2016. Assessment of Indoor and Outdoor Noise Pollution at a University Hospital Based on Acoustic Measurements and Noise Mapping. *Open Journal of Acoustics*, 6, 71-85. Doi: http://dx.doi.org/10.4236/oja.2016.64006 ; URL: https://www.scirp.org/pdf/OJA_2016122315162300.pdf

RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE DANS LE DOMAINE DE TRANSITION CLIMATIQUE AU BENIN

ADIGBEGNON M.[1], TOTIN VODOUNON S.H.[1,2], AMOUSSOU E.[1,2], AVAHOUINC N.N.[1], HOUNGNIBO K.[1], ADETONA L.[1]

1 Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Parakou, Bénin (sourouhenri@yahoo.fr ; totinsourouhv@gmail.com ; adigbegnonmarcel@gmail.com)
2 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Cotonou, Bénin

Résumé : *Le climat du domaine de transition au Bénin a connu une évolution dans le temps. Cette recherche analyse la tendance climatique par l'augmentation des températures du domaine de transition située au Centre-Bénin. L'étude de la régression linéaire et de la variation des températures maximales, minimales et moyennes de la station de Savè sur la période de 1971-2015 ont permis d'appréhender le rythme de la hausse des températures. Entre 1971 et 2015, avec un taux de 0,03°C/an la température moyenne a varié de façon linéaire entre 26°C et 28 °C. Cette hausse de la température moyenne confirme le réchauffement climatique dans le secteur d'étude. Que ce soit en saison sèche ou en saison pluvieuse, les températures minimale, moyenne et maximale ont augmenté respectivement d'un taux de 0,02 °C/an, 0,02°C/an 0,03°C/an mais plus accentuées dans la première saison. Cela a entrainé la diminution du nombre d'événement pluvieux et la perturbation du système humain.*

Mots clés : *transition ; tendance ; température ; réchauffement ; domaine*

Summary: ***Climatic heating in the field of climatic transition in Benin***. *The climate of the transitional area in Benin has changed over time. This research analyzes the climate trend by increasing temperatures in the transition area located in Center-Benin. The study of the linear regression and the variation of the maximum, minimum and average temperatures of the Savè station over the period from 1971 to 2015 allowed us to apprehend the rate of the rise in temperatures. Between 1971 and 2015, with a rate of 0.03 ° C / year the average temperature varied linearly between 26 ° C and 28 ° C. This rise in average temperature confirms global warming in the study area. Whether in the dry season or the rainy season, the minimum, average and maximum temperatures increased by a rate of 0.02 ° C / year, 0.02 ° C / year 0.03 ° C / year respectively but more accentuated in the first season. This has led to a decrease in the number of rain events and to the disruption of the human system.*

Key words: *transition; trend; temperature; warming; domain*

Introduction

Le changement climatique se caractérise comme étant une modification des grandeurs statistique décrivant le climat, modification pouvant être due soit à la variabilité naturelle soit à des causes anthropiques (GIEC, 2007). En effet, à l'horizon 2020, 75 à 250 millions de personnes en Afrique seront exposées à une pénurie d'eau (PANA-BENIN, 2007) du fait du réchauffement climatique. Ce réchauffement s'accompagne de variations dans le cycle hydrologique, dues à des changements dans l'intensité, la fréquence et la durée des précipitations, ainsi que dans la distribution temporelle et spatiale de l'eau (Baronetti *et al.*, 2018). L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, et le niveau des mers s'est élevé (GIEC, 2014). Cela a des incidences qui peuvent être plus accusées dans certains pays que dans d'autres, du fait de la grande variabilité spatiale du climat et du développement socio-économique du pays (Ouédraogo, 2012).

Selon GIEC (2007), en cas de réchauffement moyen mondial supérieur à 1,5-2,5°C, 20 à 30% des espèces végétales et animales seront menacées d'extinction, et des changements majeurs affecteront la structure et le fonctionnement des écosystèmes, les interactions entre espèces, leur distribution géographique, avec des conséquences négatives sur les biens et services associés à ces écosystèmes. Dans le domaine de transition climatique située au Centre-Benin, ce réchauffement pourrait avoir de nombreuses répercussions, plus ou moins complexes sur les écosystèmes. Cette recherche est menée sur le réchauffement climatique et ses incidences dans le domaine du climat de transition.

1. Données et méthodes

1.1. Caractéristiques physico-géographiques du secteur d'étude

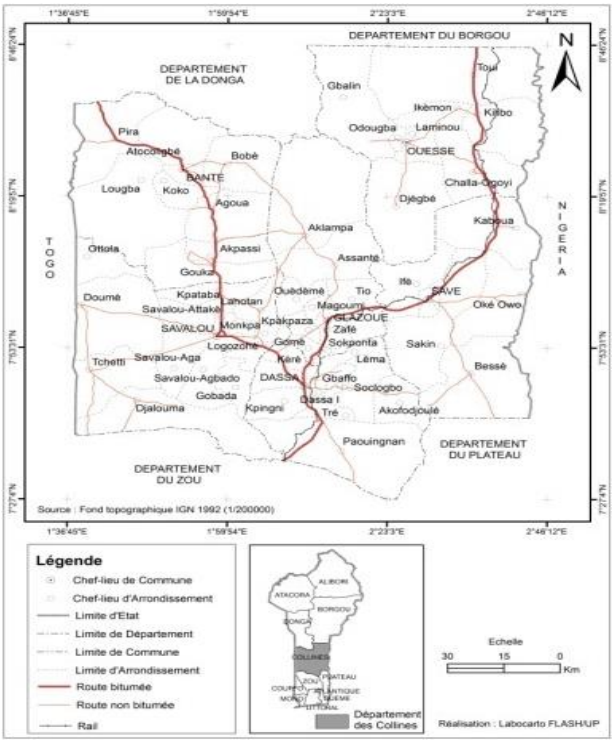


Figure 1. Situation géographique du domaine de transition climatique

Du fait de sa position géographique dans un domaine climatique tropical intermédiaire dite de transition entre les climats guinéen au sud et soudanien au nord, le domaine de transition climatique est situé entre 7°27' et 8°46' Nord et entre 1°39' et 2°44' Est. Il couvre une superficie de 13 931 km² et est constitué de six communes que sont Bantè, Dassa-Zoumè, Glazoué, Ouèssè, Savalou et Savè avec une population de717 477 habitants en 2013 (INSAE, 2016).

Le secteur appartient intégralement à la zone de climat soudano-guinéen à deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. Le nombre total normal de jours pluvieux dans l'année varie entre 80 et 110 avec une moyenne de 1058,78 ±193,1 mm. La température moyenne est de 27,7 ±1,5°C sur la période 1971-2015. Les activités contribuant au renforcement des gaz à effets de serre sont l'agriculture, l'élevage, l'exploitation forestière.

1.2. Données

Les données de température de la station synoptique de Savè sur la période 1971-2015, collectées à l'ASECNA-Cotonou, ont permis d'analyser la tendance thermométrique. Ces données ont permis d'obtenir les taux de variation (TxV) en °C (°C/an) à partir de l'équation de droite par unité de temps (Totin, 2010). Elle se calcule par la formule : $TxV = 100 * \frac{a}{X}$.

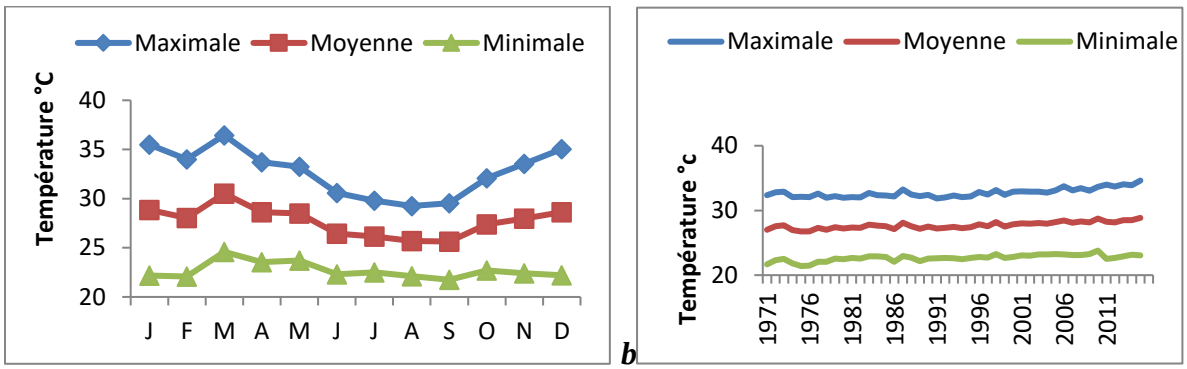
La droite linéaire a permis de déceler les tendances thermométriques (Vissin, 2007). L'équation de la droite de tendance de la forme : Y= ax+b avec b, une constante. Le coefficient directeur représentant la pente a été exploité en termes de taux de réchauffement. Si a > 0, la tendance est positive ; et si a < 0, la tendance est négative.

Les données pastorales le cheptel animal de 2011 à 2015 ont été collectées au Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et la consommation en bois-énergie pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre. Sur la base d'un taux journalier théorique de 1,2 kg/hbt (ABE, 1998), a été déterminée grâce à la formule : Cbi = 1,2*Popi*Nji, avec Popi : Effectif de la population d'une année donnée et NJi : Nombre de jours de l'année considérée (Adigbegnon *et al.*, 2018).

2. Résultats

2.1. Régime moyen mensuel et variabilité interannuelle de la température dans le domaine du climat de transition

Les températures mensuelles et annuelles minimales, maximales et moyennes sur la période de 1971-2015 (Fig.2) ont permis de mettre en évidence la variabilité thermométrique dans le domaine de transition climatique.



a ***b***

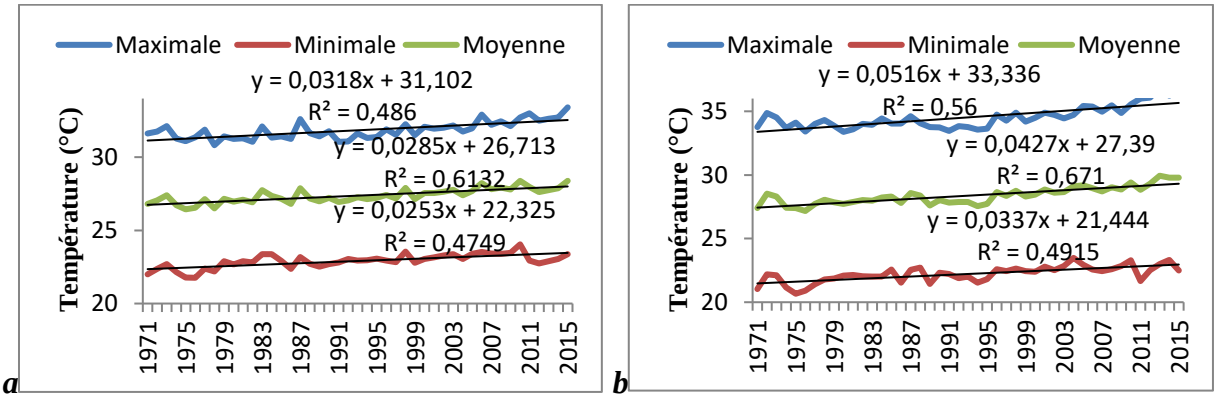
Figure 2. Régime thermométrique mensuel moyen (a) et variabilité interannuelle (b) de la température dans le domaine du climat de transition entre 1971 et 2015

L'analyse de la figure 2a montre à l'échelle mensuelle une augmentation de la température moyenne de 28,83°C de janvier à 30,52°C en mars. Cette période de l'année est marquée par de forte chaleur dans le secteur d'étude et un réchauffement de la surface des sols s'observe. La température a baissé progressivement de 28,61°C en avril à 25,63°C en septembre. Cette température a connu une légère augmentation en octobre de 27,39°C jusqu'en décembre où elle passe à 28,62°C. Le mois de mars est marqué par une hausse de la température (24,59°C) pour les températures minimales, (30,52°C) pour les températures moyennes, et (36,45°C) pour les températures maximales. Il est caractérisé par une forte chaleur ce qui ne reste pas sans impact sur les systèmes humains et végétaux et les ressources en eau.

La température moyenne varie entre 1971-1987 augmentant de 27°C et 28,11°C (Fig.2b). Cette augmentation a été davantage renforcée pendant la période de 1988 à 2015 de 27,58°C à 28,85°C. Cette variation de la température n'est pas linéaire. La température moyenne, est alors passée de 27°C en 1971 à 28,85°C en 2015, soit un écart de 1,85°C. Cette augmentation de la température favorise la forte pression évaporatoire avec pour conséquence l'assèchement rapide des cours d'eau et la baisse progressive des rendements agropastorales.

2.2. Variation saisonnière des températures dans la zone de transition climatique

L'étude du rythme saisonnier des températures a permis d'analyser l'évolution des températures maximale, minimale et moyenne entre 1971 et 2015 (Fig.3).



a ***b***

Figure 3. Variation des températures en saison sèche (a) et en saison pluvieuse (b) dans le domaine du climat de transition entre 1971 et 2015

La variation saisonnière des températures montre une tendance à la hausse des températures (maximale, moyenne et minimale) au cours des différentes saisons. En effet, pendant la saison sèche, le taux de réchauffement des températures maximales, moyennes et minimales (Fig.3a) est respectivement de 0,05°C/an (soit 2,25°C en 45 ans), de 0,04°C/an (soit 1,8°C en 45 ans) et de 0,03°C/an (soit 1,35°C en 45 ans).

La température moyenne annuelle pendant la saison humide a varié entre 26,82°C et 28,38°C au cours de la période de 1971 à 2015 avec un taux de réchauffement de 0,02°C (soit 0,9°C pour 45 ans). La température minimale a augmenté de 22,01°C en 1971 à 23,36°C en 2015 avec un taux de réchauffement de 0,02°C. Par contre le taux de réchauffement de la température maximale est de 0,03°C/an soit 1,35°C pour 45 ans. Toutes ces tendances analysées permettent de déduire qu'il y a une forte corrélation entre ce réchauffement et les températures minimale, moyenne et maximale dans le domaine de transition climatique (Tab.1).

Tableau 1. Taux de réchauffement climatique en saison sèche et en saison humide dans le domaine de transition climatique

Température	**Saison sèche (1971-2015)**				**Saison humide (1971-2015)**			
	Température (°C)		Coefficient de détermination (R^2) et de corrélation (r)		Température (°C)		Coefficient de détermination (R^2) et de corrélation (r)	
	1971	2015			1971	2015		
Maximale	33,75	37,08	R^2=0,5	r=0,7	31,62	33,40	R^2=0,4	r=0,6
Moyenne	27,40	29,79	R^2=0,6	r=0,8	26,82	28,38	R^2=0,6	r=0,7
Minimale	21,04	29,50	R^2=0,4	r=0,7	22,01	23,36	R^2=0,4	r=0,6

L'analyse du tableau 1 montre que la température moyenne influence plus le réchauffement climatique que les températures minimale et maximale. Ce réchauffement est très corrélé avec la température moyenne (r = 0,8). Ce coefficient de 0,8 n'indique vraiment pas la régression tandis que le R^2 (R^2=0,6) explique à 60 % une régression linéaire des températures. Par contre la liaison de dépendance est partielle (r = 0,7) avec les températures minimale et maximale. En saison sèche (r =0,8) ou en saison humide (r = 0,7), la température moyenne contribue fortement au réchauffement climatique dans le secteur d'étude. Cela signifie que l'indicateur le plus approprié pour apprécier le réchauffement climatique dans le secteur d'étude est la température moyenne.

Environs 86 % des enquêtés confirment qu'il y a une augmentation de la température et cela s'explique par le fait que la chaleur est devenue plus atroce ces quatre dernières décennies. Ainsi, toutes ces tendances observées ont eu des impacts sur les ressources naturelles dont notamment les ressources en eau.

2.3. Causes et conséquences du réchauffement climatique dans le domaine de transition climatique

Le réchauffement climatique est causé par un ensemble de facteurs naturels et anthropiques. En effet, les gaz à effet de serre proviennent essentiellement des activités humaines notamment l'agriculture et l'élevage qui sont les principales activités économiques des populations. En effet, la dégradation progressive de la couverture végétale par ces activités constitue un facteur de destruction des puits de carbone. De même, l'accroissement du cheptel bovin avec environ 106289 têtes de bœufs en moyenne entre 2011 et 2015 a renforcé le taux du réchauffement climatique. A cela s'ajoute la consommation des combustibles fossiles notamment le charbon de bois (245 tonnes par semaine) et les bois de chauffe qui constituent de grandes sources d'émission de dioxyde de carbone (CO_2). Selon ABE, (1998), la consommation du bois de feu

est en moyenne de 1,2 kg/personne/jour. Ainsi, la consommation en bois de feu dans le domaine de transition climatique a été estimée à 314 255 tonnes en 2013. Il y a également la recrudescence des feux de végétation en saison sèche. Cela participe à la modification de la composition chimique de l'atmosphère par conséquence contribué au renforcement de la température de la surface terrestre.

Dans le domaine de transition climatique, les conséquences du réchauffement climatique (Tab.2) sont liées aux modifications mensuelles et saisonnières des températures et des précipitations.

Tableau 2. Conséquences du réchauffement climatique dans le domaine du climat de transition

Conséquences	
Négative	**Positive**
Diminution du nombre d'événement pluvieux et les températures de plus en plus élevées ; sécheresse précoce due à la hausse des températures ; perturbation du système humain (situation d'inconfort des individus) ; tarissement précoce de plusieurs points d'eau ; augmentation des besoins en eau ; diminution importante des ressources en eaux de surface et baisse progressive des rendements agricoles.	Découvertes de nouvelles ressources énergétiques ; Développement de nouvelles cultures adoptées aux températures plus élevées.

Le réchauffement climatique a des conséquences (Tab.2) qui peuvent être qualifiées de positives. Mais, les incidences négatives sont plus importantes que celles positives.

3. Discussion

L'étude sur le réchauffement climatique dans le domaine du climat de transition montre une hausse des températures minimale, moyenne et maximale. Les principales tendances observées sont à un taux de 0,03°C/an à 0,5°C avec une moyenne qui évolue de 0,04°C/an en période sèche et entre 0,02°C et 0,03°C en saison humide entre 1971 et 2015. La période la plus chaude de la série est entre 1988 à 2015 où la température moyenne annuelle est passée de 27,58°C à 28,85°C. Cela confirme les études de Jones (2013) et Ozer et Djaby (2015) selon qui, en Afrique de l'Ouest, les années plus chaudes depuis 1850 ont été observées au cours des douze dernières années (1998-2012). Au Bénin, plusieurs études (Boko, 1988, Afouda, 1990, Houdénou, 1999, Amoussou, 2010, Totin, 2010, Adigbegnon *et al*., 2017) ont mis en évidence une augmentation de la température moyenne dans les différentes régions.

Dans le domaine de transition climatique, les études menées par Chedé (2012); Vissin (2013) et Adigbegnon *et al.* (2018) ont confirmé le réchauffement thermique. Avec une température moyenne qui a varié entre 26°C et 28°C entre 1971 et 2015, le réchauffement climatique entraînerait d'énormes conséquences sur les ressources naturelles et la vie humaine. L'augmentation de la température (0,03°C/an) entraînerait des modifications sur les ressources et activités des populations de la zone de transition climatique. Cela a été confirmé par Ogouwale (2006), Agossou et Medeou (2007) qui ont montré qu'une augmentation des températures pourrait avoir des conséquences sur les ressources en eau, la production agricole et l'élevage.

Conclusion

Cette étude a montré que de 26-27°C dans les années 1970-1980, la température moyenne a atteint 28°C dans les années 2000 avec un taux de 0,03°C/an. Les températures maximales ont varié de 31-32°C à 33-34°C respectivement avant et après 2000 suivant un taux d'augmentation de 0,03°C/an. Les minima de 21-22°C sont passés à 23°C à un rythme de 0,02°C/an.

Mais l'émission des gaz à effet de serre par les activités humaines notamment l'agriculture, l'élevage de gros de bétails en particulier, les feux de végétation pourrait être à l'origine du

réchauffement climatique observé dans le secteur. Cependant, ce réchauffement n'est pas sans conséquences sur les systèmes biophysiques et humains.

Bibliographie

Agence Béninoise pour l'Environnement (ABE), 1998. *Profil institutionnel de l'environnement au Bénin*. UNITAR, Cotonou, Bénin, 141 p.

Adigbegnon M., Bamisso R., Totin V. S. H., Amoussou E., Houndenou C, Boko M., 2017. Facteurs climatiques et anthropiques de la désertification dans le centre du Benin (commune de Ouesse). Dossiers Société Environnement Développement. La revue scientifique - *Les cahiers du CBRST*, N°11, Cotonou, Bénin, 362-390.

Adigbegnon M., Totin V.S. H., Amoussou E., Houndenou C., Boko M., 2018. Facteurs climatiques et anthropiques de la désertification dans le domaine du climat de transition au Bénin in les échelles spatiales et temporelles fines. *Acte du XXXI^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Nice, 4-7 juillet 2018, Éditeur scientifique NICOLAS Martin, UMR 7300 ESPACE (CNRS / Université de Nice Sophia Antipolis), 50-55.

Afouda F., 1990. *L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural et la savane africaines*. Thèse de Doctorat, Université de Paris IV(Sorbonne), France, 428p.

Amoussou E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du Bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Docteur de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 315p.

Agossou G. et Medeou K. F., 2007. *Etude sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans le secteur de l'agriculture et des ressources en eau*. Rapport final, Projet de Préparation du Bénin à l'accès au FondsVert pour le Climat (PPB-FVC), Termes de référence 8, Cotonou, Bénin, 100p.

Boko M., 1988. *Climat et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 608p.

Chédé D. F., 2012. *Vulnérabilité et stratégies d'adaptation au changement climatique des paysans du Département des Collines au Bénin : cas de la Commune de Savè*. Mémoire de Master en Changement Climatique et Développement Durable, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 86 p.

Djaby B. et Ozer P., 2015. *Evaluation des émissions de méthane imputables au secteur agricole en Afrique de l'ouest (1961-2050)*. Cours-Angers, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement Université de Liège, Belgique.

GIEC, 2007. Bilan 2007, des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, Suisse, 103p.

GIEC, 2014. Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer], GIEC, Genève, Suisse, 161p.

INSAE, 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du département des collines. Rapport final, Cotonou, Bénin, 85p.

Ogouwalé E., 2006. *Changement climatique dans le Bénin méridional et central : Indicateurs, scénarios et prospectives de la sécurité alimentaire*. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey Calavi, Bénin, 302p.

Ouédraogo M., 2012. Impact des changements climatiques sur les revenus agricoles au Burkina Faso. *Journal of Agriculture and Environment for International Development – JAEID*, 2012, 106 (1): 3 – 21.

PANA-Benin, 2007. Programme d'action National d'Adaptation aux changements climatiques du Bénin. Rapport d'étude, Cotonou, Bénin, 81p. [en ligne] consulté le 02/octobre 2016, URL : http://www.météo-bénin.net.

Totin V. S. H., 2010. *Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et au mode d'exploitation. Stratégie de gestion durable*. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey Calavi, Cotonou, Bénin, 283p.

Vissin W. E., 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du basin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 285p.

PERCEPTIONS LOCALES DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PLANTATIONS D'*ACACIA AURICULIFORMIS* DE OUÈDO ET PAHOU AU SUD DU BÉNIN

ALI R.K.F.M.

Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale, Faculté des Sciences Humaines et Sociales (FASHS-Adjarra), Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, ali.rachad@yahoo.fr

Résumé : *L'ampleur des risques induits par les changements climatiques sur la productivité forestière est importante. L'objectif de cette recherche est d'analyser les perceptions des riverains des plantations d'Acacia auriculiformis de Ouèdo et de Pahou sur les indicateurs des changements climatiques. Pour y arriver, 205 riverains ayant au moins 10 ans d'expériences ont été enquêtés. La plupart des enquêtés (91 %) ont signalé une augmentation de la température, une diminution de la pluviométrie, une fréquence de vents violents et des taux élevés de regarnissage. La réduction de la quantité de pluie, les vents violents et les températures élevées sont les principaux facteurs identifiés par les enquêtés comme affectant la survie de l'espèce. Face à ces situations climatiques, les communautés se confient à Dieu.*

Mots clés : *changements climatiques ; perceptions ; Acacia auriculiformis ; stratégies d'adaptation ; Bénin*

Summary: ***Local perceptions of the effects of climate change on* Acacia Auriculiformis *plantations of Ouedo and Pahu in southern Benin.*** *The magnitude of the risks induced by climate change to forest productivity is significant. The aim of this research is to analyze the perception of residents in the Acacia auriculiformis plantations located in Ouèdo and Pahou, on indicators of climate changes. To achieve this, 205 residents with at least 10 years of experience were surveyed. The most of the respondents (91%) reported an increase in temperature, a decrease in rainfall, a frequency of strong winds and high relining rates. Reduced rainfall, high winds and high temperatures were the main factors identified by respondents as affecting the survival of the species. In the face of these climatic situations, communities confide in God.*

Keywords *: climate changes ; perceptions ; Acacia auriculiformis ; strategies of adaptation ; Benin*

Introduction

Les experts du GIEC (2007) se sont accordés à prédire des changements climatiques majeurs dans les prochaines décennies, en conséquence de l'augmentation des gaz à effet de serre. Le Bénin n'échappe pas à cette situation. En effet, le Bénin connaît depuis plus de 40 ans de fortes variabilités climatiques caractérisées par une fluctuation de la période et de la durée des précipitations, une variation de la pluviométrie annuelle, un climat de plus en plus chaud, la sécheresse, la dégradation des sols, des inondations inattendues, des vents violents et la prolifération des maladies et ravageurs (Yabi et Afouda, 2012). Les changements climatiques observés ces dernières années au Bénin, se caractérisent par des poches de sécheresse, le retard dans l'installation des pluies, des inondations, des vents violents avec pour conséquence la chute des rendements des cultures en général (Bello *et al.*, 2017). Les plantations d'Acacia *auriculiformis* au Sud du Bénin n'échappent pas à cette situation liée aux changements climatiques. La plantation forestière est une des pratiques sylvicoles communément choisies en aménagement forestier afin de faire face à la demande croissante de matière ligneuse tout en limitant les pressions anthropiques sur les forêts naturelles afin d'atténuer les changements climatiques. Les mesures d'adaptation les plus efficaces et durables sont souvent celles prises à l'échelle locale par les personnes concernées (Bello *et al.*, 2017). Les pratiques d'adaptation développées par les sylviculteurs en réponse aux conséquences négatives des changements climatiques dépendent de la perception et des connaissances endogènes qu'ils ont de ces changements (Dimon, 2008). La présente recherche vise à analyser les perceptions des sylviculteurs des effets des changements climatiques sur *Acacia auriculiformis* et à identifier les stratégies développées par ceux-ci pour mitiger lesdits effets.

1. Matériel et méthodes

1.1. Milieu d'étude

Géographiquement, la forêt de Ouèdo est située entre 6°30' et 6°32' latitude nord et 2°16' et 2°17' longitude est, avec une superficie de 580 ha. Celle de Pahou, est comprise entre les latitudes 6°22' et 6°27' nord et les longitudes 2°8' et 2°14' est avec une superficie de 765 ha. Elles appartiennent à une région soumise à un climat subéquatorial caractérisé par deux saisons pluvieuses alternant avec deux saisons sèches. La pluviométrie moyenne annuelle de la région calculée sur la période de 1985 à 2016 est de 1147 mm. Deux types de sols sont rencontrés à Pahou : les terres de barre et les sables littoraux.

Quant à la forêt classée de Ouèdo, elle repose entièrement sur des sols ferralitiques faiblement désaturés appauvris, sur sédiment meuble argilo-sableux du continental terminal. La figure 1 présente la situation géographique de ces deux forêts dans les communes de Ouidah et d'Abomey-Calavi.

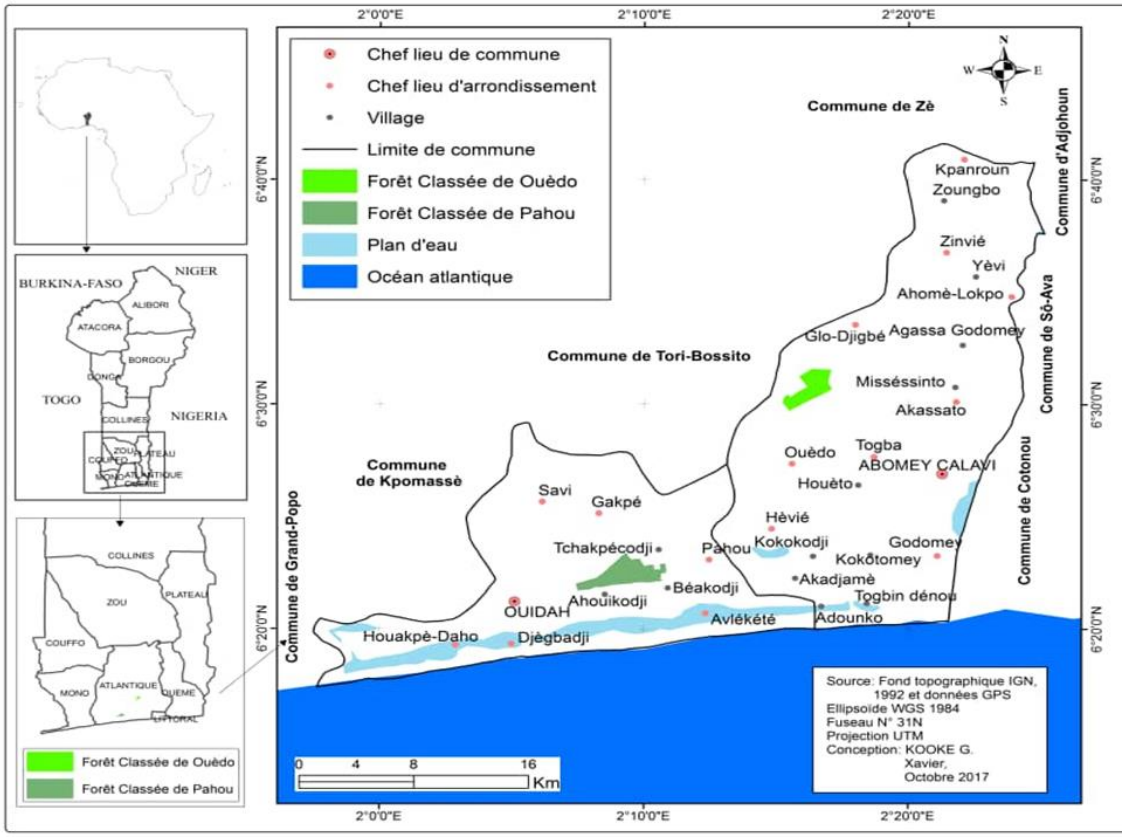


Figure 1. Situation géographique des forêts classées de Pahou et de Ouèdo au sud du Bénin

1.2. Choix des villages

Le tableau 1 renseigne sur les villages enquêtés et le nombre des enquêtés dans les communes d'Abomey-Calavi et de Ouidah, plus précisément dans les arrondissements de Pahou et Ouèdo. Dans chacun de ces arrondissements, le choix des localités d'étude (village) a été fait suivant des critères : être village riverain des forêts classées de Pahou et de Ouèdo et être concerné par la gestion participative de ces forêts. En tenant compte de ces critères, 8 villages répartis dans l'ensemble des deux arrondissements riverains aux forêts ont été considérés sur 15 villages au total. Les personnes enquêtées sont constituées des hommes et des femmes riverains aux forêts étudiées. Ces personnes répondent aux critères suivants : avoir un âge supérieur ou égal à 50 ans, avoir vécu dans le milieu ces trente dernières années, avoir au moins dix ans d'expériences dans la gestion sylvicole, continuer à participer aux activités

d'exploitation forestière. Dans chaque groupe, les sujets ont été regroupés suivant trois catégories d'âge (jeune = 0 à 49 ans ; adulte = 50 à 69 ans ; vieux 70 ans et plus) et de sexe (Assogbadjo *et al.*, 2008).

Tableau 1. Villages et nombre de personnes enquêtés par forêt

Communes	Forêt classée	Villages	Enquêtés
Abomey-Calavi	Ouèdo	Kpossidja	44
		Adjagbo	24
		Dassèkomè	20
Ouidah	Pahou	Ahouicodji	20
		Houndjava	21
		Ahozon	31
		Dékouènou	20
		Tovè 2	25

1.3. Méthode d'échantillonnage

La taille de l'échantillon (N) a été obtenue en utilisant l'approximation normale de la distribution binomiale proposée par Dagnelie (1986) :

$$\mathbf{N} = \left[\left(\mathbf{U}_{\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{2}}}\right)^{\mathbf{2}} \times \mathbf{p}(\mathbf{1}-\mathbf{p})\right] / \mathbf{d}^{\mathbf{2}}$$

où : $\mathbf{U}_{\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{2}}}$ est la valeur de la variable aléatoire normale pour la valeur de probabilité de $\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{2}}$, α étant le risque d'erreur ; pour α = 6 % (1 % ≤d ≤ 15 %), la probabilité $\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{2}}$ = 0,975 et on a $\mathbf{U}_{\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{2}}}$ = 1,96 ; p est la proportion des enquêtés ayant un âge supérieur ou égal à 50 ans avec au moins dix ans d'expériences et qui s'adonnent toujours à la gestion sylvicole dans le milieu de recherche et d est la marge d'erreur d'estimation, retenue à 6 % dans cette recherche.

A partir des valeurs de p issues des résultats de la phase exploratoire de cette recherche, au total 205 enquêtés ont été sélectionnés à raison de 108 dans l'Arrondissement de Pahou, 97 dans l'Arrondissement de Ouèdo. Ils ont été répartis en fonction de leur proximité à la forêt. Dans chaque localité, les personnes ont été identifiées selon un échantillonnage aléatoire simple.

1.4. Méthodes et outils de collecte des données

L'enquête individuelle a été faite selon la méthode décrite par Bello *et al.* (2017) et elle a concerné 205 personnes. Dans chacun des villages retenus, les données ont été collectées en utilisant les questionnaires, les enquêtes individuelles et de groupe. Les éléments collectés ont trait aux perceptions par rapport aux indicateurs des changements climatiques et les facteurs climatiques influençant les plantations et surtout les différentes stratégies développées pour atténuer leurs effets. Au total, 24 questions à dominance fermées ont été administrées aux enquêtés.

1.5. Traitement des données et analyse des résultats

Les données collectées ont été codifiées, saisies et traitées avec le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) version 20.0 (Norusis, 2002) pour la détermination des statistiques descriptives en termes de pourcentage et de moyenne. Les données quantitatives ont été ensuite soumises à une analyse de la variance (ANOVA) en utilisant la procédure PROC GLM du logiciel SAS (Statistical Analysis System) version 9.2. Les comparaisons de moyennes multiples ont été réalisées avec le test de Student Newman-Keuls (Dagnelie, 1986).

2. Résultats

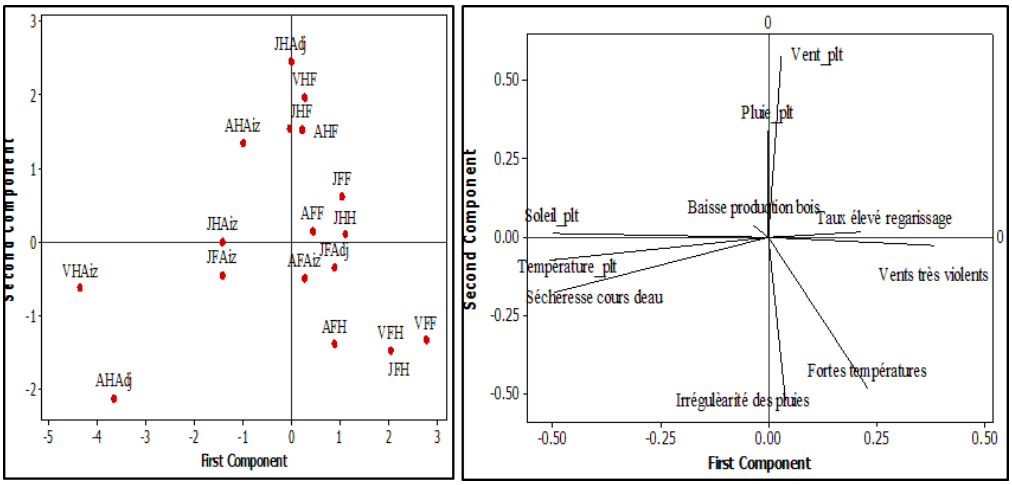
2.1. Perception des indicateurs des changements climatiques et des facteurs climatiques affectant les plantations d'Acacia auriculiformis

Les proportions des réponses liées aux indicateurs des enquêtés sur les changements climatiques et les facteurs climatiques qui affectent les plantations d'*Acacia auriculiformis* sont consignées dans le tableau 2. L'analyse indique que les perceptions locales (91 %) sont globalement unanimes à l'irrégularité des pluies, les vents violents et les forts taux de regarnissage au cours des saisons comme indicateurs de changements climatiques.

Tableau 2. Proportion de réponses liées aux indicateurs des changements climatiques et des effets des facteurs climatiques sur les plantations d'*Acacia auriculiformis* selon le groupe culturel, l'âge et le sexe. (Source : Travaux de terrain, novembre 2017)

Pourcentage de Répondants (%)									
	Indicateurs paysans des Changements climatiques					Facteurs climatiques affectant la productivité de *Acacia auriculiformis*			
Catégories	Irrégularité des pluies	Vent très violent	Forte température	Sécheresse des cours d'eau	Taux élevé de regarnissage	Pluie_plt	Température_plt	Vent_plt	Soleil_plt
Groupes culturels									
Fon	91,5	45,3	29,2	3,8	15,1	40,6	17	16	27,4
Aïzo	92,3	28,2	56,4	57,7	6,4	56,4	43,6	5,1	47,4
Adja	85,7	28,6	50	21,4	7,1	42,9	14,3	28,6	42,9
Houéda	100	57,1	71,4	100	100	42,9	100	100	100
Catégories d'âge									
Adultes	80	49,9	60	16,2	10	35,1	30	10,8	35,1
Jeunes	94,3	34,8	41,1	28,5	12	20	22,8	12,7	20
Vieux	83,8	60	43,2	10	5,4	51,3	40,5	10	36,1
Sexe									
Hommes	90	48,9	37,5	29,4	9,4	50	27,5	13,1	38,1
Femmes	97,8	35	60	11,1	15,6	35,6	22,2	8,9	24,4

Les résultats d'analyse en composantes principales effectués sur les données de perceptions ont permis de décrire les relations entre ces indicateurs de changements climatiques et d'affiner leur analyse. La première composante principale oppose les vents très violents à la sécheresse des cours d'eau (Fig.2). Ainsi, selon la perception des comités de gestion des plantations d'Acacia *auriculiformis* des zones enquêtées, les vents de plus en plus violents sont donc souvent associés à une sécheresse des cours d'eau.



Légende JFF : Jeune Femme Fon; JFAiz : Jeune Femme Aizo ; JFAdj : Jeune Femme Adja ; JFH : Jeune Femme Houéda ; JHF : Jeune Homme Fon ; JHAiz : Jeune Homme Aizo ; JHAdj : Jeune Homme Adja ; JHH : Jeune Homme Houéda ; AFF : Adulte Femme Fon ; AFAiz : Adulte Femme Aizo ; AFH : Adulte Femme Houéda ; AHF : Adulte Homme Fon ; AHAiz : Adulte Homme Aizo ; AHAdj : Adulte Homme Adja ; VFF : Vieille Femme Fon ; VFH : Vieille Femme Houéda ; VHF : Vieil Homme Fon ; VHAiz : Vieil Homme Aizo ; *Les facteurs portant plt sont ceux affectant les plantations*

Figure 2. Perceptions locales sur les changements climatiques étudiées à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) : projection des indicateurs des changements climatiques (à gauche) et des facteurs climatiques affectant les plantations d'Acacia *auriculiformis* et des groupes socio-culturels dans le système d'axes factoriels (à droite).

2.2 Stratégies paysanne d'adaptation de la production d'Acacia auriculiformis aux impacts des changements climatiques

La figure 3 présente les stratégies adoptées par les paysans pour l'adaptation aux changements climatiques.

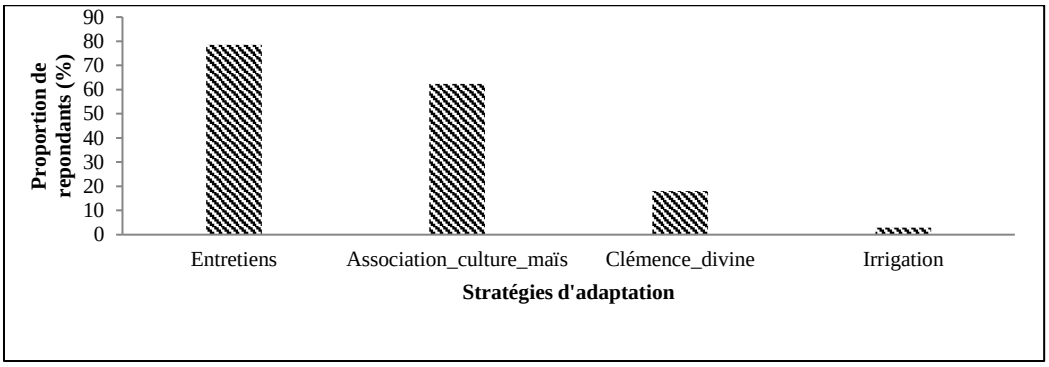
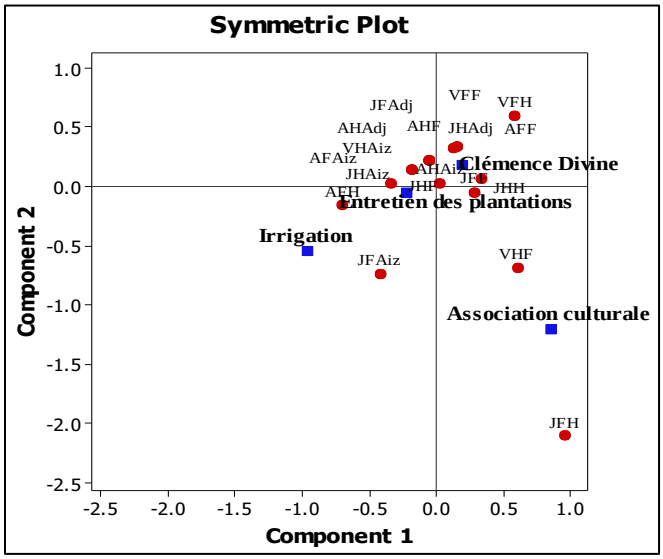


Figure 3. Stratégies d'adaptation en réponse à la variabilité des facteurs climatiques

Les résultats de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) réalisée sur les données liées à l'adaptation montre que les deux premiers axes regroupent 88,23 % de l'information totale.



Légende JFF : Jeune Femme Fon ; JFAiz : Jeune Femme Aizo ; JFAdj : Jeune Femme Adja ; JFH : Jeune Femme Houéda ; JHF : Jeune Homme Fon ; JHAiz : Jeune Homme Aizo ; JHAdj : Jeune Homme Adja ; JHH : Jeune Homme Houéda ; AFF : Adulte Femme Fon ; AFAiz : Adulte Femme Aizo ; AFH : Adulte Femme Houéda ; AHF : Adulte Homme Fon ; AHAiz : Adulte Homme Aizo ; AHAdj : Adulte Homme Adja ; VFF : Vieille Femme Fon ; VFH : Vieille Femme Houéda ; VHF : Vieil Homme Fon ; VHAiz : Vieil Homme Aizo

Figure 4. Adaptation face aux changements climatiques : projection des groupes socio-culturels dans le système d'axes factoriels à l'issue d'une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

3. Discussion

Cette recherche a révélé en général que l'irrégularité des pluies, l'élévation de la température et les vents violents, sont les principaux indicateurs de changements climatiques énumérés par les enquêtés. Plusieurs auteurs sont également parvenus à des conclusions similaires (Mertz *et al.*, 2009 ; Agossou *et al.*, 2012). Les indicateurs des changements climatiques varient en fonction de l'âge et du sexe et les vieux (âge ≥ 70 ans) semblent mieux percevoir les vents violents comme indicateurs que les adultes ont plus perçu l'augmentation de la température ambiante. Ce résultat n'est pas surprenant car Oyekale et Oladele (2012) ont montré qu'avec l'âge l'habilité à percevoir les changements climatiques augmentait. Bien que la plupart des

personnes interviewées aient noté des effets négatifs des changements climatiques sur les plantations d'Acacia *auriculiformis*, nombreux parmi eux (18 %) n'ont développé aucune stratégie adaptative, ne considèrent rien comme stratégies et préfèrent se confier à la clémence divine. Cet enseignement se rapproche de celui obtenu par Nyanga *et al.* (2011) en Zambie. Concrètement, face à la diminution pluviométrique et aux températures plus élevées conduisant à la hausse des écarts de température qui alimenteront les vents, qui, couplées avec de fortes pluies, peuvent conduire à la chute des arbres les acteurs préfèrent se confier à la clémence divine sans adopter aucune stratégie.

Conclusion

Les populations du secteur d'étude ont signalé l'irrégularité et la baisse des pluies, l'augmentation de la température et les vents violents. Hormis ces facteurs climatiques, les taux élevés de regarnissage chaque année ont également été identifiés comme indicateurs des changements climatiques. La réduction de la pluviosité, les vents violents et les températures élevées sont les principaux facteurs identifiés par les enquêtés comme affectant les plantations d'Acacia *auriculiformis*. Mais, il faut noter que malgré leur volonté à faire face à la variabilité climatique, ils ont des moyens limités et se confient à Dieu.

Bibliographie

Agossou D. S. M., Tossou C. R., Vissoh V.P., Agbossou K.E., 2012. Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles Béninois. *African Crop Science Journal*. 20, 565-588.

Assogbadjo A. E., Glèlè kakaï R., Chadare F. J., Thomson L, Kyndt T, Sinsin B, et Van Damme P., 2008. Folk classification. Perception and preferences of baobab products in West Africa: consequences for species conservation and improvement. *Economic Botany*. 62(1). 74-84.

Bello D. O., AhotonL. E., SaidouA., AkponikpèI. P.B., EzinV. A., Balogoun I., AhoN., 2017. Climate change and cashew (Anacardium occidentale L.) productivity in Benin (West Africa): perceptions and endogenous measures of adaptation. *Int. J. Biol. Chem. Sci*. 11(3), 924-946.

Dagnelie P., 1986. *Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques.* Vol 2. Les presses agronomiques de Gembloux. A.S.B.L., Belgique, 463p.

Dimon R., 2008. *Adaptation aux changements climatiques : perceptions, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles des communes de Kandi et de Banikoara au Nord du Bénin.* Thèse d'ingénieur agronome. FSA-UAC, 132p.

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103p.

Mertz O., Mbow C., Reenberg A., Diouf A., 2009. Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural Sahel. *Environmental Management*, 43, 804-816.

Norusis M.J., 2002. *SPSS 11.0 guide to data analysis*. Prentice and Hall, New Jersey, 637p.

Nyanga H., Johnsen F.H., Aune J.B., 2011. Smallholder farmers' perceptions of climate change and conservation agriculture: evidence from Zambia. *Journal of Sustainable Development*. 4(4), 73-85.

Oyekale A. S., and Oladele O. I., 2012. Determinants of climate change adaption among cocoa farmers in southwest Nigeria. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10(34), 1562-1567.

Yabi I. and Afouda F., 2012. Extreme rainfall years in Benin (West Africa). *Quaternary International*. 262(7), 39-43.

MODE D'OCCURRENCE ET D'ALTERNANCE DES EPISODES SECS ET HUMIDES DANS LE BASSIN DE LA LOBO (CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE) : APPORT DES CHAÎNES DE MARKOV

ALLECHY F.B.[1], N'GUESSAN B.V.H.[1,2], YOUAN TA M.[1,2], YAPI A.F.[1], KONE A.B.[2], AFFIAN K.[1,2]

1 Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire (fabriceallechy@gmail.com)
2 Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire (vami@outlook.com)

Résumé : *Le changement climatique observé en Côte d'Ivoire pendant les dernières décennies a beaucoup influencé le régime pluviométrique. L'objectif de ce travail est d'analyser le comportement de la pluie à travers les épisodes secs et humides basé sur les données journalières de précipitations de 1984 à 2013. La méthode des indices climatiques (ETCCDI) et des chaînes de Markov d'ordre 1 à deux états a permis respectivement le calcul des indices des jours secs consécutifs (CDD) et des jours humides consécutifs (CWD) et le mode d'occurrence et d'alternance de ces indices. Les résultats de CDD montrent une forte occurrence (57%) des épisodes secs inférieurs à 41 jours dans la moitié nord et une forte occurrence (53%) des épisodes secs inférieurs à 25 jours dans l'extrême sud du bassin. Aussi les résultats de CWD montrent-ils dans la moitié nord du bassin, une moyenne occurrence (50%) des épisodes humides supérieurs ou égaux à 26 jours dans la moitié nord du bassin et une forte occurrence (57%) des épisodes humides supérieurs ou égaux à 31 jours dans l'extrême sud.*

Mots clés *: indices climatiques ; chaînes de Markov ; Lobo ; Côte d'Ivoire*

Summary: ***Occurrence and alternation modes of dry and wet episodes in the Lobo basin (west-central of Ivory Coast): contribution of Markov chains.*** *The climate change observed in Côte d'Ivoire over the last decades has greatly influenced the rainfall regime. The objective of this work is to analyse the behaviour of rainfall through dry and wet episodes based on daily rainfall data from 1984 to 2013. The climate index method (ETCCDI) and the two-state first-order Markov chain method allowed the calculation of the indices of consecutive dry days (CDD) and consecutive wet days (CWD) and the mode of occurrence and alternation of these indices, respectively. The CDD results show a high occurrence (57%) of dry episodes less than 41 days in the northern half and a high occurrence (53%) of dry episodes less than 25 days in the extreme south of the basin. CWD results also show, in the northern half of the basin, an average occurrence (50%) of wet episodes greater than or equal to 26 days in the northern half and a high occurrence (57%) of wet episodes greater than or equal to 31 days in the extreme south of the basin.*

Key words: *climate indices ; Markov chains ; Lobo ; Côte d'Ivoire*

Introduction

Depuis ces dernières décennies, la Côte d'Ivoire est soumis aux variations climatiques (Ardoin, 2004 ; Kouakou *et al*., 2007). Le changement climatique impacte la pluviométrie de notre pays et soulève de nombreuses questions relatives aux futurs. Pour répondre à ces questions et apporter des solutions adéquates pour pallier ce problème, de nombreuses études se tournent vers la modélisation des phénomènes naturels notamment les précipitations. La modélisation de la pluviométrie à court ou moyen terme présente de nombreux intérêts. Elle permet de pouvoir mesurer l'impact les évènements climatiques, leurs durées ou intensités sur les activités (Chiquet, 2003). La technique la plus utilisée reste néanmoins celle basée sur les chaînes de Markov qui a été très largement utilisée pour l'analyse des précipitations (Liana et Elena, 2004 ; Chèze et Jourdain, 2003). Cependant, les précipitations sont l'un des paramètres météorologiques les plus difficiles à analyser à cause de leur forte variabilité spatiale et temporelle (Lazri, 2007). Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé des données observées mesurées par télédétection. En effet, ce dernier est l'un des instruments le plus utilisé de par le monde. Il permet une couverture continue des champs de précipitations dans le temps et dans l'espace et les données de précipitations sont disponibles à des échelles spatio-temporelles fines. Ce qui n'est pas le cas pour des données in situ dont le réseau de mesure n'est pas dense

et présente de sérieuses lacunes suite à la crise post-électorale qui est survenu dans le pays. L'objectif de ce travail est d'analyser le comportement de la pluie à travers les épisodes secs et humides à partir des chaines de Markov d'ordre 1 à 2 états. Ce travail s'articule autour de 2 grands axes. Il s'agira de :

- ✓ préciser l'occurrence des épisodes secs et humides au pas de temps annuel ;
- ✓ déterminer le mode d'alternance des épisodes secs et humides en fonction de leur durée.

La zone d'étude est le bassin versant de la Lobo (Fig.1). Il est situé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 6°05' et 6°55' Ouest et les latitudes 6°02' et 7°55' Nord (Fig.1). La majeure partie du bassin appartient à la région du Haut-Sassandra, le chef-lieu de région est Daloa. Selon le régime climatique, il est situé dans une zone de transition où existe le climat équatorial de transition atténué (climat baouléen) qui s'observe dans la moitié nord du bassin et le climat équatorial de transition (climat attiéen) qui s'observe dans l'extrême sud.

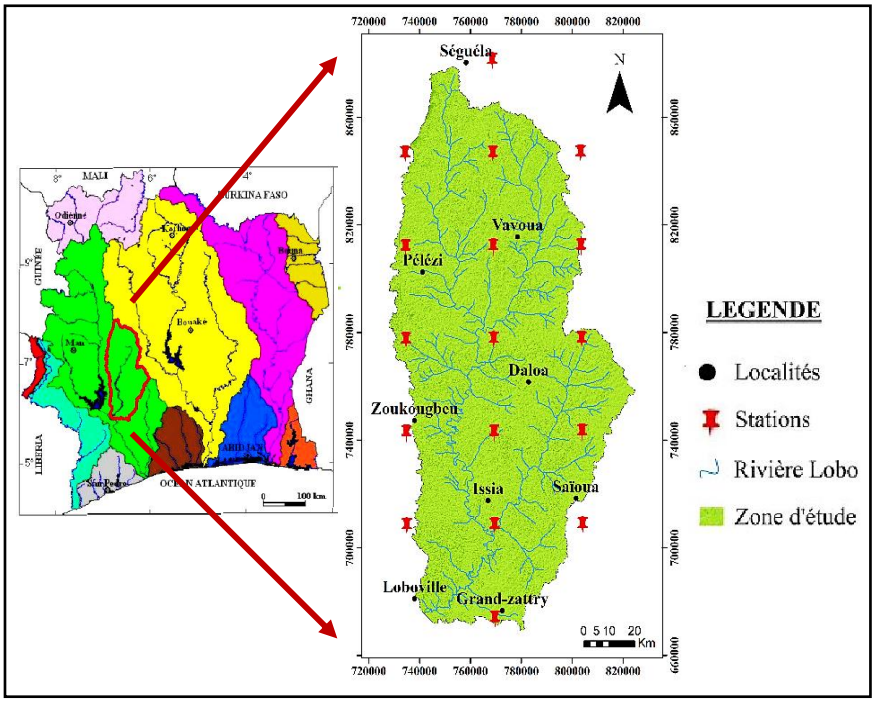


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

1. Données et Méthodes

Les données pluies de journalières de dix-sept stations sur une période de 1984 à 2013 (30 ans). Elles proviennent du centre de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR) disponible sur le site : https://globalweather.tamu.edu/#pubs. Le premier traitement réalisé sur les séries de données a consisté à vérifier leur homogénéité avec le programme informatique RHtests. Par la suite, le programme *ClimPACT 2 Master* accessible à partir du site web d'Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI) a permis de calculer les indices de durée (CDD et CWD) sous l'environnement R version 3.3. Le logiciel Matlab a servi à la modélisation markovienne d'ordre 1 à 2 états. Les chaînes de Markov sont un outil mathématique issu des probabilités et dont les domaines d'application sont aussi vastes (intelligence artificielle, génétique, météorologie, etc). Nous l'appliquons à l'échelle annuelle pour déterminer ou prévoir la probabilité d'avoir une séquence sèche après une séquence sèche ou non. Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille à l'état de l'année en cours. Les chaînes de Markov tiennent compte de la liaison entre les années successives ; en effet la pluie de l'année k dépend de l'état des années passées. Ce

modèle sera du premier ordre 1 si la pluie de l'année k ne dépend que de l'année précédente, c'est-à-dire du passé le plus proche de l'état. Il sera d'ordre 2 si la pluie de l'année k dépend des k – 1, k – 2 et même logique est suivie pour les ordres supérieurs. La modélisation markovienne pour l'étude des épisodes secs (CDD) et humides (CWD) dans le présent travail a consisté à la classification de ces épisodes obtenus à partir des valeurs des indices climatiques calculées précédemment afin de s'en servir comme données d'entrée du modèle markovien. La moyenne de CDD et CWD sur toute la période d'étude a permis de définir les états du modèle de Markov. Ainsi, états du modèle sont définis par :

- ✓ P = valeurs des indices supérieures ou égales à la moyenne (longue séquence)
- ✓ S = valeurs des indices inférieures à la moyenne (courte séquence).

2. Résultats

2.1. Occurrences et alternances des indices pluviométriques dans la moitié nord du bassin versant de la Lobo.

2.1.1. Indice des jours secs consécutifs (CDD)

- **Etats du modèle de Markov**

Les états du modèle de Markov et les probabilités d'occurrences des épisodes secs consécutifs sont présentés par le tableau 1 et la figure 2.

Tableau 1. Probabilité d'occurrence des épisodes secs suivant leur longueur dans le nord du bassin de la Lobo.

Etats	*P (>= 41 jours)*	*S (< 41 jours)*
Probabilités	0,43	0,57

La longueur des épisodes secs supérieurs ou égaux à 41 jours est moins probable que celle inférieure à 41 jours.

- **Alternance des épisodes secs**

La probabilité qu'un épisode sec supérieur ou égal à 41 jours soit précédé d'un épisode sec de moins de 41 jours est relativement faible (44%). La probabilité d'avoir deux épisodes secs de moins de 41 jours qui se succèdent est élevée (56%). Il est probable aussi d'avoir un épisode sec de moins de 41 jours précédé d'un épisode sec supérieur ou égal à 41 jours (54%). Par contre, la probabilité d'avoir deux épisodes secs supérieurs ou égaux à 41 jours qui se suivent est relativement faible (46%).

	P	S
P	0,46	0,54
S	0,44	0,56

Figure 2**.** Matrice de transition des épisodes secs dans le nord du bassin versant de la Lobo de 1984 à 2013

2.1.2. Indice des jours pluvieux consécutifs (CWD)

Les états du modèle de Markov et les probabilités d'occurrences des épisodes secs consécutifs sont présentés par le tableau 2 et la figure 3.

Tableau 2. Probabilité d'occurrence des épisodes secs suivant leur longueur dans le nord du bassin de la Lobo.

Etats	*P (>= 26 jours)*	*S (< 26 jours)*
Probabilités	0,5	0,5

La probabilité de la longueur des épisodes humides supérieurs ou égaux à 26 et celle des épisodes humides inférieurs à 26 jours sont similaires.

- **Alternance des épisodes humides**

La probabilité d'avoir un épisode humide supérieur ou égale à 26 jours précédé d'un épisode humide de moins de 26 jours est moins importante (20%). La probabilité d'avoir un épisode humide supérieur ou égal à 26 jours suivi d'un épisode humide inférieur à 26 jours est aussi moins importante (21%). Cependant la probabilité d'avoir deux épisodes humides de moins de 26 jours qui se suivent et celle d'avoir deux épisodes humides supérieur ou égaux à 26 jours qui se succèdent sont respectivement très importante de 80% et 79%.

	P	S
P	0,79	0,21
S	0,20	0,80

Figure 3**.** Matrice de transition des épisodes humides dans le nord du bassin de la Lobo 1984 à 2013

2.2. Occurrences et alternances des indices pluviométriques dans l'extrême sud du bassin versant de la Lobo.

2.2.1. Indice des jours secs consécutifs (CDD)

Le tableau 3 et la figure 4 présentent les états du modèle de Markov et les probabilités d'occurrences des épisodes secs consécutifs.

Tableau 3. Probabilité d'occurrence des épisodes secs consécutifs dans l'extrême sud du bassin de la Lobo.

Etats	*P (>= 25 jours)*	*S (< 25 jours)*
Probabilités	0,47	0,53

Les épisodes secs supérieurs ou égaux à 25 jours sont moins probables que les épisodes secs inférieurs à 25 jours dans l'extrêmes sud du bassin.

- **Alternance des épisodes secs**

La probabilité est relativement faible (46%) si les épisodes secs supérieurs ou égaux à 25 jours se succèdent. Si les épisodes secs sont inférieurs à 25 jours, la probabilité d'avoir des épisodes secs supérieurs ou égaux à 25 jours est 50%. La probabilité est également 50% pour des épisodes secs inférieurs à 25 jours qui se succèdent. Par contre la probabilité est plus élevée (54%) si les épisodes secs supérieurs ou égaux à 25 jours sont suivis par les épisodes secs inférieurs à 25 jours.

	P	S
P	0,46	0,54
S	0,50	0,50

Figure 4**.** Matrice de transition des épisodes secs dans l'extrême sud du bassin de la Lobo de 1984 à 2013

2.2.2. Indice des jours pluvieux consécutifs (CWD)

Le tableau 4 et la figure 5 présentent les états du modèle de Markov et les probabilités d'occurrences des épisodes humides consécutifs.

Tableau 4. Probabilité d'occurrence des épisodes humides dans l'extrême sud du bassin de la Lobo.

Etats	*P (>= 31 jours)*	*S (< 31 jours)*
Probabilités	0,57	0,43

La probabilité d'avoir les épisodes humides supérieurs ou égaux à 31 jours est plus élevée que celle d'avoir les épisodes humides inférieurs à 31 jours.

- **Alternance des épisodes humides**

La probabilité d'avoir des épisodes humides supérieurs ou égaux à 31 jours qui se succèdent est très élevée (81%). Celle de rencontrer des épisodes humides inférieurs à 31 jours qui se suivent est également élevée (77%). Cependant la probabilité d'avoir des épisodes humides inférieurs à 31 jours après des épisodes humides supérieurs à 31 jours est faible (19%). Il est aussi moins probable (23%) d'avoir des épisodes humides inférieurs à 31 jours suivis des épisodes humides supérieurs ou égaux à 31 jours.

	P	S
P	0,81	0,19
S	0,23	0,77

Figure 5. Matrice de transition des épisodes humides dans l'extrême sud du bassin de la Lobo de 1984 à 2013

Conclusion et Discussion

La présente étude a permis de mettre en lumière les occurrences et les alternances des épisodes secs et humides suivant leur longueur dans le bassin de la Lobo. Il ressort de cette étude que les données de pluies journalières provenant du CFSR utilisées dans ce travail, sont aussi bonnes que les mesures d'une station météorologique comme l'ont montré les travaux de Fuka *et al.,* 2013. Plusieurs études effectuées avec les données CFSR, ont indiqué leur validité (Najafi *et al.,* 2012 ; Dile et Srinivasan, 2014). L'approche méthodologique de cette étude s'est basée sur la méthode des indices climatiques proposée par ETCCDI de OMM et les modèles probabilistes pour le calcul des indices et leur occurrence et alternance. Ces indices décrivent les caractéristiques particulières des extrêmes pluviométriques, y compris la durée, la fréquence, l'amplitude et la persistance des évènements pluvieux. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs (New *et al.,* 2006 ; Aguilar *et al.,* 2009 ; Hountondji *et al*., 2011 ; N'Guessan bi, 2014). Le modèle probabiliste utilisé pour décrire les différents épisodes a largement aussi été utilisé dans plusieurs travaux (Topalogu, 2002 ; Tolika et Maheras, 2005 ; Guessan bi *et al.,* 2018). Le comportement de la longueur maximale des épisodes secs (CDD) et humides (CWD), au pas de temps annuel est bien décrit par les chaînes de Markov d'ordre 1 à 2 états dans cette étude. Deka *et al.* (2010) ont montré dans leurs travaux au nord-est de l'Inde que les modèles de Markov décrivent correctement la distribution des longueurs des épisodes humides à l'aide des données journalières. Ray *et al.* (2018) ont utilisé un modèle Markov à deux états pour décrire l'occurrence et l'alternance des épisodes secs et humides à l'échelle hebdomadaire. Nos travaux révèlent que la moitié nord du bassin est marquée par une forte occurrence (57%) des épisodes secs inférieurs à 41 jours et une occurrence moyenne (50%) des épisodes humides supérieurs ou égaux à 26 jours. Quant à l'extrême sud, elle est caractérisée

par une forte occurrence des épisodes secs inférieurs à 25 jours (53%) et une forte occurrence des épisodes humides supérieurs ou égaux à 31 jours (57%).

Remerciements

Les auteurs remercient le Laboratoire Mixte Internationale (LMI) Nexus Eau-Climat-agriculture-Energie pour son aide financière apportée pour la réalisation de cette étude.

Bibliographie

Aguilar A., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Mbah J., Mhanda A., Do Nascimento D.J., Peterson T.C., Thamba Umba, O., Tomou M. and Zhang X., 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of geophysical research*, 114, DO2115. doi: 10.1029/2008JDO11010.

Ardoin B.S., 2004. *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 330p.

Cheze I.,et Jourdains S., 2003. Calcul des quantiles de données de retour de la température par la méthode gev. Calcul des températures à risque. *Météo France*, DP/SERV/BEC, Toulouse, France, 1-50.

Chiquet J., 2003. *Estimation des températures journalières à l'aide des techniques markoviennes.* Mémoire de DEA TIS, Université de Technologie de Compiègne- Gaz de France.

Dile, Y. T., R. Srinivasan,. 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 1-16.

Fuka, D.R., C.A. MacAllister, A.T. Degaetano, and Z.M. Easton., 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis dataset to improve weather input data for watershed models. *Hydrol. Proc.* doi: 10.1002/hyp.10073.

Hountondji, Y.C., De Longueville, F., Ozer, P., 2011. Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change*, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. URL: http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112 (April 19, 2016).

Lazri M, Ameur S. et Haddad B., 2007. Analyse De Données De Précipitations Par Approche Markovienne. *Larhyss Journal*, N°6, Décembre,7-20.

Liana C., et Elena C., 2004. Evaluation of the transition probabilities for daily precipitation time series using a Markov chain model. The 3rd International Colloquium Mathematics in Engineering and Numerical Physics, Oct 7-9, Bucharest, Romania, 82-89.

Najafi, M.R., H. Moradkhani, and T.C. Piechota., 2012. Ensemble Streamflow Prediction: Climate Signal Weighting Methods vs. Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Hydrology*, 442-443

Kouakou, K.E., Goula, B.T.A. and Savané, I., 2007. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, 16 (1), 31-43

New, M., Todd, M., Hulme, M. and Jones, P., 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), Troisième conférence mondiale sur le climat, Nouvelles du climat mondial, 34, janvier, www.wmo.ch (April 19, 2016). 1889-1922.

N'Guessan bi V. H., 2014. *Modélisation markovienne du champ de précipitations et du mode d'occupation du sol pour une prévision du risque d'inondation à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) : cas du département de Sinfra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse Unique de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 194p.

Ray M. S., S. Biswasi S., Sahoo K. C. and H. Patro H., 2018. A Markov Chain approach for wet and dry spell and probability. *Analysis International Journal of current microbiology and applied sciences*. ISSN 2319-7692 Special Issue-6, 1005-1013.

COMPREHENSION DU MICRO-CLIMAT URBAIN LYONNAIS PAR L'INTEGRATION DE PREDICTEURS COMPLEMENTAIRES A DIFFERENTES ECHELLES DANS DES MODELES DE REGRESSION LINEAIRES MULTIPLES

ALONSO L., RENARD F.

UMR CNRS 5600 Environnement, Ville et Société, Université Jean Moulin Lyon III, Lyon, France (lucille.alonso@univ-lyon3.fr)

Résumé : *Face au phénomène d'îlot de chaleur urbain et d'inconfort thermique ressenti en milieu urbain, exacerbé par le changement climatique, il est nécessaire d'estimer au mieux la température de l'air en tout point d'un territoire, notamment face à la rationalisation actuelle du réseau de Météo-France. Cette étude se propose ainsi de modéliser la température de l'air, mesurée durant 4 campagnes mobiles réalisées durant les mois d'été, entre 2016 et 2019, dans Lyon par temps clair, à l'aide de régressions linéaires multiples à partir de 33 variables explicatives issues de données traditionnellement utilisées, de données issues de la télédétection par une acquisition LiDAR (Light Detection And Ranging) ou satellitaire Landsat 8. Par exemple, pour la journée du 30 août 2016, la régression linéaire multiple a expliqué 89% de la variance pour les journées d'étude, avec un RMSE moyen de seulement 0.23°C. Des variables comme la température de surface, le NDVI ou encore le MNDWI impactent fortement le modèle d'estimation.*

Mots clés : *température de l'air ; température de surface ; LiDAR, régression linéaire multiple ; Landsat 8 ; îlot de chaleur urbain*

Summary: ***Understanding the Lyon urban micro-climate by integrating complementary predictors at different scales in multiple linear regression models.*** *Confronted with the urban heat island phenomenon and the thermal discomfort felt in urban areas, exacerbated by climate change, it is necessary to estimate as accurately as possible the air temperature at any point in a territory, particularly in view of the current rationalisation of the Météo-France network. This study thus proposes to model the air temperature measured during 4 mobile campaigns carried out during the summer months, between 2016 and 2019 in Lyon in clear weather conditions, using multiple linear regressions based on 33 explanatory variables from traditionally used data, data from remote sensing by LiDAR (Light Detection And Ranging) or Landsat 8 satellite acquisition. For example, for the day of August 30, 2016, multiple linear regression explained 89% of the variance for the study days, with a mean RMSE of only 0.23°C. Variables such as surface temperature, NDVI or MNDWI have a strong impact on the estimation model.*

Key words: *air temperature; surface temperature; LiDAR; multiple linear regression; Landsat 8; urban heat island*

Introduction

Le processus d'urbanisation croissant de la population a un impact significatif sur le changement climatique et conduit à un réchauffement des températures en milieu urbain (Chapman *et al.* 2017). Par ailleurs, l'augmentation des vagues de chaleurs est nettement démontrée, que ce soit lorsque l'on s'intéresse à la durée, l'intensité ou la fréquence (Meehl and Tebaldi 2004). En outre, les effets des canicules viennent se superposer aux caractéristiques microclimatiques des milieux urbains (Fallmann, Forkel, and Emeis 2016). Ces phénomènes ont notamment pour conséquence une augmentation du nombre prématuré de décès liés au stress thermique (Bobb *et al.* 2014). En ce sens, les acteurs publics locaux tentent de prévenir et de réduire les risques humains potentiellement générés par une augmentation des vagues de chaleur. Par ailleurs, la compréhension des modèles de température de l'air est essentielle pour de multiples applications dans les domaines de l'agriculture, de l'hydrologie, de l'aménagement du territoire ou de la santé publique. Elle passe inévitablement par une meilleure connaissance de l'ICU en milieu urbain, en combinant mesures et modélisation. Cette étude s'inscrit dans cette thématique grâce à une modélisation de la température de l'air, à l'heure la plus chaude de la journée, en zones urbaines dense sur la Métropole de Lyon (France) par l'utilisation combinée de données traditionnellement utilisées, de données issues de la télédétection par une acquisition LiDAR (*Light Detection And Ranging*) ou satellitaire Landsat 8 et de données

produites par la mesure à vélo. Ces dernières s'avèrent être d'un grand recours puisqu'il n'existe pas aujourd'hui sur Lyon, et dans la plupart des grandes agglomérations, de réseaux de stations météorologiques fixes suffisamment déployés en centre-urbain. La connaissance précise des températures est une nécessité tant pour l'environnement que pour les politiques de santé, en particulier dans les zones urbaines. Cette connaissance dépend directement de la densité du réseau de mesure. De multiples études ont étudié cette question, par des interpolations spatiales classiques (déterministes (Wang *et al.* 2017) ou stochastiques (Zhang and Du 2019) ou des régressions multiples (Chen *et al.* 2016).

1. Données et Méthodes

1.1. Lyon : une zone d'étude marquée par une forte diversité morphologique

La zone d'intérêt choisie dans le cadre de cette étude est le cœur urbain de la ville de Lyon ainsi qu'une partie de la ville de Villeurbanne, à la frontière avec le 6ème arrondissement de Lyon. Ce territoire présente l'intérêt de regrouper une importante diversité d'occupation du sol en milieu urbain. Il est majoritairement occupé par du tissu urbain continu (50%) et du tissu urbain dense discontinu (12,3%), ainsi que par des unités industrielles, commerciales, militaire ou publiques (13,8%).

Les mesures de la température de l'air (Fig.1) ont été effectuées lors des jours de passage du satellite Landsat 8 au-dessus de la métropole, par temps clair uniquement. Ces campagnes s'échelonnent entre 2016 et 2018, exclusivement sur la période estivale avec des conditions météorologiques similaires : le 30 août 2016, le 1er août 2017, 19 juillet 2018 et le 22 juillet 2019 (Tab.1).

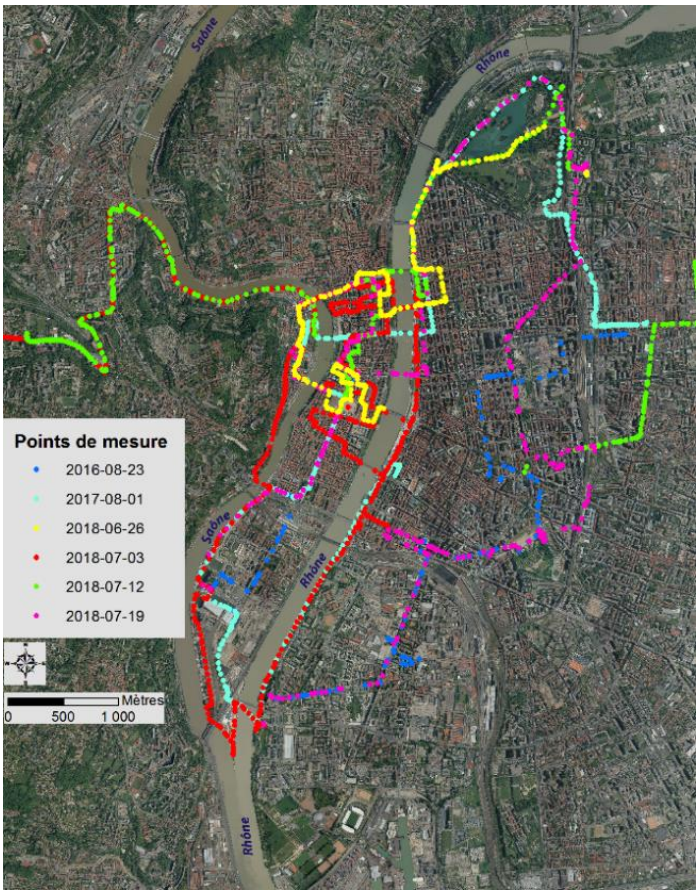


Figure 1. Localisation des mesures mobiles effectuées entre 2016 et 2019 sur la ville de Lyon (Source : Data Grand Lyon)

Tableau 1. Paramètres météorologiques (à 12h à la station Lyon-Bron) et heures d'enregistrement des différentes campagnes de mesures mobiles de la température de l'air

	Début d'enregistrement	Fin d'enregistrement	Température (°C)	Humidité (%)	Vitesse du vent (m/s)	Pression (hPa)	Direction du vent (degrés)
30/08/16	14h30	17h00	27,7	46	9	1017,8	350
01/08/17	15h30	17h00	29,4	52	10	1012,2	34
19/07/18	12h30	14h45	29,8	42	5	1014,2	309
22/07/19	12h30	15h30	30,1	41	11	1022	10

1.2. La donnée récoltée : la précision des appareils de mesure

La température de l'air est obtenue à partir de transects de mesures mobiles à l'aide d'appareils de mesure de très bonne précision et comparés à la station Lyon-Bron de Météo-France. Le premier matériel utilisé est le EL-USB-1-RGC, qui mesure la température de l'air en continu, avec une précision de +/- 1°C et un intervalle d'enregistrement minimum de 1 seconde. Le second équipement, LOG 32, enregistre l'humidité relative et la température de l'air, avec une précision de +/- 0,5°C et de +/- 3 % (de 40 à 60%) et un intervalle d'enregistrement minimum 2 secondes. Les campagnes de mesure ont été associées à un GPS de précision (récepteur GPS/GLONASS haute sensibilité et antenne Quad Helix).

1.3. Les descripteurs morphologiques intervenant dans l'estimation de la température de l'air

Trente-trois variables explicatives, issues de la littérature scientifique, contribuent à estimer la température de l'air sur la zone d'étude (Chen *et al.* 2006 ; Liu and Zhang 2011 ; Nguyen *et al.* 2016). Elles appartiennent à diverses catégories telles que des paramètres météorologiques issus de la télédétection, des variables topographiques, des indices de végétation, de la présence d'eau, d'humidité, de sol nu, de bâti, de rayonnement, de morphologie urbaine ou encore de proximité à diverses occupations du sol (Tab.2). Les sources d'acquisition sont multiples et proviennent du satellite Landsat 8, de points LiDAR et d'autres produits cartographiques téléchargés depuis la plateforme d'open data du Grand Lyon.

Tableau 2. Liste des descripteurs morphologiques intervenant dans l'estimation de la température de l'air

	Variables	Source d'acquisition	Echelle d'analyse		Variables	Source d'acquisition	Echelle d'analyse
Données climatiques issues de la télédétection	Températures de surface (°C)	Landsat 8	500m	**Indice de bâti**	NDBI *Normalized Difference Built-Up Index*	Landsat 8	1000m
	Durée d'ensoleillement de la journée d'étude (h)	Modélisée d'après les données d'ESRI ARCGIS	Ponctuel		UI *Urban Index*	Landsat 8	1000m
	Radiation reçue pour la journée d'étude (WH/m²)	Modélisée d'après les données d'ESRI ARCGIS	Ponctuel		IBI *Index-based Built-Up Index*	Landsat 8	500m
Indices de végétation	NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*	Landsat 8	1000m		Densité de bâti	LiDAR	5m
	Tasseled cap greeness (GVI)	Landsat 8	1000m	**Topographiques**	Modèle numérique d'élévation	LiDAR	Centimétrique
	Densité de végétation basse	LiDAR	200m		Pente (°)	Data Grand Lyon	Centimétrique
	Densité de végétation moyenne	LiDAR	50m		Exposition	LiDAR	Centimétrique
	Densité de végétation haute	LiDAR	100m		Rugosité	Data Grand Lyon	Centimétrique
Indices de présence d'eau	MNDWI *Modified Normalized Difference Water Index*	Landsat 8	500m	**Morphologie urbaine**	Sky View Factor	LiDAR	Centimétrique
					STD Building Height	Data Grand Lyon	100m

Indice d'humidité	Tasseled cap Wetness	Landsat 8	50m	**Proximité aux occupations du sol**	Distance aux voies ferrées	Data Grand Lyon	Métrique
	NDMI *Normalized Difference Moisture Index*	Landsat 8	1000m		Distance aux zones en eau	LiDAR	100m
Indices de sol nu	NDBaI *Normalized Difference Bareness Index*	Landsat 8	1000m		Distance aux points d'intérêt touristique	Data Grand Lyon	Métrique
	BI *Bare Soil Index*	Landsat 8	50m		Distance aux stations de métros souterrains	Data Grand Lyon	Métrique
	EBBI *Enhanced Built-Up and Bareness Index*	Landsat 8	1000m		Distance aux fontaines	Data Grand Lyon	Métrique
	Densité de sol nu	LiDAR	50m				
Indice de rayonnement	Radiance spectrale	Landsat 8	1000m				
	Emissivité	Landsat 8	500m				
	Tasseled Cap Brightness	Landsat 8	1000m				

1.4. La procédure statistique suivie

Cette étude se propose ainsi de modéliser la température de l'air à l'aide de régressions linéaires multiples à partir des prédicteurs sélectionnés. Dans un premier temps, l'échelle présentant une meilleure corrélation entre température de l'air et variables explicatives est retenue pour chaque indicateur à partir d'une analyse par tampons de proximité (de 5 à 1000m ; Fig.2).

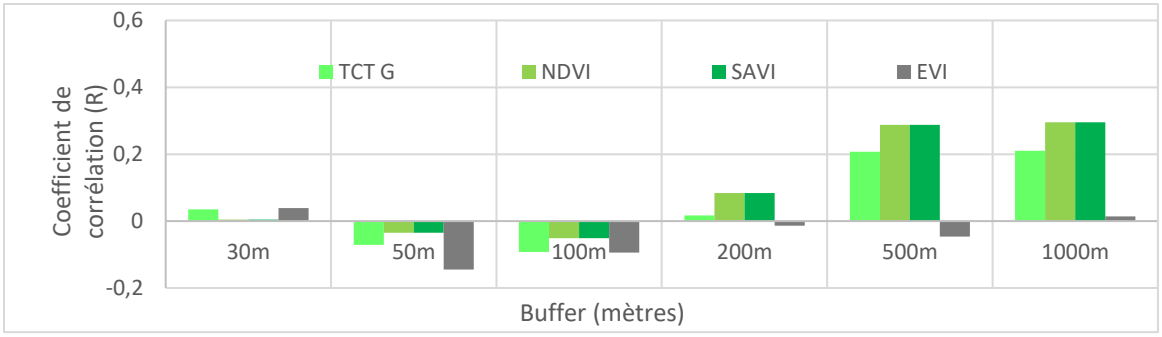


Figure 2. Exemple de variation de la corrélation entre prédicteur de végétation et température de l'air en fonction de l'échelle d'étude.

Afin de ne pas inclure les variables redondantes dans le modèle de régression, un des deux indicateurs pour lequel la paire présente un |r|>0,7 dans la matrice de corrélation de Spearman ainsi qu'un VIF > 5 a été supprimé. De plus, une validation croisée *holdout* a été réalisé en raison de sa capacité à détecter les *over-fitting* de la régression multiple (80% de données d'apprentissage, 20% de données de validation).

2. Résultats

Après avoir supprimé les variables colinéaires, pour chaque journée, les prédicteurs intervenant dans la modélisation de la température de l'air permettent d'obtenir des coefficients de détermination significatifs. Ces derniers varient de 0,60 pour le 22 juillet 2019 à 0,89 pour le 30 août 2016 avec respectivement des racines de la moyenne des carrés des erreurs (RMCE) de seulement 0,96°C et 0,23°C. Par ailleurs, chaque variable retenue dans le modèle est caractérisée par un coefficient normalisé qui correspond au poids de cette variable explicative. Ce poids varie en fonction des journées d'étude (Fig.3).

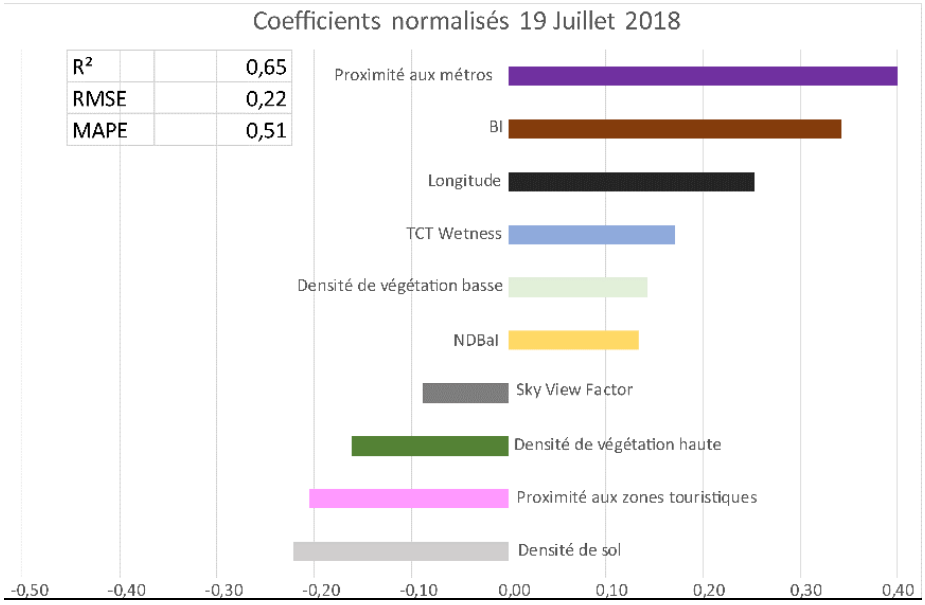


Figure 3. Poids des variables retenues pour le 19 juillet 2018

Par exemple, pour le 19 juillet 2018, les variables contribuant à avoir un impact positif sur le modèle sont la proximité aux métros, le BI, la longitude, le TCT Wetness, la densité de végétation basse et le NDBaI. Les variables intervenant négativement dans le modèle sont, quant à elles, le Sky View Factor, la densité de végétation haute, la proximité aux points d'intérêt touristiques et la densité de sol. A partir l'équation obtenue, il est ainsi possible de modéliser la température de l'air (Fig.4).

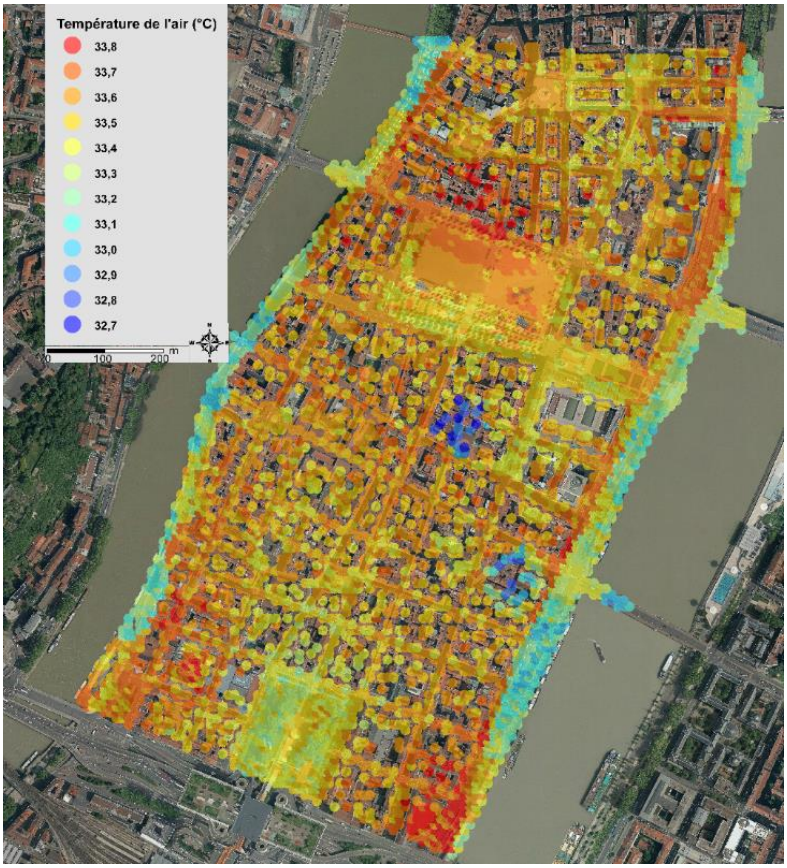


Figure 4. Modélisation de la température de l'air dans le centre urbain dense de Lyon le 19 juillet 2018 à 16h30 (Source : Data Grand Lyon)

Conclusions et Discussion

La part de la variance expliquée par régression linéaire multiple dans la modélisation des températures de l'air pour chaque journée d'étude est dans l'ensemble importante avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,6. Chaque équation ainsi obtenue n'est valable que pour une journée d'étude, cependant des variables prépondérantes sont récurrentes. Ainsi, les changements de morphologie urbaine influencent les réponses thermiques de la ville L'intégration de prédicteurs satellitaire est un avantage certain dans la modélisation du microclimat urbain par modèle de régression linéaire à partir de mesures mobiles de la température de l'air. En revanche, cette étude ne remplacera jamais un réseau de mesure au sol compact et abondant en respectant les critères de site de Météo-France ou de l'OMM.

Bibliographie

Benas N., Chrysoulakis N., and Cartalis C., 2017. Trends of Urban Surface Temperature and Heat Island Characteristics in the Mediterranean. *Theoretical and Applied Climatology,* 130(3):807–16.

Bobb J.F., Peng R.D., Bell M.L., and Dominici F., 2014. Heat-Related Mortality and Adaptation to Heat in the United States. *Environmental Health Perspectives,* 122(8):811–16.

Chapman S., Watson J.E.M., Salazar A., Thatcher M., and McAlpine C.A., 2017. The Impact of Urbanization and Climate Change on Urban Temperatures: A Systematic Review. *Landscape Ecology,* 32(10):1921–35.

Xiao-Ling C., Zhao Y.M., Li P.X., and Yin J., 2006. Remote Sensing Image-Based Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes. *Remote Sensing of Environment,* 104:133–46.

Yunhao C., Quan J., Zhan W., and Guo Z., 2016. Enhanced Statistical Estimation of Air Temperature Incorporating Nighttime Light Data. *Remote Sensing,* 8(8):656.

Fallmann J. Renate F., and Emeis S., 2016. Secondary Effects of Urban Heat Island Mitigation Measures on Air Quality. *Atmospheric Environment,* 125:199–211.

Suming J., and Sader S., 2005. Comparison of Time Series Tasseled Cap Wetness and the Normalized Difference Moisture Index in Detecting Forest Disturbances. *Remote Sensing of Environment,* 94:364–72.

Liu L., and Yuanzhi Z., 2011. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Remote Sensing,* 3(7):1535–52.

Meehl G.A., and Tebaldi C., 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science,* 305(5686):994–97.

Nguyen K.A., Liou Y.A., Li M.H., and Tran T.A., 2016. Zoning Eco-Environmental Vulnerability for Environmentalmanagement and Protection. *Ecological Indicators,* 69(2016).

Sobrino J., Jimenez-Munoz J.C., and Paolini L., 2004. Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment,* 90:434–40.

Wang M., He G., Zhang Z., Wang G., Zhang Z., Cao X., Wu Z., and Liu X., 2017. Comparison of Spatial Interpolation and Regression Analysis Models for an Estimation of Monthly Near Surface Air Temperature in China. *Remote Sensing,* 9(12):1278.

Zhang Z., and Du Q., 2019. A Bayesian Kriging Regression Method to Estimate Air Temperature Using Remote Sensing Data. *Remote Sensing,* 11(7):767.

ANALYSE COMPARÉE DES ÎLOTS DE CHALEUR DE SURFACE DIURNES ET NOCTURNES EN ENVIRONNEMENT TROPICAL CONTINENTAL ET TEMPÉRÉ OCEANIQUE

AMORIM M.C.C.T.[1], DUBREUIL V.[2]

1 São Paulo State University Júlio de Mesquita Filho, Faculty of Science and Technology (FCT/UNESP), Presidente Prudente, Brazil (margarete.amorim@unesp.br)
2 Université Rennes 2, LETG-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Rennes, France (vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)

Résumé : *Cette recherche vise à comparer et analyser les intensités des îlots de chaleur de surface urbains pendant le jour et la nuit à Presidente Prudente - Brésil et Rennes - France, villes de taille moyenne, situées respectivement en climat continental tropical et tempéré océanique. Pour cela, des cartes de température de surface ont été générées à partir d'images du satellite Landsat 8, bande 10 du canal infrarouge thermique / TIRS 1. Les résultats montrent que les îlots de chaleur de surface, avec des températures plus élevées dans les zones construites, ont été enregistrés à Presidente Prudente, de jour comme de nuit dans des conditions de températures atmosphériques maximales élevées. À Rennes, en raison des conditions climatiques plus fraîches et qui ont provoqué des précipitations dans les jours précédant la prise des images, pendant la journée, l'intensité de l'îlot de chaleur était plus faible que pendant la nuit, avec les températures les plus élevées enregistrées sur les plans d'eau (rivières et étangs).*

Mots clés : *îlots de chaleur de surface ; télédétection ; Rennes / France ; Presidente Prudente / Brésil*

Summary: ***Comparative analysis of diurnal and nocturnal surface heat islands in tropical continental and temperate oceanic environments.*** *This research aims to compare and analyze the intensities of urban surface heat islands during the day and at night in Presidente Prudente - Brazil and Rennes - France, medium-sized cities, located respectively in tropical continental and oceanic temperate climate. For this, surface temperature maps were generated from images of the Landsat 8 satellite, band 10 of the thermal infrared channel / TIRS 1. The results show that the surface heat islands, with higher temperatures in the built-up areas were recorded at Presidente Prudente, day and night under conditions of high maximum atmospheric temperatures. In Rennes, due to the cooler climatic conditions that caused precipitation in the days preceding the taking of the images, during the day, the intensity of the heat island was lower than during the night, with temperatures higher recorded on water bodies (rivers and ponds).*

Key words: *surface heat islands; remote sensing; Rennes / France; Presidente Prudente / Brazil*

Introduction

Les zones urbaines entraînent de fortes transformations du paysage naturel en raison du remplacement de la végétation par les bâtiments et de l'imperméabilisation presque complète de la surface. En plus de ces changements des états de surface, les activités humaines jouent un rôle important dans la génération de chaleur anthropique. De tels changements entraînent des modifications du bilan énergétique qui entraînent une augmentation de la température urbaine par rapport aux zones rurales. Cette augmentation de la température est connue sous le nom d'îlots de chaleur urbains (ICU) (OKE, 2017 ; AMORIM, 2000 ; AMORIM *et al.*, 2009).

Les types d'îlots de chaleur urbains sont définis en fonction des couches où les températures les plus élevées sont enregistrées (OKE, 2017), et permettent de distinguer : l'îlot de chaleur de surface, diagnostiqué par télédétection ; l'îlot de chaleur atmosphérique inférieur - couche de canopée urbaine, entre le sol et le niveau moyen des toits ; et l'îlot de chaleur de la haute atmosphère urbaine - couche limite urbaine, qui se situe au-dessus de la précédente.

Les îlots de chaleur de surface sont souvent analysés à l'aide des satellites Landsat (Land Remote Sensing Satellite) 5 et 7 en utilisant bande 6 du canal infrarouge thermique avec des résolutions spatiales de 120 et 60 mètres, respectivement et Landsat 8, utilisant les bandes 10 et 11 (infrarouge thermique / TIRS 1) avec une résolution spectrale de 10,6 - 11,19 μm et une résolution spatiale de 100 mètres, mais traitées et mises à disposition avec un pixel de 30 mètres par l'USGS (United States Geological Survey).

Ce travail vise à comparer et analyser les intensités des îlots de chaleur de surface urbains diurne et nocturne à Presidente Prudente - Brésil et Rennes - France, villes moyennes, situées respectivement en climat continental tropical et tempéré océanique. Des études d'îlots de chaleur de surface par télédétection avec des images prises pendant la journée ont déjà été menées dans des recherches antérieures dans les deux villes (AMORIM *et al.*, 2009 ; AMORIM, 2018). Cependant, les caractéristiques des températures de surface la nuit et la comparaison avec les images prises le jour dans les deux villes n'ont pas encore été étudiées.

1. Présentation des régions d'études

Presidente Prudente est situé à l'ouest de l'État de São Paulo / Brésil (22°10´ de latitude sud et 51°40´ de longitude ouest), dans une zone de transition climatique entre les systèmes tropicaux et extratropicaux connaissant une forte variabilité interannuelle. Selon Dubreuil *et al.* (2017), le climat de la région est de type Aw (climat tropical humide à saison sèche d'hiver). Les données météorologiques enregistrées pendant la période de 1969 à 2015 montrent que pendant le printemps et l'été les températures quotidiennes oscillent entre 20°C et 32°C, avec des maximales absolues proches de 40°C, ces deux saisons concentrant environ 75% des précipitations annuelles moyennes de 1300 mm (AMORIM, 2018). En automne / hiver, les températures diminuent légèrement mais restent élevées (entre 15°C et 20°C), à l'exception des épisodes d'invasions d'anticyclones polaires où les températures minimales absolues peuvent être inférieures à 0°C (-1,8°C en juillet 1975, AMORIM *et al.*, 2009 ; AMORIM, 2018).

En raison de sa situation géographique, les épisodes de fortes températures sont courants à Presidente Prudente et des îlots de chaleur de surface diurne et des îlots de chaleur atmosphérique très élevés ont été identifiés, soit, d'après la classification de Fernandez García (1996), des ICU de très grande intensité (plus de 6ºC) et dans certaines situations synoptiques supérieures à 9ºC (AMORIM et DUBREUIL, 2017).

Rennes est située sur la façade occidentale de la France à une soixantaine de kilomètres de la Manche et de l'Océan Atlantique. La station climatique de référence, située sur l'aéroport de Saint Jacques de la Lande au sud-sud-ouest de l'agglomération a pour coordonnées 48°04'06" N en Latitude et 01°44'00" O en Longitude. Le climat est de type tempéré océanique à hiver doux et été frais sans saison sèche, en moyenne (type Cfb de Köppen). Les moyennes des minimales oscillent entre 3 et 14°C de janvier à juillet tandis que les moyennes des maximales pour les mêmes mois sont de 8.7 et 24.5°C. La variabilité reste importante puisque les valeurs absolues sont de -14.7°C observé en janvier 1985 et 40.1°C atteints en juillet 2019 ! Enfin, les précipitations sont peu abondantes en volume (moyenne annuelle de 694 mm) avec un maximum d'automne hiver (plus de 70 mm en octobre et décembre) et un minimum d'été (38 mm en août).

Les études de climatologie urbaine réalisées à Rennes depuis 2004 ont permis d'observer des îlots de chaleur fréquemment supérieurs à 5°C la nuit et dont l'intensité maximale a atteint 8°C en 2011 (FOISSARD *et al.*, 2019).

2. Données et Méthodes

Le nombre de travaux qui utilisent la télédétection dans les études des îlots de chaleur urbains a considérablement augmenté ces dernières décennies. Il existe plusieurs types de démarches parmi lesquelles on peut retenir : l'analyse de l'intensité de l'îlot de chaleur dans différentes villes avec une image comme référence (MATSON *et al.*, 1978) ; l'analyse de leur intensification dans le temps, en comparant la température de surface apparente des images pour différentes années ; l'analyse du temps de réponse entre les températures de surface et la température de l'air en milieu rural et urbain ; l'analyse de l'intensité des îlots de chaleur de

surface, compte tenu des caractéristiques du terrain et de la variabilité des précipitations (AMORIM et DUBREUIL, 2017) ; et des études sur le diagnostic des îlots de chaleur de surface pendant la journée (AMORIM *et al.*, 2009; AMORIM, 2018). Peu d'études en revanche utilisent des images comparant le jour et la nuit.

Pour comparer et analyser les intensités des îlots de chaleur urbains de surface de jour et de nuit dans les deux villes situées dans des contextes climatiques différents, des cartes de température de surface ont été réalisées à partir d'images du satellite Landsat 8 (bande 10, du canal infrarouge thermique / TIRS 1). Pour Presidente Prudente, les scènes 222/05 du 25 octobre 2019 (13h22 UTC) et 104/169 du 16 novembre 2019 (01h50 UTC) ont été utilisées. Pour Rennes, les images utilisées sont celles du 14 novembre 2019 de jour (scène 202/26 acquise à 10:59 UTC) et de nuit celle du 18 novembre 2019 (scène 61/217 à 21:44 UTC).

L'analyse a été effectuée en tenant compte de l'intensité (ΔT) des îlots de chaleur de surface (et non des valeurs absolues), en raison de la grande différence thermique entre les températures nocturnes les plus basses et les températures diurnes les plus élevées (minimum de 13,1°C la nuit et maximum de 38,9°C le jour pour Presidente Prudente et un minimum de -1,7°C la nuit et un maximum de 9,7°C pour Rennes). Une telle différence dans les valeurs absolues rend d'ailleurs difficile la standardisation de la légende des couleurs des cartes.

Pour le calcul de l'intensité (ΔT) des îlots de chaleur de surface à Presidente Prudente, les différences de températures intra-urbaines ont été prises en compte par rapport aux températures moyennes dans une zone à forte densité végétale sur l'image diurne (et non pas les températures absolues les plus basses qui peuvent être des toits métalliques, JENSEN, 2009). Pour les images de Rennes (de jour comme de nuit) et pour l'image de nuit de Presidente Prudente, les valeurs absolues ont été reclassées, la température minimale de chaque scène étant fixée à zéro.

Tous les traitements des images satellites ont été réalisées avec le logiciel IDRISI-TERSET[1], en utilisant des paramètres fixes de conversion des niveaux de gris de l'image (NC) en radiance, puis en température Kelvin et enfin en degrés Celsius. : les équations de conversion et leurs paramètres ont été obtenus sur le site Web de l'USGS[2].

3. Résultats et Discussion

La comparaison des températures de surface la nuit et le jour dans deux villes aux contextes climatiques différents montre des caractéristiques proches concernant l'effet des bâtiments qui conservent les températures les plus élevées de jour comme de nuit. Les secteurs de végétation dense présentent également des comportements similaires dans les deux villes, à savoir des températures de surface plus basses pendant la journée mais se rapprochant des températures des zones construites la nuit.

Cependant, les contrastes de températures sont plus élevés (notamment le jour) à Presidente Prudente qu'à Rennes. Ceci est dû aux conditions atmosphériques dans chacune des villes : à Rennes, les images datent du mois de novembre et en raison des basses températures, typiques de cette période de l'année (Tab.1), une grande partie des feuilles des arbres sont déjà tombées, générant des températures proches des zones construites. De plus, le mois de novembre 2019 a été très pluvieux (deux fois au-dessus de la moyenne), avec des précipitations enregistrées la veille de la prise de vue de jour (11/13), un fait également responsable de la diminution des intensités des températures de surface. En effet, dans des études antérieures, des contrastes plus marqués entre les températures des zones bâties et non bâties, avaient été observés (AMORIM *et al.*, 2009 ; BARBOSA *et al.*, 2017).

[1] Idrisi est une marque déposée de *Clark University*.
[2] Site https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook, (dernier accès le 30 janvier 2020).

À Presidente Prudente, les jours de prise de vue (de jour comme de nuit) sont caractéristiques de la fin de la saison sèche qui, comme montré par Amorim (2018), laisse le sol rural sec et nu, permettant aux températures de surface d'augmenter fortement. Les secteurs boisés conservent en revanche toujours des températures de surface plus basses.

Le tableau 1 montre les données des températures de surface et de l'air, ainsi que de l'humidité relative de l'air dans les deux villes, les jours où les images satellites Landsat 8 ont été prises. Pour chaque ville, les valeurs des températures maximales et minimales de l'air sont proches pour les deux jours d'acquisition des images satellites, montrant que les situations sont assez comparables respectivement entre jour et nuit ; bien sûr, les températures observées à Presidente Prudente sont bien supérieures à celles observées à Rennes ! La différence de température de l'air entre l'heure d'acquisition de la scène de jour et celle de nuit est comparable également (5°C environ). A Rennes, l'écart entre les températures de surface et les températures de l'air sont assez faibles de jour comme de nuit. A Presidente Prudente, en revanche, les températures de surface s'élèvent fortement au-dessus des températures de l'air pendant la journée alors qu'elles restent plus proches pendant la nuit : la plus forte hauteur du soleil en cette saison et l'atmosphère moins humide de la ville brésilienne peuvent expliquer cette différence de comportement.

Tableau 1. Températures de surface (bande 10 du satellite Landsat 8) et températures et humidité relative de l'air à Presidente Prudente et Rennes pendant les jours analysés.

	Presidente Prudente				Rennes			
	25/10/2019 (jour)		16/11/2019 (nuit)		14/11/2019 (jour)		18/11/2019 (nuit)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Température de surface sur l'image LANDSAT (ºC)	26.6	38.8	13.1	23.6	3.7	9.7	-1.5	7.8
Température de l'air lors du passage du satellite (ºC)	29.7		24		7.8		2.8	
Humidité relative de l'air lors du passage du satellite (%)	45%		52%		82%		100%	
Température de l'air (ºC)	22.1	35.8	19.8	33.4	0.6	10.6	2.2	10.6
Humidité relative de l'air (%)	22%	60%	23%	100%	60%	100%	75%	100%

La figure 1 montre la variation spatiale de l'intensité des températures de surface à Presidente Prudente prise le jour (25/10/2019) et la nuit (16/11/2019) et la figure 2, celles de Rennes (la journée du 14/11/2019 et la nuit du 8/11/2019). A Presidente Prudente, les zones urbaines se distinguent par des températures plus élevées de jour comme de nuit. La chaleur relative des surfaces construites et leur contraste avec la surface végétalisée, en particulier dans l'image de jour, est bien visible. A Rennes, la différence ville-campagne apparaît surtout la nuit et est presque imperceptible pendant la journée : comme signalé plus haut, la fin de l'automne ne permet pas aux différences liées à la végétation en zone rurale de s'exprimer et, pendant la journée, les températures de surface sont assez homogènes à l'exception de certaines zones industrielles périphériques qui apparaissent légèrement plus chaudes et certains parcs intra-urbains, légèrement plus frais.

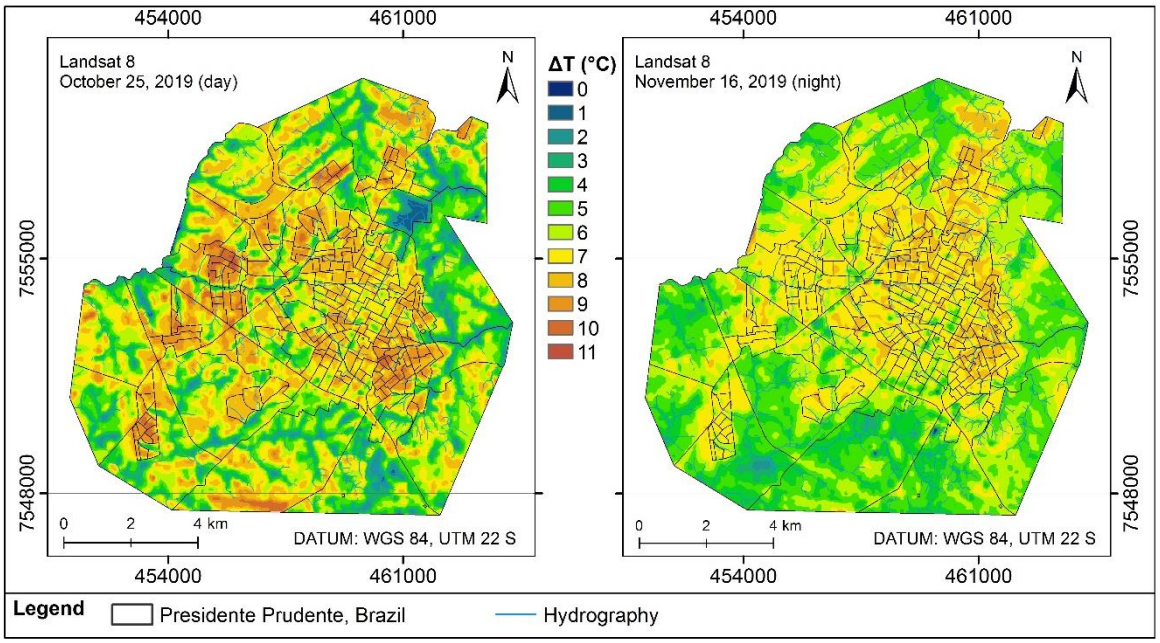


Figure 1. Intensité de l'îlot de chaleur de surface à Presidente Prudente/Brésil : journée du 25 octobre 2019 (scène Landsat 8, 222/75, canal 10) et nuit du 16 novembre 2019 (scène Landsat 8, 104/169, canal 10).

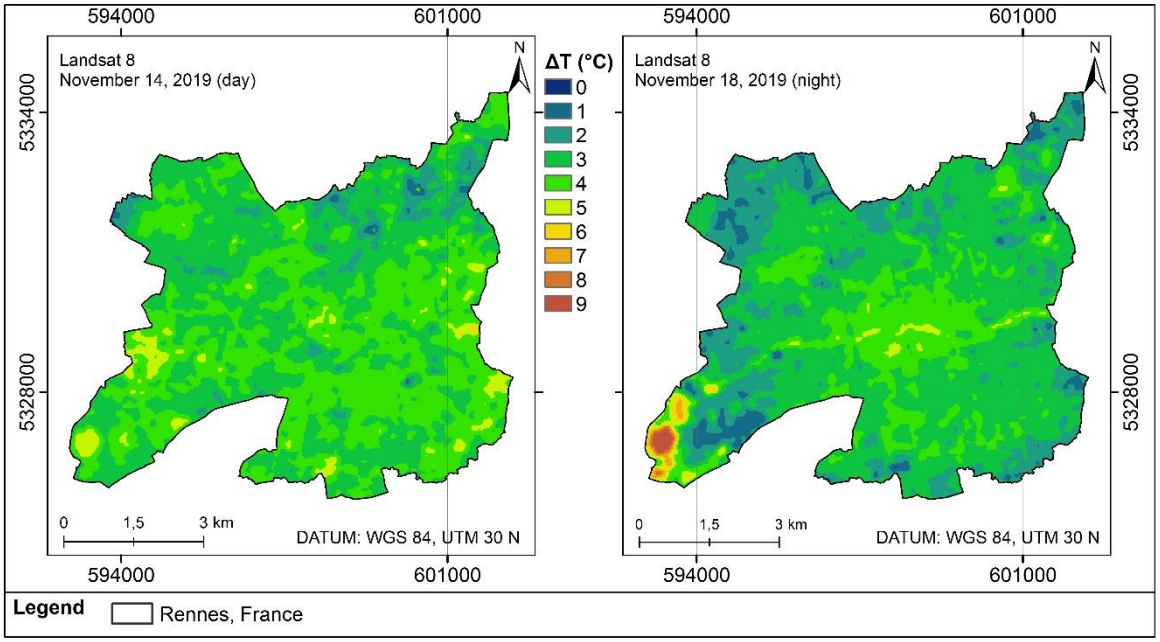


Figure 2. Intensité de l'îlot de chaleur de surface à Rennes/France: journée du 14 novembre 2019 (scène Landsat 8, 202/26, canal 10) et nuit du 18 novembre 2019 (scène Landsat 8 61/217, canal 10).

A Presidente Prudente, les vallées boisées sont systématiquement les surfaces les plus fraiches, de jour comme de nuit : cependant, le secteur de référence rural le plus frais pendant la journée (au nord-est) ne l'est plus pendant la nuit où le secteur le plus frais se trouve au sud-ouest. Enfin, les secteurs avec une forte présence d'eau au sud-ouest de Rennes apparaissent avec les températures de surface les plus élevées, surtout pendant la nuit où ces étendues se refroidissent peu.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que les îlots de chaleur de surface, avec des températures plus élevées dans les zones bâties, sont clairement définis à Presidente Prudente, de jour comme de nuit, dans des conditions de températures atmosphériques maximales élevées (supérieures à 30°C). À Rennes, du fait de conditions climatiques plus fraîches et humides, l'intensité de l'îlot de chaleur de surface était beaucoup plus faible pendant le jour que pendant la nuit, avec des températures de surface plus élevées enregistrées dans les zones industrielles le jour et sur les secteurs en eau la nuit. La nature des états de surface est donc très déterminante pour interpréter les images thermiques et il n'existe pas toujours de lien simple entre ces observations et les mesures de l'îlot de chaleur atmosphérique. Les recherches futures envisageront une approche plus fine entre température de surface et température de l'air avec des campagnes de mesures au sol intensives lors des heures de passage du satellite et la prise en compte des variations saisonnières du climat et de la végétation.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CAPES/COFECUB Sh 941/19, CiClAMEn (*Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies*). Les auteurs remercient le *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ* – Bourse de productivité en recherche - Processus: 307191/2018-4.

Bibliographie

Amorim M. C. C. T., 2000. *O clima urbano de Presidente Prudente/SP*. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 374p.

Amorim M. C. C. T., 2018. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 9, 10-16.

Amorim M. C. C. T., Dubreuil V., Quenol H., Sant'Anna Neto J. L., 2009. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Confins*, v. 7, 1-16.

Amorim, M. C. C. T., Dubreuil V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, v. 5, 91-104.

Barbosa H. P., Dubreuil V., Amorim M. C. C. T., 2017. Utilização de imagens do satélite Landsat 8 para a análise da emissividade e da temperatura de superfície da aglomeração urbana de Rennes (França). XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017, Santos. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos : INPE, v. 1, 4542-4549.

Dubreuil V., Fante K.P., Planchon O., Sant'Anna Neto J. L., 2017. Les types de climats annuels au Brésil : Une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo*, 41.

Fernández García F., 1996. *Manual de climatologia aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Madrid, Editorial síntesis, S.A. 285p.

Foissard X., Dubreuil V., Quenol H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29 (2019) 100490.

Jensen J. R., 2009. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2ª ed. São José dos Campos: Parênteses.

Matseon M., McClain E. P., McGinnis D. F. Jr., Pritchard J. A., 1978. Satellite Detection of Urban Heat Islands. *Monthly Weather Review*, 106, 1725-1734.

Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge, Cambridge University Press/

STUDY ON THE INFLUENCE OF LAND USE AND COVER ON SURFACE TEMPERATURE AND NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX

AMORIM A.T., PIROLI E.L.

São Paulo State University Júlio de Mesquita Filho, Faculty of Science and Technology (FCT/UNESP), Presidente Prudente, Brazil (amanda.amorim@unesp.br ; edson.piroli@unesp.br)

Summary: *Seasonal climate variations in a region can significantly influence temperature, humidity and vegetation vigor regardless of land use and cover. This study was intended to investigate the influences of land uses and cover on Surface Temperature (ST) and on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in humid and dry periods of 2019. The study was conducted on Ribeirão dos Três Ranchos watershed – São Paulo – Brazil. To this end, the region's climatic data was studied to select and acquire satellite images for two periods. Later, in GIS environment, products of land use and cover, NDVI and ST were generated and their influences were analyzed. This study demonstrated that Geotechnologies are easy to apply and appropriate to seasonal studies associated to this theme and provide important information to subsidize decision making.*

Key words: *remote sensing; Geographic Information System; seasonal climate variations; natural resources conservation and preservation*

Résumé : ***Etude sur l'influence de l'utilisation et de la couverture des sols sur la température de surface et l'indice de végétation de différence normalisée.*** *Les variations climatiques saisonnières dans une région peuvent influencer de manière significative la température, l'humidité et la vigueur végétative indépendamment de l'utilisation et de la couverture du sol. Cette étude a cherché à étudier les influences des utilisations et de la couverture du sol sur la Température de Surface (ST) et sur l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) pendant les périodes humides et sèches de 2019. Ceci a été appliqué dans le sous-bassin du Ribeirão dos Três Ranchos - São Paulo - Brésil. Pour cela, les données climatiques de la région ont été étudiées pour sélectionner et acquérir des images satellitales relatives à deux périodes. Par la suite, dans un environnement SIG, les produits d'utilisation et de couverture du sol NDVI et ST ont été engendrés. Enfin, leurs influences ont été analysées. Cette étude a démontré que les Géotechnologies sont faciles à appliquer et adaptées aux études saisonnières liées à ce sujet et fournissent des informations importantes qui peuvent être utilisées comme base pour la prise de décisions.*

Mots clés : *télédétection; Système d'Information Géographique; variations climatiques saisonnières; conservation et préservation des ressources naturelles*

Introduction

The terrestrial surface includes a variety of uses and covers that are changed to meet several human needs. Changes in land use and cover, when not planned or correctly managed, can trigger economic, social and environmental problems. Moreover, seasonal climate variations in a region can significantly influence on temperature, humidity and vegetation vigor, which in its turn affect particularly agricultural activities.

Geotechnologies assist in the collection, storage, treatment and analysis of spatial information, which contribute to the constant development of new systems and applications to subsidize decision making associated to land planning and management (Câmara and Davis, 2001; Fitz, 2008). Among the different applications, the use of Remote Sensing (RS) in a Geographic Information System (GIS) environment assists in the analysis of the influence of land uses and cover with indicators, like Surface Temperature (ST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). This application is relevant since it makes possible to weight the level of degradation, as these indicators allow the assessment of spectral characteristics of surface targets, like temperature and vegetation biophysical parameters.

In view of the above, the present work aims at investigating the influences of land uses and cover on ST and NDVI in two distinct periods, humid and dry, in Ribeirão dos Três Ranchos watershed in São Paulo state – Brazil. The study is intended to learn the watershed composition

and dynamics and can subsidize researchers and managers in the preparation of management policies and proposals to contribute to the protection and conservation of natural resources, by minimizing negative impacts resulting from anthropic changes.

1. Data and Method

1.1. Study area

Ribeirão dos Três Ranchos watershed has a territorial extension of 105.4 km² and comprises predominantly Cerqueira César municipality (82.8km²) and part of Águas de Santa Bárbara (17.4km²) and Iaras (5.2km²) municipalities in the state of São Paulo, Brazil (Fig.1). It is distant about 300 km from the city of São Paulo. Its main bed is Ribeirão dos Três Ranchos, affluent of Novo River low stream, which in turn is affluent of Pardo River, tributary of Paranapanema River.

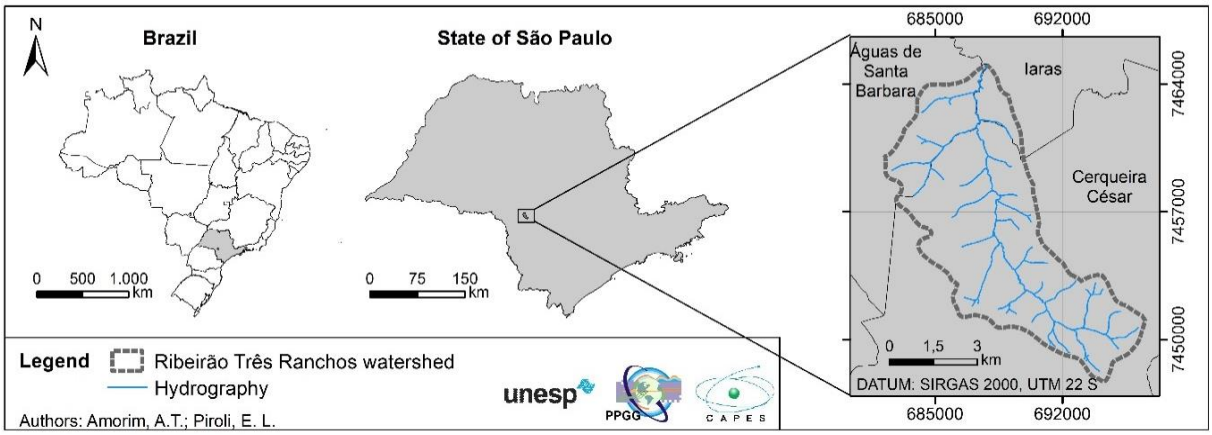


Figure 1. Study area location.

1.2. Climate study and image acquisition

Climate data of the region were first studied to select and acquire satellite images referring to the humid and dry periods (summer and winter respectively). The watershed under study presents climate classification Cwa of 50 to 80% (Dubreuil *et al.*, 2017). This climate is characterized for being subtropical with dry winter (June to September), average temperature below to 19ºC and precipitation average of 40mm in the period. The summer (December to March) is hot and wet, with average temperatures above 22ºC and precipitation average of 163mm in the period (Climate-Data, 2020).

Landsat 8 images were acquired in two distinct dates of the same year, one representing the humid period (March 24, 2019) and the other the dry period (September 16, 2019). The scenes are located in Path 221 Row 076 and don't present cloud cover on the area under analysis.

Later, in GIS environment, the land use and cover products, NDVI and ST were generated for the two periods selected. And, finally, the influences of land uses and cover in the two periods were analyzed associated to the indices generated.

1.2.1 Mapping of land use and cover

The mapping of land use and cover was made by visual interpretation of images (Jensen, 2009), with overlapping of the vector file of the watershed limit on Sentinel 2 images, with 10 meters spatial resolution, made on true composition for the year 2019. The mapping was made in scale 1:10,000 or close to it within the limits of data available. Classes of use and cover were defined based on the adaptation of classes from the Technical Land Use Manual (IBGE, 2013).

1.2.2 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

NDVI is one of the most used vegetation index and is also more appropriate for comparisons over time of one same area, because it is less influenced by atmospheric conditions variations (Jensen, 2009; Meneses and Almeida, 2012). This index was proposed by Rouse *et al.* (1973) and involves the ratio between two combinations of bands in spectral regions of red and near-infrared (Equation 1).

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED} \quad (1)$$

Where: ρNIR – reflectance of near-infrared band (Band 5 of Landsat 8); and ρRED – reflectance of red band (Band 4 of Landsat 8).

NDVI values range from -1 to +1, and are indicative to quantify the numerical value of vegetation index. These values get close to 1 in areas with dense vegetation, negative values for areas with total absence of vegetation (water), and exposed soils present values that are near zero (Meneses and Almeida, 2012).

1.2.3 Surface Temperature (ST)

For ST calculation, the digital numbers of each pixel were converted into radiance units (Equation 2) (USGS, 2019).

$$L_\lambda = M_L * Q_{CAL} + A_L \quad (2)$$

Where: L_λ – Spectral radiance (W/(m2*sr*μm)); M_L – Radiance multiplicative scaling factor for the Band 10 (0.0003342); A_L – Radiance additive scaling factor for the Band 10 (0.1); Q_{CAL} – Level 1 pixel value in digital number (Band 10).

Then, radiance values were transformed into ST values in °C (Equation 3) (USGS, 2019).

$$ST(°C) = \frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}+1\right)} - 273.15 \quad (3)$$

Where: Lλ – Spectral radiance (W/(m2*sr*μm)); K1 – Band-specific thermal conversion constant from the metadata (774.8853); K2 – Band-specific thermal conversion constant from the metadata (1321.0789).

2. Results

Figure 2 presents representative images of the humid (March 24, 2019) and dry (September 16, 2019) periods and land use and cover of the area under study.

This area covers part of Cerqueira César municipality's urban mesh (3.86 km²). The infrastructures comprises rural constructions and paved roads (2.01 km²). There are temporary agricultural crops cover 45.83 km² and permanent agricultural crops cover 2.43 km². There are also pastures (27.64 km²) and silvicultures (12.89 km²). Forest represents tree formations (7.55 km²). In rural areas there is coverage with a prevalence of shrubland sparsely distributed on woody grass cover 2.85km². And the water covers 0.34km² of the study area.

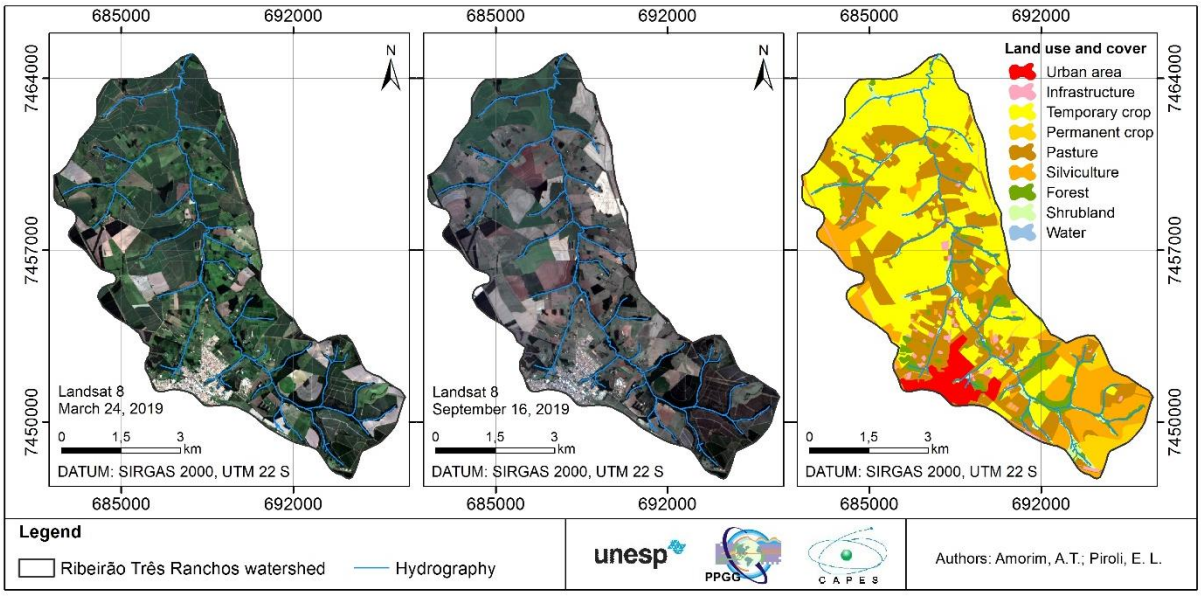


Figure 2. Ribeirão dos Três Ranchos watershed images in humid (March 24, 2019) and dry (September 16, 2019) periods and land use and cover.

NDVI and ST of the humid and dry periods of the area under study are presented in Figures 3 and 4 respectively.

The NDVI in the humid period ranged from -1 to 0.87, with mean of 0.65, standard deviation 0.16 and median of 0.70, while NDVI of the dry period ranged from -0.3 to 0.78, with mean of 0.43, standard deviation 0.12 and median of 0.43. The ST in the humid period ranged from 22.07°C to 32.83°C, with mean of 25.30°C and standard deviation 1.76 and ST in the dry period ranged from 26.02°C to 38.18°C, with mean of 31.23°C and standard deviation 2.38.

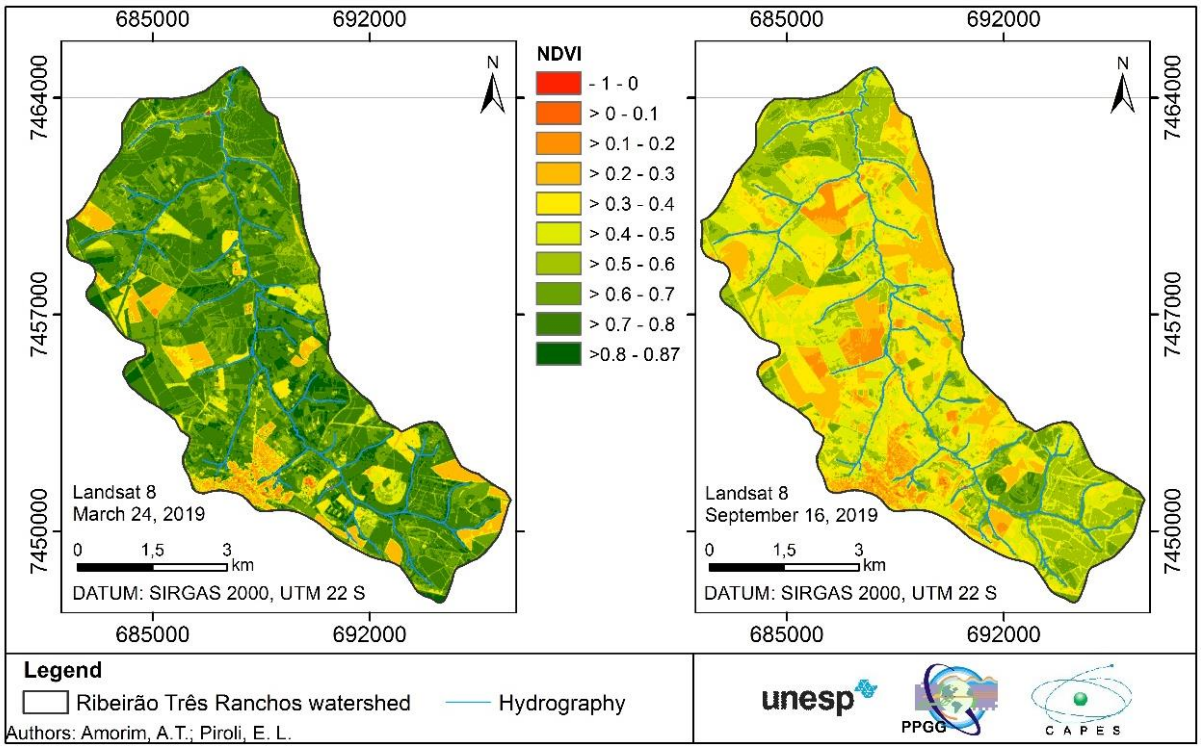


Figure 3. NDVI in Ribeirão dos Três Ranchos watershed in humid (March 24, 2019) and dry (September 16, 2019) periods.

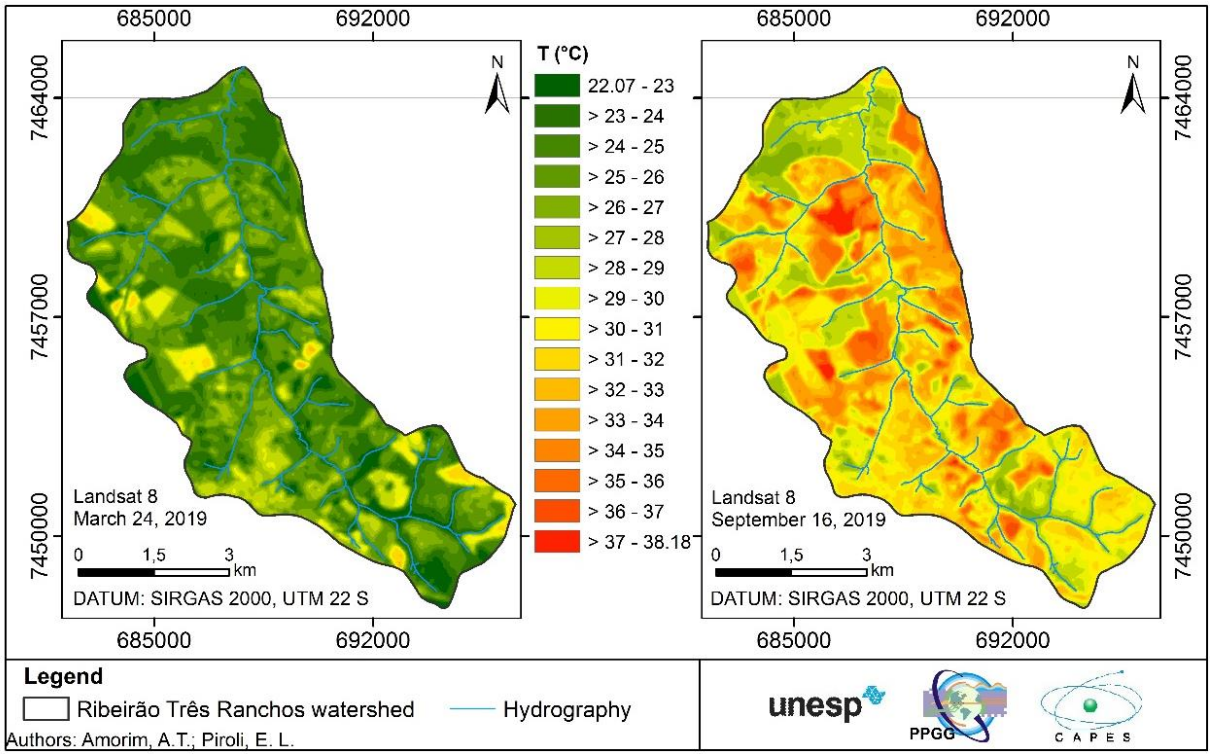


Figure 4. Surface temperature in Ribeirão dos Três Ranchos watershed in humid (March 24, 2019) and dry (September 16, 2019) periods.

Table 1 presents mean values and standard deviation of NDVI and ST of each land use and cover in the humid and dry periods.

Table 1. Mean and standard deviation of NDVI and ST in land uses and cover of Ribeirão dos Três Ranchos watershed in humid (March 24, 2019) and dry (September 16, 2019) periods.

Land use and cover	March 24, 2019 (humid period)		September 16, 2019 (dry period)	
	NDVI	ST (°C)	NDVI	ST (°C)
Urban area	M: 0.34 / SD: 0.15	M: 27.74 / SD: 0.91	M: 0.26 / SD: 0.09	M: 31.35 / SD: 0.75
Infrastructure	M: 0.56 / SD: 0.13	M: 25.53 / SD: 0.90	M: 0.38 / SD: 0.09	M: 31.52 / SD: 1.31
Temporary crop	M: 0.65 / SD: 0.14	M: 25.16 / SD: 1.73	M: 0.39 / SD: 0.13	M: 31.91 / SD: 2.93
Permanent crop	M: 0.70 / SD: 0.06	M: 23.74 / SD: 0.95	M: 0.55 / SD: 0.05	M: 30.00 / SD: 0.96
Pasture	M: 0.68 / SD: 0.09	M: 25.53 / SD: 0.97	M: 0.41 / SD: 0.07	M: 31.51 / SD: 1.36
Silviculture	M: 0.60 / SD: 0.20	M: 26.03 / SD: 2.64	M: 0.52 / SD: 0.09	M: 30.27 / SD: 1.54
Forest	M: 0.78 / SD: 0.04	M: 23.70 / SD: 0.84	M: 0.58 / SD: 0.06	M: 28.84 / SD: 1.32
Shrubland	M: 0.72 / SD: 0.08	M: 24.30 / SD: 0.80	M: 0.51 / SD: 0.07	M: 29.36 / SD: 1.30
Water	M: 0.21 / SD: 0.41	M: 24.27 / SD: 0.55	M: 0.20 / SD: 0.20	M: 28.35 / SD: 1.25

Legend: M = Mean. SD = standard deviation.

Conclusions and Discussion

In general, higher vegetation vigor and lower surface temperatures were observed in the humid period, while the dry period presented opposite aspects (lower vegetation vigor and higher temperatures). This observation supports Fathizad *et al.* (2017) analysis, which states that vegetation vigor reduction increases surface temperature for the different classes of land use and cover.

A considerable difference was observed between the two periods. This difference concerns the vegetation vigor and surface temperatures of urban and forest areas. It shows the importance

of urban afforestation to reach higher thermal comfort. This analysis corroborates that by Moreira and Amorim (2016) who emphasized the relation between green areas and cooling and maintenance of temperatures in urban areas.

Reduction in vegetation vigor in the dry period was observed, particularly in areas of agricultural plantations, silvicultures and pastures. In view of that, it is recommended the adoption of measures of irrigation and management, since in this period surface temperature elevation occurs, which can negatively affect agro-silvopastoral activities.

The high standard deviation in temporary crops and silviculture occurs chiefly due to crop rotation and wood cut, and the soil stays temporarily uncovered and unprotected. In this situation, the owner should adopt measures for protection and conservation of the soil, avoiding its degradation (Bertoni and Lombardi Neto, 2010).

Finally, this study demonstrated that Geotechnologies are easily applied and are appropriate for seasonal studies associated to land uses and covers, vegetation vigor and surface temperatures. Moreover, they provide important information to subsidize decision making aimed at protecting and preserving natural resources, as well as to minimize negative impacts associated to economy and the society.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazil (CAPES) - Finance Code 001.

Literature

Bertoni J., Lombardi Neto F., 2010. *Conservação do solo*. 7.ed. São Paulo, Ícone. 355p.

Câmara G., Davis C., 2001. Introdução. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. (Org.*). Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE.

Climate-Data. Climate-data.org. Dados Climatológicos para Cerqueira César. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/cerqueira-cesar-34937/#climate-graph>. Acesso em: 15 jan. 2020.

Dubreuil V., Pechutti Fante K., Planchon O., & Neto J. L. S. A., 2017. Les types de climats annuels au Brésil : une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo*, (41).

Fathizad H., Tazeh, M., Kalantari S., Shojaei S., 2017. The investigation of spatiotemporal variations of land surface temperature based on land use changes using NDVI in southwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 249-256.

Fitz P. R., 2008. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo, Oficina de Textos, 160p.

IBGE., 2013. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de uso da terra*. 3ª ed. Rio de Janeiro, IBGE, 171p.

Jensen J. R., 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. 2ª ed., São José dos Campos/SP: Parêntese, 598p.

Meneses P. R., Almeida T., Aritmética de Bandas. 2012. In: Meneses, P. R.; Almeida, T. (Org.*). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Brasília, UnB/CNPq, 266p.

Moreira J. L., Amorim M. C. C. T., 2016. O clima urbano de Penápolis-SP através da temperatura da superfície e de índices radiométricos. *Geosaberes*, Fortaleza, 6(3), 190-202.

Rouse J. W. *et al.*, 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERT. *NASA Earth Resources Techonology Satellite*, I Symposium Proceedings, Washington, NASA, 309-317.

USGS - U.S. Geological Survey., 2019. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0. Sioux Falls, South Dakota. 114p.

ETUDE COMPARATIVE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DANS DEUX BASSINS-VERSANTS ANTHROPISES EN AFRIQUE DE L'OUEST

AMOUSSOU E.[1,2], TOTIN VODOUNON S.H.[1,2], KOUADIO K.C.A.[3,7], OBAHOUNDJE S.[3], KOUAME Y.M.[6,7], DIEDHIOU A.[4], MAHE G.[5], HOUNDENOU C.[2], BOKO M.[2]

1 Département de Géographie, Université de Parakou, Parakou, Bénin (ajernest@yahoo.fr ; ernestamoussou@gmail.com)
2 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin
3 LAPA-MF : Centre d'Excellence Changement Climatique, Biodiversité et Agriculture durable (CEA CCBAD), Université Houphouët-Boigny d'Abidjan, Abidjan, Côte d'Ivoire
4 IRD, Laboratoire LTHE de l'Université de Grenoble-Alpes, Grenoble, France
5 Laboratoire d'HydroSciences de Montpellier, Université de Montpellier 2, Montpellier, France
6 UFR-Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire
7 Laboratoire Géosciences et Environnement (SGE), Université Nangui Abrogoua (UNA), Abidjan, Côte d'Ivoire

Résumé : *L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution des écoulements dans les deux bassins aménagés pour mieux apprécier la dynamique des barrages de Nangbéto et de Kossou respectivement sur les fleuves Mono et Bandama. Les données utilisées sont celles des pluies spatiales des deux bassins à l'exutoire de Nangbéto et de Kossou, des débits entrant et sortant de Nangbéto et de Kossou. Le coefficient d'écoulement a permis d'apprécier les effets des lâchers à Nangbéto et à Kossou, et l'effet des précipitations. Les résultats obtenus montrent dans les deux bassins-versants, que les écoulements sont devenus « artificiels » depuis la mise en eau des barrages. Les débits d'étiage sont soutenus par les lâchers d'eau. Ainsi, ils ont augmenté de plus de 86 % contrairement aux débits de crues qui ont connu une diminution de 47 % sur le bassin du Mono à Nangbéto et de 97 % sur le bassin de Bandama à Kossou. De plus, avec la mise en eau du barrage, le coefficient d'écoulement a augmenté en moyenne de 30 % (Nangbéto) et 13 % (Kossou) dans les bassins comparativement à l'état naturel. Toutefois, son évolution est fonction de la quantité de lames d'eau précipitée dans le bassin.*

Mots clés : *Mono ; Bandama ; bassin-versant anthropisé ; fonctionnent hydrologique ; barrage hydroélectrique*

Summary: ***Comparative study of hydrological functioning in two anthropised watersheds in West Africa.*** *The objective of this study is to analyze the evolution of flows in the two basins developed to better appreciate the dynamics of the Nangbéto and Kossou dams on the Mono and Bandama rivers respectively. The data used are those of space rains from the two basins at the outlet of Nangbéto and Kossou, flows entering and leaving Nangbéto and Kossou. The flow coefficient made it possible to appreciate the effects of releases in Nangbéto and Kossou, and the effect of precipitation. The results obtained show in the two watersheds that the flows have become "artificial" since the impoundment of the dams. The low water flows are supported by the water releases. Thus, they increased by more than 86% unlike the flood flows which experienced a decrease of 47% in the Mono basin in Nangbéto and 97% in the Bandama basin in Kossou. In addition, with the impoundment of the dam, the flow coefficient increased on average by 30% (Nangbéto) and 13% (Kossou) in the basins compared to the natural state. However, its evolution is a function of the quantity of blades of water precipitated in the basin.*

Key words: *Mono; Bandama; anthropized watershed; hydrological function; hydroelectric dam*

Introduction

Le réchauffement climatique est un phénomène planétaire, et presque toute l'Afrique n'échappe pas à ses conséquences (IPCC, 2007 ; Amoussou, 2010). Ainsi, suite aux épisodes de sécheresse des années 1970 et 1980 en Afrique de l'Ouest, des milliers de petits et moyens barrages ont été édifiés dans beaucoup de bassins-versants, dans le but de pérenniser la ressource en eau. Ainsi, il s'est agi de stocker l'eau pour faire de la production agricole, d'où les barrages hydroagricoles. Mais, suite à l'insuffisance de la production électrique dans certains pays, certains fleuves ont connu en plus de leurs barrages hydroagricoles, l'installation des barrages hydroélectriques en amont : c'est le cas des fleuves Mono (Bénin-Togo) et Bandama (Côte d'Ivoire).

Les barrages hydroélectriques sont considérés comme de véritables atouts pour le développement socio-économique (Amoussou, 2010 ; Korkovelos *et al*., 2018). Ils sont utilisés pour l'hydroélectricité, l'eau potable, l'agriculture, la pêche et l'élevage (Anoh *et al*., 2017). Mais, les études antérieures menées par Amoussou (2010) et Amoussou *et al*. (2012) dans le bassin du Mono ont montré que la disponibilité des ressources en eau est liée à la distribution spatio-temporelle de la variabilité climatique. Ainsi, dans les deux bassin-versants, les débits varient aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les réservoirs d'eau des lacs de retenue formés par ces barrages sont influencés par les variations pluviohydrologiques, rendant difficile leur exploitation rationnelle (Konan *et al*., 2013). A cet effet, la maîtrise des ressources en eau d'un bassin nécessite une connaissance approfondie des processus hydrologiques (Singh et Woolhiser, 2002 ; Amoussou *et al.*, 2012).

Les barrages hydroélectriques de Nangbéto et de Kossou mis en eau respectivement en septembre 1987 et novembre 1972, contribuent à fournir de l'énergie électrique pour trois pays (Bénin, Togo et Côte d'Ivoire) ouest africains dans le but de renforcer l'existant. Mais, cela a bouleversé le fonctionnement hydrologique des fleuves en aval des barrages. Or, dans le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), une meilleure connaissance de la dynamique hydroclimatique des bassins versants est nécessaire. Le but de cette étude est d'analyser la variation des écoulements dans les deux bassins aménagés pour mieux apprécier le fonctionnement hydrologique de chaque barrage suite à ses lâchers d'eau.

1. Zone d'étude

Cette étude faite en Afrique de l'Ouest porte sur les barrages hydroélectriques de Nangbéto (Mono) et de Kossou (Bandama) (Fig.1). Ils sont tous situés sur des bassins côtiers drainant des eaux du nord vers l'océan Atlantique (sud). Ces barrages bénéficient d'un climat de type soudanien caractérisé par un régime pluviométrique unimodal qui gouverne le fonctionnement hydrologique à régime tropical dans les bassins du Mono (21500 km²) et de Bandama (32400 km²). Cependant, la partie sud du bassin est arrosé par un climat subéquatorial à régime pluviométrique bimodal, dont leur influence ne sont pas négligeables pendant les périodes de hautes eaux.

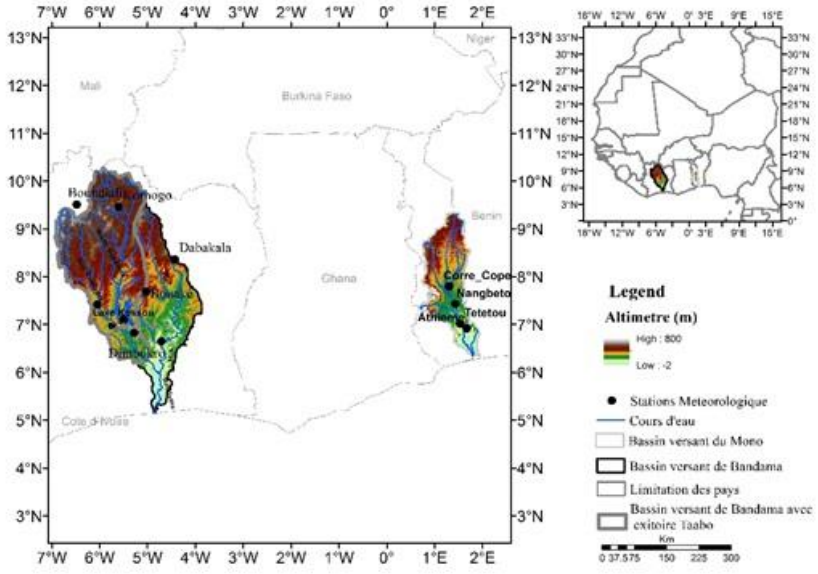


Figure 1. Location des deux bassins anthropiques

Les actions conjuguées des lâchers d'eau des bassins avec les précipitations au sud engendrent les récurrentes inondations enregistrées dans la basse vallée des bassins-versants.

Les deux hydrosystèmes sont installés sur deux formations géologiques : le grès sédimentaire et le socle cristallin, ce dernier étant la formation dominante, sur laquelle se trouve les retenues des barrages de Nangbéto (180 km²) et de Kossou (1700 km²). La présence des ressources en eau a entrainé une surexploitation des unités paysagiques des bassins avec une forte érosivité, augmentant le ruissellement et les apports terrigènes dans les hydrosystèmes, contribuant au comblement de la basse vallée du complexe.

2. Données et méthodes

Les données utilisées sont extraites de la base de données de l'Agence Météo-Bénin, de la Direction de Météorologie de Lomé, de la Société d'Exploitation de Développement Aéroportuaire Aéronautique Météo (SODEXAM) d'Abidjan et des services hydrologiques des trois pays. Il s'agit des précipitations, de l'évapotranspiration, des débits (bruts et turbinés) et de la production électrique. Ces données couvrent la période de 1980 à 2014 pour le bassin de Bandama à Kossou et de 1988 à 2016 pour le bassin du Mono à Nangbéto. Elles ont permis de faire le traitement statistique, en comparant les écoulements de surface à l'entrée et à la sortie des barrages. Dans le bassin de Bandama à Kossou, 33 stations pluviométriques ont été utilisées contre 17 stations sur le bassin du Mono à Nangbéto. Ces données ont été krigées par bassin pour avoir le champ de pluie qui a servi au traitement des données pluviohydrologiques pour analyse.

3. Résultats et discussion

3.1. Variation mensuelle pluie/débit

La figure 2 présente la variation mensuelle pluie/débit dans les bassins-versants des fleuves Mono (barrage Nangbéto) de 1988-2016 et Bandama (barrage Kossou) de 1980-2014.

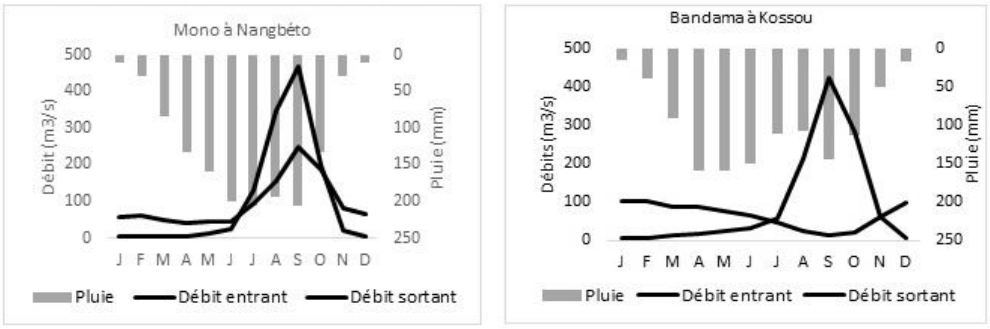


Figure 2. Variation mensuelle pluie/débit à Nangbéto (Mono) et à Kossou (Bandama)

Il ressort de l'analyse de la figure 2, que les forts débits coïncident avec les fortes pluies du domaine tropical dont le maximum est enregistré en août ou septembre. Par contre, les maximums d'avril-mai à Bandama contribuent à remplir le réservoir en place, en attendant la descente des eaux du domaine tropical pour faire le trop-plein de la retenue. Ce qui va engendrer les crues observées. De plus, avec la mise en eau du barrage, les débits d'étiage ont considérablement augmenté de de 79 % à la sortie du barrage de Kossou contre 86 % à la sortie de Nangbéto. Ainsi, le mois le plus sec (janvier) des deux bassins a connu une augmentation de son débit de 93 % pour Nangbéto et 95 % pour Kossou. Ces résultats corroborent avec ceux de Amoussou (2010) et Kouamé *et al*. (2019) confirmant le rôle joué par les lâchers d'eau dans le fonctionnement hydrologique des bassins-versants en aval des barrages. Ainsi, avec la mise en eau du barrage, l'écoulement est dit ''artificiel'' du fait de la modification de l'écoulement naturel.

Par contre, l'installation des barrages a engendré une diminution des crues en aval, mais très marquée à Kossou (97 %) qu'à Nangbéto (47 %). Ceci pourrait s'expliquer par le sous-dimensionnement du barrage de Kossou. Ainsi, on note une différence plus marquée entre les débits maximums d'entrée et de sortie à Kossou (31 %) qu'à Nangbéto (7.5 %) comme le confirme la figure 3.

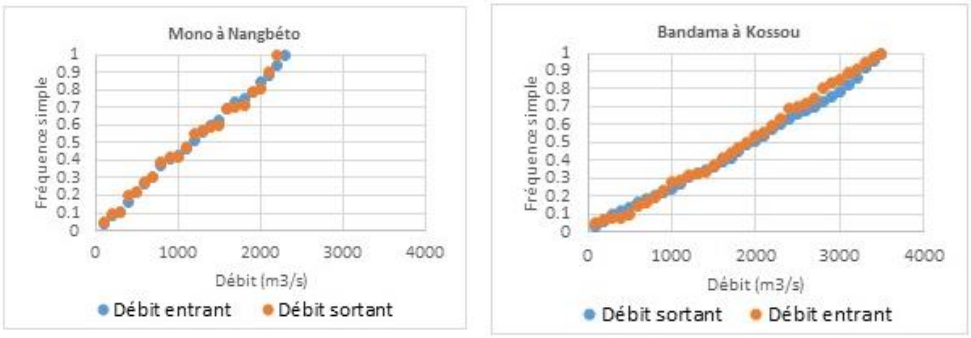


Figure 3. Evolution fréquentielle des débits maximums d'entrée et de sortie des deux barrages

Il résulte également de la figure 3, que la grande capacité du barrage de Kossou comparativement à celui de Nangbéto, où le débit entrant est presque égal au débit sortant. Cette faible capacité de la retenue de Nangbéto, explique les récurrentes ouvertures des vannes pendant les périodes de hautes eaux sur le fleuve Mono entre septembre-octobre.

3.2. Variation du coefficient d'écoulement

La figure 4 présente le coefficient d'écoulement (CE) dans les deux bassins-versants à l'entrée et à la sortie des barrages. Il traduit la capacité de ruissellement du bassin. Ce coefficient est étroitement lié à des variations climatiques et traduit la relation entre les pluies et les écoulements (Mahé et Olivry, 1995). Il permet aussi d'analyser le rôle joué par le substratum géologique du bassin considéré. Ainsi, de l'analyse de la figure 4, il ressort une augmentation des écoulements à la sortie des barrages (Nangbéto : 29.93 % contre 11.39 % et Kossou : 13.08 % contre 7.26 %). Ces faibles valeurs au niveau de Kossou confirment le caractère sous-dimensionné du barrage avec de faible débit moyen de sortie de 66.37 m^3/s contre 95.85 m^3/s à l'entrée soit 29.48 m^3/s de différence. Par contre, à Nangbéto, le débit moyen à l'entrée est de 101.87 m^3/s contre 94.22 m^3/s soit une différence de 7.65 m^3/s.

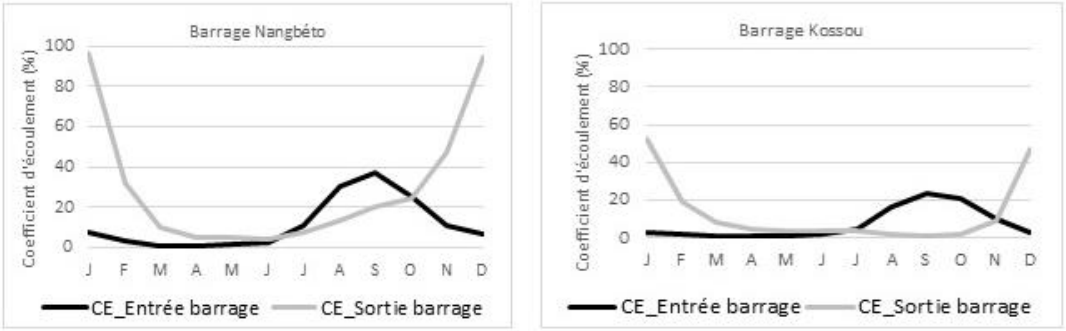


Figure 4. Variation mensuelle du coefficient d'écoulement dans les deux bassins-versants

L'augmentation du coefficient d'écoulement à la sortie de Nangbéto et de Kossou est significative au seuil de 1 % d'erreur. Or, on devrait s'attendre à une diminution du fait de la forte évapotranspiration potentielle, de la forte évaporation du stock d'eau et de la baisse pluviométrique. Ce qui confirme que le fonctionnement hydrologique en aval des barrages dans

les bassins du Mono et de Bandama dépend non seulement des lâchers d'eau du barrage, mais aussi de la répartition de la variation des lames d'eau précipitées et de la dynamique d'occupation des terres autour du barrage, comme l'avait aussi souligné Amoussou (2010).

3.3. Production énergétique (PE) dans les deux barrages hydroélectriques

La figure 5 illustre la variabilité annuelle de la production électrique à Nangbéto (1988-2016) et à Kossou (1981-2014) en fonction des débits turbinés. Il ressort de l'analyse de la figure 5 que les productions électriques sont en baisse dans les deux bassins, plus marqué à Kossou qu'à Nangbéto. Cette baisse est en partie liée à la baisse des débits turbinés. Toutefois, les forts débits turbinés ne produisent pas toujours une forte production électrique. Cependant, ils ne sont pas sans influence, car dans le bassin de Nangbéto, les années sèches produisent une baisse considérable de l'énergie. Ainsi, en 2015 avec un débit turbiné de 44 m^3/s, le barrage a produit 56 GWh contre 167 GWh en moyenne.

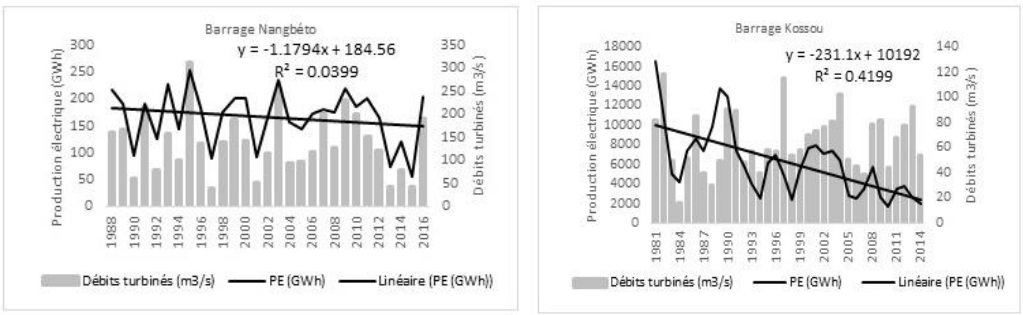


Figure 5. Evolution de la production électrique à Nangbéto et à Kossou

De plus de 2014 à 2015, le déficit du débit turbiné de 44 % a engendré un déficit de 53 % dans la production électrique à Nangbéto. Par contre le déficit de débit turbiné de 42 % entre 2013-2014 à Kossou a engendré seulement un déficit de la production électrique de 24 %. Ceci témoigne de la grande capacité de stockage d'eau du réservoir contrairement à celle de Nangbéto. Ce qui fait que les années de forts débits turbinés ne s'accompagnent pas toujours de forte production d'électrique dans le bassin de Bandama à Kossou contrairement dans le bassin du Mono à Nangbéto (Fig.5), où les fortes productions électriques sont enregistrées pendant les années de forts débits turbinés. Ce qui confirme la relation presque parfaite (r= 0.90) entre les deux variables à Nangbéto contrairement à Kossou (r = 0.29) comme l'illustre la figure 6.

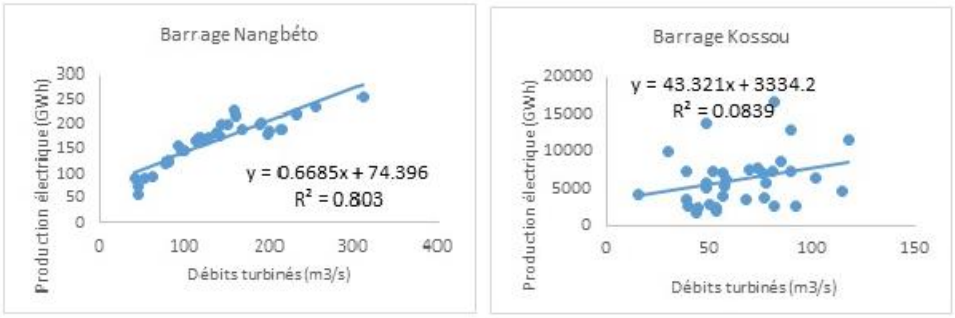


Figure 6. Relation production électrique/ débits turbinés dans les deux bassins-versants

Les résultats montrent également que le barrage de Kossou produit près de 33 fois en moyenne la production électrique de Nangbéto, confirmant la taille la plus petite du barrage. Cette forte production électrique de Kossou est liée à la capacité (1700 km²) et au nombre de turbines (3) contre 2 turbines à Nangbéto et une faible capacité de la retenue (180 km²) soit 9 fois plus petit.

Conclusion

Au terme de cette étude, il faut retenir une relation dégradée entre la pluie et le débit dans les deux bassins anthropisés. Ce qui se justifie par les lâchers d'eau des barrages qui soutiennent les débits d'étiages de plus de 82 % en moyenne. Par contre, les barrages régularisent les crues avec leur diminution plus marquée à Kossou (97 %) qu'à Nangbéto (47 %). Ainsi, il revient de constater qu'un bassin aménagé a un débit de fonctionnement dit ''artificiel''.

Les différences entre les débits entrant et sortant sont plus marquées à Kossou qu'à Nangbéto du fait de la capacité de stockage de ce dernier. Les lâchers d'eau dans les bassins-versants des deux barrages entraînent une augmentation du coefficient d'écoulement plus marqué à Nangbéto (30 %) qu'à Kossou (13 %) montrant le sous-dimensionnement de ce dernier.

Les faibles débits d'écoulement engendrent une faible production électrique dans les barrages à faible capacité de stockage comme Nangbéto contrairement au barrage de Kossou, qui a une grande capacité. Dans les barrages à faible capacité de stockage d'eau comme Nangbéto, on assiste à une forte relation entre les débits turbinés et la production électrique contrairement au barrage de grande capacité. Le barrage de Kossou 9 fois plus grand que celui de Nangbéto, produit 33 fois de l'énergie électrique que celui-ci.

Bibliographie

Amoussou E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'ouest)*. Doctoral dissertation in geography, École doctorale E2S, Dijon. URL: https://www.theses.fr/2010DIJOL001

Amoussou E., Camberlin P., & Mahé G., 2012. Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). *Hydrological Sciences Journal*, *57* (4), 805–817.

Anoh K. A., Koua T. J. J., Kouamé K. J., Jourda J.P., & Laurent F., 2017. Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using swat: a case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*. Doi : 10.1080/15715124.2017.1387122.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p.

Konan K. S., Kouassi K. L., Konan K. F., Kouame K. I., Aka K., & Gnakri D., 2013. Evaluation des charges solides et caractérisation hydrochimique des eaux du lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, (35), 17-25.

Korkovelos A., Mentis D., Siyal S., Arderne C., Rogner H., Bazilian M., & De Roo A., 2018. A Geospatial Assessment of Small-Scale Hydropower Potential in Sub-Saharan Africa. *Energies*, *11*(11), 3100. Doi : https://doi.org/10.3390/en11113100

Kouame K.A., Kouame K.F., Kouassi A.M., Oulare S., Adon G.C., 2011. Mise en place d'une base de données pour une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire) : Apport d'un modèle numérique d'altitude, de la télédétection et du SIG Physitel. *Afr. Sci*. 2011, 07, 94–114.

Kouame Y., M., Obahoundje S., Diedhiou A., François B., Amoussou E., Anquetin S., Didi S., R., & Yao K.E., 2019. Climate, Land Use and Land Cover Changes in the Bandama Basin (Côte D'Ivoire, West Africa) and Incidences on Hydropower Production of the Kossou Dam. *Land*, 8 (103). Doi : 10.3390/land8070103.

Mahé G. & Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Rev. Sécheresse* n° 6, 109-117.

Singh V. P., & Woolhiser D. A., 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.

MAPPING FOSSIL FUEL CO_2 EMISSIONS IN CURITIBA, BRAZIL: AN APPROACH BASED ON STREET SCALE

ANJOS M., MENDONÇA F., FORIGO Y.

Labolcima, Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil (maxanjos@campus.ul.pt)

Summary: *Quantification of whole-city greenhouse gas emissions at fine spatiotemporal resolution is currently the most obvious and straightforward efforts in carbon cycle and climate change research. This work presents an approach for quantifying building and transportation $FFCO_2$ emissions at high spatial resolution in Curitiba, Brazil. The methodology tests an alternative approach to provide insights into the $FFCO_2$ emissions in urban areas, using indirect on-road emissions associated with energy consumption, GIS building and road data. A comprehensive $FFCO_2$ dataset with sampled and predicted values for whole city at fine spatial is presented. Our results can help to providing a detailed greenhouse gases inventories and climate change adaption plans, the two most important tools used by urban policy communities to address climate change.*

Key words: *climate change; carbon dioxide; global warming; carbon mapping; Curitiba*

Résumé : ***Cartographie des émissions de CO_2 des combustibles fossiles à Curitiba au Brésil : une approche basée à l'échelle de la rue.*** *La quantification des émissions de gaz à effet de serre à travers la ville, avec une résolution spatiale et temporelle fine (haute résolution), est actuellement l'effort le plus important dans la recherche sur le cycle du carbone au sein du changement climatique. Ce travail vise à quantifier les émissions de $FFCO_2$ des bâtiments et des transports à haute résolution spatiale à Curitiba. La méthodologie teste une approche alternative pour fournir un aperçu des émissions de $FFCO_2$ dans les zones urbaines, en utilisant les émissions indirectes des routes associées à la consommation d'énergie a partir des données SIG. Un ensemble complet de données sur le $FFCO_2$ avec des valeurs échantillonnées et prévues pour toute la ville est présentée à une échelle spatiale fine. Les résultats peuvent aider à fournir un inventaire détaillé des gaz à effet de serre et des plans d'adaptation au changement climatique, les deux outils les plus importants utilises par les communautés de politiques urbaines pour lutter contre ce phénomène.*

Mots clés : *changement climatique ; dioxyde de carbone ; réchauffement climatique ; cartographie du carbone ; Curitiba*

Introduction

The rising fossil fuel carbon dioxide emissions ($FFCO_2$) is the most important forcing to anthropogenic climate change (IPCC, 2014). Cities are now major contributors to greenhouse gas emissions as consume 70% of their energy from coal, oil and natural gas (Cities 40) and this is projected to rise in the coming decades, as urbanization and economic growth trend intensify, especially in the developing countries.

Urban density, spatial organization, mobility and lifestyle are crucial elements that influence energy consumption, especially in transportation and building systems. Thus, the quantification of whole-city $FFCO_2$ emissions at fine spatiotemporal resolution is currently the most obvious and straightforward efforts in carbon cycle and climate change research (Wu *et al.* 2018; Yamagata *et al.* 2018; Gurney *et al.* 2019). The main source of $FFCO_2$ emissions is the greenhouse gases inventories that are typically tracked at the national, regional or city level with the focus at an annual timescale. This means that these inventories do not provide detailed information about $FFCO_2$ emissions in the city (e.g. those emission on a neighbourhood scale or major roadways), which are important to the urban policy communities to manage their low-carbon actions, in a suitable manner.

Carbon mapping emerges as an approach that traces all $FFCO_2$ emissions in urban areas. Carbon mapping is a new field of study and has focused on the estimates of $FFCO_2$ emissions at fine spaciotemporal scales. This technology of mapping provides multiple benefits to understanding climate change literacy as estimated CO_2 emissions are critical for many reasons, as reported by Gurney *et al.* (2015, Nature 525, 179): "to verify emissions rates; to confirm

progress towards reduction and support carbon trading, permits or taxation; to enable more-targeted and financially efficient decisions about mitigation option".

Carbon mapping uses mainly the bottom-up and top-down approaches (e.g. Zhou and Gurney, 2010; Gately *et al.* 2013; Rao *et al.* 2017). The former quantifies the indirect $FFCO_2$ emissions from various sources, using minimum GIS data requirements (energy fuel consumption simulation and reporting, transportation data, building information, sociodemographic statistics). The latter measures *in situ* CO_2 fluxes by using sensors mounted at network stations or tall towers, which requires extensive human, financial and logistical resources. This partly why the *in situ* CO_2 concentration is underresearched in most cities worldwide. Thus, it is important to test alternative bottom-up approaches that can provide insights into the $FFCO_2$ emissions in urban areas.

This study is part of an ongoing research project, which aims at developing an approach for quantifying building and transportation $FFCO_2$ emissions at a high spatiotemporal resolution. Here, we presented the spatial and temporal distribution of the on-road CO_2 emissions in Curitiba city, Brazil.

1. Data and Methods

1.1. Study area

Curitiba is the largest city of the state of Paraná, localized in southern Brazil (lat. 25°25′S, long. 49°16′W, alt. 930 m). The population accounts to 1.9 million inhabitants, being 96% urban residents (IBGE, 2010). The city has a humid subtropical climate, Cfb according to the Köppen-Geiger classification, with a mean annual air temperature of 21ºC and mean annual accumulated rainfall of 1,576 mm. It has hot and rainy summers (December to February) and cool and dry winters (June to August).

The city experienced rapid urbanisation leading to substantial changes in the land use and increase in the built-up area. Local governmental recognizes that the greenhouse gas emissions from human activity have influences in climate and weather changes in Curitiba. Currently, Curitiba is part of the Urban Low Emission Development Strategies – Urban Leds international project that helps the city to drive its greenhouse gases inventories.

1.2. Calculation of CO_2 emissions from road

The bottom-up approach was used as method to quantify on-road CO_2 emissions (Zhou and Gurney, 2010; Yamagata *et al.* (2018). This approach considers the traffic volumes by the vehicle types, distribution of vehicle kilometers traveled associated, specific emission factor and road configuration. The estimate of CO_2 emissions (E) at each road was calculated by the following equation:

$$E = TV \times RL \times EF, \quad (1)$$

were TV is the traffic volume that includes the vehicle type (bus, trucks, passenger vehicle, motorcycle), RL is the road link or road segment, and EF is the emission factor. The length (unit km) of a road link was calculated using the ArcMap/ARCGIS software. We assume that the traffic flow density and, consequently, the resulting CO_2 emissions are equal throughout one road link. For each vehicle type we used the emission factor by kilometre travelled an individual road link associated with consumption of fuel (Tab.1).

We used traffic count data at 201 intersections of road in the period of January 2019 provided by the Municipal Secretariat of Social Defense and Traffic, Curitiba. Road data with geographic location information was derived from the Geofabrik (https://download.geofabrik.de) that provides the open geodata from OSM project for whole planet in a vector format. Then, we extracted the OSM highway shapefile to Curitiba boundaries and classified the road as motorway, trunk, primary, secondary, tertiary and residential.

To map the whole-city on-road CO_2 emission, we use the mean TV of the sampled individual road link according to the OSM-road class and attributed this mean of TV to the non-sampled road link with same class, applying the equation 1. Subsequently, the sampled and predicted CO_2 emission values (tonnes of CO_2 equivalent) at each road were mapped for the total month, weekdays, weekend, and diurnal cycle timescales.

The uniform spatial distribution of the CO_2 emissions was rescaled to building and road footprint area resolution, using the Geographic Information System (GIS) toolbox ESRI®ARCGISTM10.6.

Table 1. Description of vehicle and fuel by type, and EF used in this study

Vehicle type	*Fuel used*	*Emission factor of CO_2 kg/km* □□	*References*
Motorcycle	Gasoline	0.129	IBMA (2013)
Passenger vehicle	Gasoline	0.198	IBMA (2013)
Bus	Diesel	0.521	EPE (2007)
Truck	Diesel	0.789	IPCC – 2006

2. Results

Curitiba roads have a different estimates of CO_2 emissions with a range from 0.3 to 3.730 tonnes of CO_2eq (Fig.1). A total of 996 roads were modelled and they together produced an amount of 7.600 tonnes of CO_2eq in January 2019. The spatial distribution revealed that the roads classified as motorway and primary are most responsible for CO_2 emission compared to tertiary and residential classes.

As a means of exploring details of the effect of the traffic activities on the CO_2 emission at a high temporal resolution, we showed the diurnal cycle and weekdays and weekend of the total CO_2 emissions in a road for the month January 2019. The CO_2 emissions increase sharply at 06:00, due to intensity vehicle fluxes on-roads and reach a maximum of 27 tonnes of CO_2eq at 18:00 (Fig.2). The CO_2 emissions start to decrease at 19:00 and the small emission was low (5 tonnes of CO2eq) until 05:00. The high emissions ranged from 465 to 508 tonnes of CO_2eq during weekdays, whilst during the weekend days ranged 214 to 333 tonnes of CO_2eq, when the traffic volume is reduced (Fig.3).

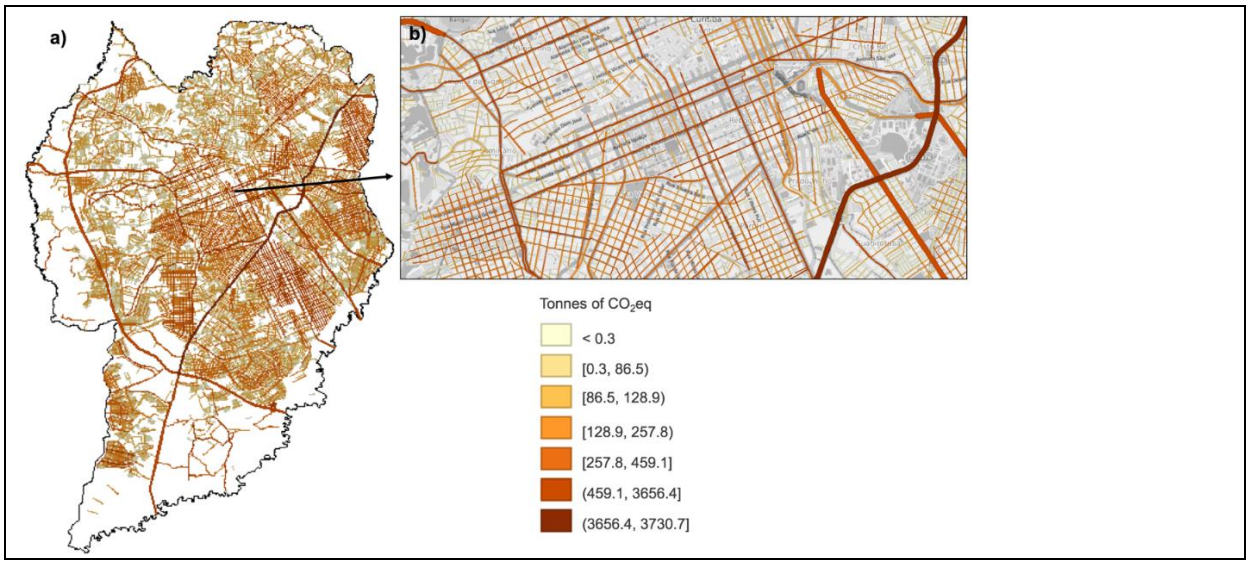


Figure 1. Total fossil fuel CO_2 emissions on road for Curitiba for the month January 2019: (a) all roads are displayed and (b) roads from the centre of the city. Units: tCO_2eq/month.

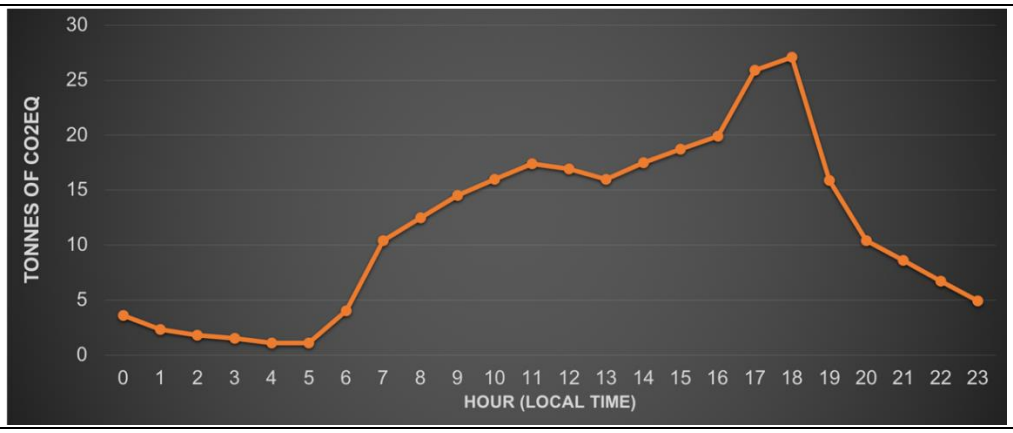


Figure 2. Diurnal cycle of the fossil fuel CO_2 emissions on a road for Curitiba for the month January 2019. The 24 de Maio street is used as reference.

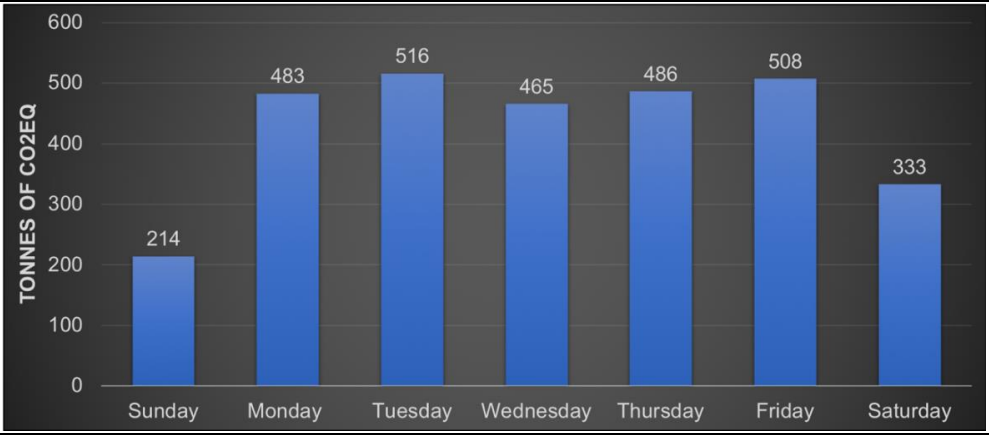


Figure 3. Weekdays and weekend temporal of the fossil fuel CO_2 emissions on a road for Curitiba for the month January 2019. The 24 de Maio street is used as reference.

Conclusions and Discussion

This study expands the Curitiba GHG inventory analysis, quantifying the $FFCO_2$ emissions from roads at a high-resolution spatial scale. The spatial distribution of the $FFCO_2$ emissions showed that all Curitiba roads emitted 7.600 metric tones of $FFCO_2$eq/month, with a significant difference levels to major roads. This agrees with several researches that have reported the major roads with high traffic flux and the proximity to the industrial centers are home the worst levels of short-lived pollutants in Curitiba (Poelezer *et al.* 2018; Castelhano, 2019).

Although many cities have one of the most ambitious Paris Agreement targets to reduce greenhouse-gas emissions, there is a need for an international greenhouse gas standard that provides consistency in the calculation and reporting of greenhouse gas emissions attributable to cities. For Brazilian cities, there is no national legislation that regulates the CO_2 emissions from vehicle mobile, that difficult the comparison between cities. With quantification of building CO_2 emissions at high-resolution, it is possible to create new indicators of long-lived pollutants and detailed inventories applied to cities.

The study presented here is now part of a global urban carbon mapping model, in which the CO_2 emissions building sector and emissions sociodemographic patterns for different Local Climate Zones classes are being developed. Standardizing the CO_2 mapping for different generical and universal LCZ classes, we can predict the estimates of emission to another area of the city identified as same LCZ class, so that model can be applied to any city in the world.

Acknowledgements

Max Anjos held a post-doctoral fellowship from PRINT/CAPES (Brazilian Ministry of Education). The authors would like to thank the Municipal Secretariat of Social Defense and Traffic, Curitiba for furnishing traffic data and researches of the Laboclima at the Federal University of Paraná, Brazil, for critical comments.

Literature

Castelhano F. J., 2019. *Qualidade do ar no AUC (Aglomerado Urbano de Curitiba/PR) :configuração atual e perspectivas no âmbito das mudanças climáticas globais*. PhD Thesis in Geography, Federal University of Paraná, Curitiba, Brésil.

EPE., 2007. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia – MME. [en ligne]. URL: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE%20-%202º%20Biocombust%C3%ADveis%20x%20MDL[1].pdf (accessed in 18 December 2019).

Gately C. K. *et al.*, 2013. A bottom up approach to on-road CO 2 emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning. *Environmental Science and Technology*, 47 (5), 2423–2430.

Gurney K.R. *et al.*, 2019. The Hestia fossil fuel CO2 emissions data product for the Los Angeles megacity (Hestia-LA). *Earth System Science Data*, 11(3), 1309–1335.

Gurney K.R., *et al*., 2015. Climate change: Track urban emissions on a human scale. *Nature* (525), 179–181.

IBMA., 2013. Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources. 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Rodoviários, 2013. [en ligne]. URL: https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf (accessed in 10 December 2019).

IPCC., 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Direc- trices para los inventarios nacionales GEI, p.12. [en ligne]. URL: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html (accessed in 20 December 2019).

IPCC., 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T. F., Qin D., Plattner

G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., & Midgley P. M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.

N.B., Ehleringer, *et al*., 2015. Climate change: Track urban emissions on a human scale. *Nature* (525), 179–181.

Polezer G., Tadano Y.S., Siqueira H. V., Godoi A.F.L., Yamamoto C.I., de Andr. P.A., Pauliquevis T., Andrade M. de F., Oliveira A., Saldiva P.H.N., Taylor P.E., Godoi R.H.M., 2018. Assessing the impact of PM 2.5 on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution* (235), 394–403.

Rao P., Gurney K. R., Patarasuk R., Yang S., Miller C. E., Duren R. M., & Eldering A., 2017. Spatio-temporal variations in on-road CO2 emissions in the Los Angeles Megacity. *AIMS Geosciences.* (3), 239–267.

Stewart I.D., Oke T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin American Meteorological Society*. (93), 1879–1900.

Yamagata Y., Yoshida T., Murakami D., Matsui T., Akiyama Y., 2018. Seasonal urban carbon emission estimation using spatial micro Big Data. *Sustainability.* (10), 1–11.

Zhou Y., Gurney K., 2010. A new methodology for quantifying on-site residential and commercial fossil fuel CO2 emissions at the building spatial scale and hourly time scale. *Carbon Management*. (1), 45–56.

THE RELATIONSHIP BETWEEN RELIEF AND CLIMATE AT SUB-REGIONAL SCALE IN THE SOUTHWEST OF MATO GROSSO STATE, BRAZIL

ARAÚJO A.[1,3], FERREIRA H.[2], PEREIRA L.[1], FERREIRA E.[1]

1 State University of Mato Grosso, Mato Grosso, Brazil (ribeiro.araujo@unemat.br)
2 University of São Paulo, São Paulo, Brazil
3 State School, Mato Grosso, Brazil

Summary: *The southwestern region of the Federative State of Mato Grosso, in Brazil, at the northern limit of the Brazilian Pantanal, is highlighted by a sub-regional climatic spatial pattern, which is influenced by climatic phenomena. The region has a tropical climate with dry winter, with altimetric variation between 200 and 600 meters, with different vegetation and relief forms associated with social activities, that is, areas of rural management. The objective of this work is to analyze the relationship between climate relief and the influence of the landscape spatial condition and the relief in the inter-annual climatic variability of a subregional scale in that region. Precipitation and air temperature data from meteorological stations in municipalities in the region and landscape and relief conditions were analyzed. These data were interpreted to identify the relationship between them. The results show a relationship between the spatial distribution of climatic variables and the forms of relief in the landscape organization, characterizing climatic variability at a sub-regional scale. Finally, there was a difference in the total annual rainfall of 600 mm between the plateau and the plain. In air temperature, it indicates an average difference of 3 ° C, that is, in the plain it is warmer than in the plateau*.

Key words: *Brazil*; *Mato Grosso*; *climate variability*; *climate scale*; *landscape*

Résumé *: **La relation entre le relief et le climat à l'échelle sous-régionale dans le sud-ouest de l'état du Mato Grosso au Brésil.** La région sud-ouest de l'État fédératif du Mato Grosso, au Brésil, à la limite nord du Pantanal brésilien, est mise en évidence par un modèle spatial climatique sous-régional, qui est influencé par les phénomènes climatiques. La région a un climat tropical avec un hiver sec, avec une variation altimétrique entre 200 et 600 mètres, avec différentes formes de végétation et de relief associées aux activités sociales, c'est-à-dire des zones de gestion rurale. L'objectif de ce travail est d'analyser la relation entre le relief climatique et l'influence de la condition spatiale du paysage et le relief de la variabilité climatique interannuelle d'une échelle sous-régionale dans cette région. Les données sur les précipitations et la température de l'air des stations météorologiques des municipalités de la région ainsi que les conditions du paysage et du relief ont été analysées. Ces données ont été interprétées pour identifier la relation entre elles. Les résultats montrent une relation entre la distribution spatiale des variables climatiques et les formes de relief dans l'organisation du paysage, caractérisant la variabilité climatique à l'échelle sous-régionale. Enfin, il y avait une différence dans les précipitations annuelles totales de 600 mm entre le plateau et la plaine. En température de l'air, il indique une différence moyenne de 3 ° C, c'est-à-dire qu'en plaine il fait plus chaud que sur le plateau*.

Mots clés : *Brésil*; *Mato Grosso*; *variabilité climatique*; *échelle climatique*; *paysage*

Introduction

Studies on the identification of climatic types in Brazil show the regional state of Mato Grosso a climate of regional scale that covers practically the entire state. Beck *et al.* (2018) and Dubreuil *et al.* (2017) show that the region has an Aw type climate (tropical with dry winter), according to the Köppen climate classification. In turn, Alvares *et al.* (2013), in addition to the Aw climate, clarify that the northwest of the state is a type of Am (tropical monsoon) climate, on the border with the northern region of Brazil, in contact with the Amazon rainforest. Therefore, the Aw climate type is widespread in most of the Brazilian Midwest and in Mato Grosso at the regional level.

On the scale of regional climate divisions for Brazil, it is not possible to detail climate characteristics at the sub-regional level. This detailed spatial scale is achieved taking into account the attributes of the physical environment of each location, in addition to the quantitative climatic data. The sub-regional climate scale is organized by means of geographical

climate controls and its analysis occurs through a surface meteorological network and systematic mapping, covering areas of up to hundreds of kilometers on the surface (Monteiro, 2013). It is known, for example, that relief can influence climatic variability based on characteristics such as height, shape and orientation of the terrain (Oliveira & Galvani, 2015). Relationships between relief and spatial and temporal distribution of climatic attributes have been identified in other regions of Brazil (Jardim *et al.*, 2019; Oliveira & Galvani, 2015; Wanderley *et al.*, 2018). In Mato Grosso, relating climate attributes and controls, it was possible to recognize Climate Units in the state (Tarifa, 2011), with different annual climate variability (in water balance regimes, temperatures) and different scalar levels (regional, sub-regional, local, topoclimatic).

The southwestern region of the State of Mato Grosso, on the northwestern limit of the Brazilian Pantanal (Mato Grosso territory), presents a sub-regional spatial pattern in its climatic variability, influenced by climatic controls, such as relief and soil cover. The region has a predominant tropical climate with dry winter (Aw), altimetric variation of about 600 meters and areas of savanna vegetation and rural management. It is observed that the climate represents an important factor for the economy of Mato Grosso, since the state is considered the breadbasket of Brazil, with high production of soy, corn, cotton and cattle (Moreno & Higa, 2017). The southwestern region of the state stands out for the extensive production of cattle, in addition to being marked by the contact of the edges of the plateau and the floodplain of the Pantanal, which are strongly influenced by the climatic conditions existing there, given the diversity of the landscape. In this sense, the objective of this work was to analyze the influence of the relief on interannual climatic variability on a sub-regional scale in the southwest of the State of Mato Grosso, in Brazil.

1. Data and Methods

To analyze the influence of the relief on the climate of the southwest region of the State of Mato Grosso, in Brazil, three local municipalities with rainy seasons and meteorological stations were chosen as the study area. The municipalities are: Pontes e Lacerda, Vila Bela da Santíssima Trindade and Commodore. Figure 1 shows the location of the municipalities and the spatialization of some of their physical aspects, which are used as data referring to landscape conditions in different locations in the region, subsequently compared with the climatic data also observed.

Climatic and landscape data are analyzed in the region with reference to the three local municipalities, with different characteristics in their interiors. Bridges and Lacerda and Vila Bela da Santíssima Trindade (Fig.1 '1', '2'), to the south, are located in sedimentary geomorphological provinces of plains and depressions in the Guaporé River valley, with altitudes between 200 and 300 meters. Both municipalities have similar landscapes; they are bathed by the hydrographic basin of the Guaporé River, a tributary of the Amazon basin; they have floodplains and residual plateaus that reach 1,000m of altitude; and have savanna type vegetation (Brazilian savannah) and rural management areas. Commodore (Fig.1 '3'), to the north, is located predominantly on the sedimentary plateau of Parecis, at approximately 600m of elevation; and it has transition vegetation between savanna and tropical forest types (Amazonian forest). Pontes and Lacerda, Vila Bela da Santíssima Trinidade and Comodoro have, respectively, 41, 14 and 18 thousand inhabitants and the percentage of their urban populations is 84, 36 and 69% (IBGE, 2017), whose urban areas of their municipal headquarters have 18, 5 and 8 km², respectively.

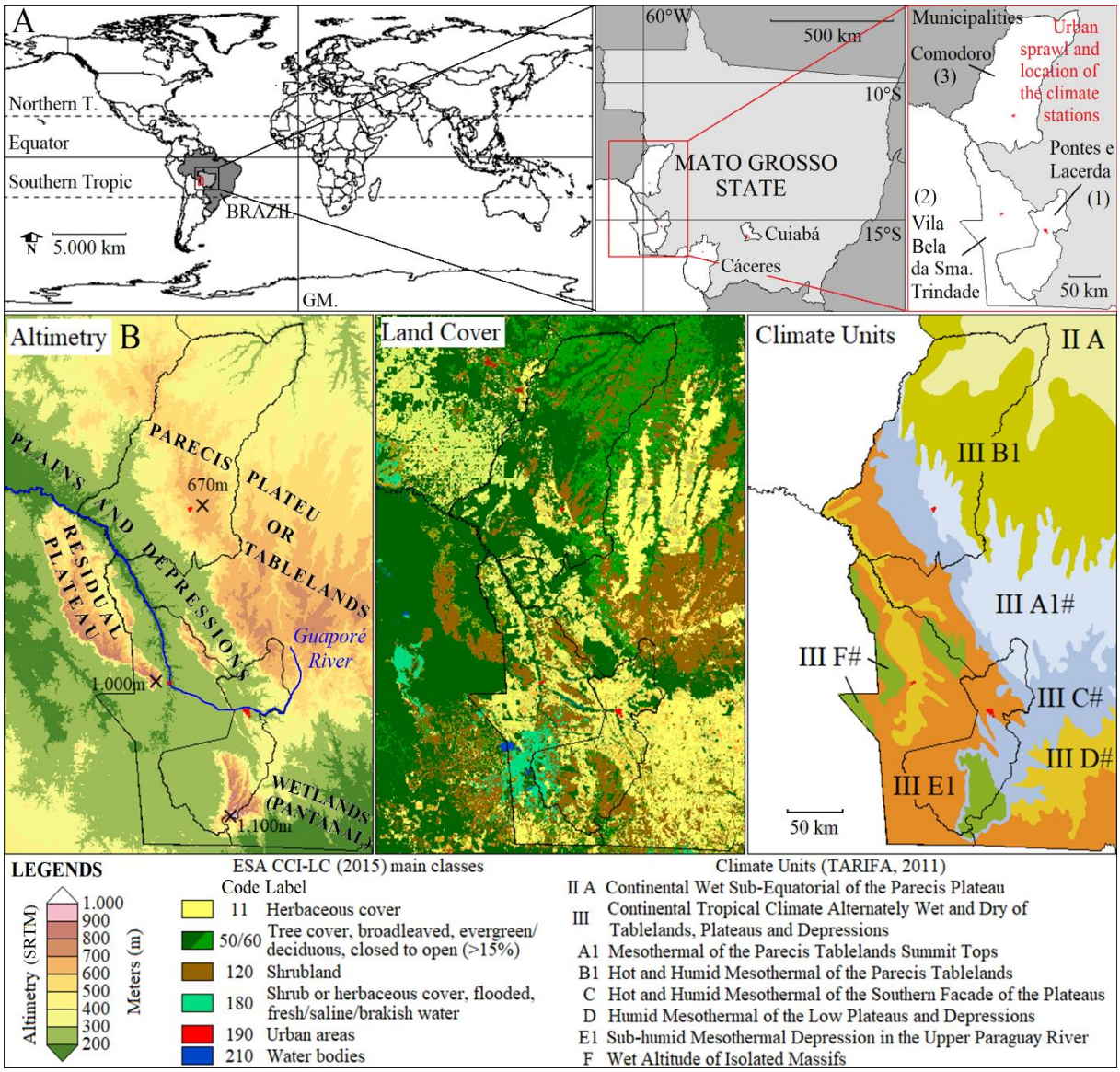


Figure 1. Location (A) and physical aspects (B) of the study area.

The classification of Climate Units (UC) for Mato Grosso (Tarifa, 2011) subdivides the state into units of different types, differentiated by patterns of variability in the attributes and climatic controls of their locations. Altogether, hierarchically, the UCs are grouped into: regional climatic units, differentiated by annual climatic patterns (I - Continental wet equatorial with defined dry season; II - Continental wet subquatorial; III - Continental tropical climate alternately wet and dry); intra-regional or sub-regional subunits (Monteiro, 2013), distinguished by the integration of regional climatic conditions and locational conditions (A, B, C ...); subunits at the local level, which distinguish local particularities in the sub-regions (1, 2, 3 ...); and the topoclimatic level of intralocal particularities, which characterize details in climatic attributes (a, b, c ...). Classes vary according to the characteristics of your locality, temporality of regimes (duration of rainy and dry seasons) and magnitude of water balance and average temperatures.

With the increase in latitude in the Southern Hemisphere and the distance from the Equatorial climate zone in the interior of the tropical zone, there is a spatial variation from a tropical climate to a temperate climate (Alvares *et al.*, 2013). However, in the case of this study region, the condition of the relief in the difference between the Parecis plateau and the plains of the Guaporé River creates variability in the condition of tropical climatic attributes. This subdivides

the type III UC, as shown in Figure 1, into sub-regional units, strongly influenced by the conditions of the landforms of the areas. Pontes e Lacerda is located in contact between UCs III C2 and III E1, which define an average climatic condition between the plateau transition; Vila Bela da Santíssima Trindade is almost completely inserted in a tropical lowland climate (III D1b and III E1); Commodore is located between UCs III, influenced by the altitude of the Parecis plateau and the border with a more humid region to the north, II A.

Precipitation and air temperature data from pluviometric stations and automatic meteorological stations located within each of the three municipalities in the region were used. Precipitation data are from the National Water Agency (ANA) of Brazil (Pontes and Lacerda stations, Vila Bela da Santíssima Trinidade and Comodoro, respectively: ANA codes: 1559000; 1559006; 1359001). Air temperature data are from the National Institute of Meteorology (Inmet) of Brazil (OMM codes: 86702; 86701; 86700). The pluviometric stations and the selected meteorological stations are located close to the urban areas of the municipalities analyzed. Pontes and Lacerda and Vila Bela da Santíssima Trinidade stations are at an average altitude of 250m and an average distance of 70 km from each other. Comodoro stations are at an average altitude of 600m and an average distance of 150 km from the stations mentioned above. Its location was not detailed in Figure 1 due to the fact that the detail scale is small. The locations for collecting precipitation and air temperature data are not necessarily identical, but both are representative of the same climatic condition at each location. Precipitation data from 1989 to 2018 were used. For the air temperature, a time series from 2008 to 2018 was used. For both variables, in the analysis of the monthly frequency of the data series, the monthly totals with failures of data in daily readings; whereas, in the analysis of the annual data, the annual totals were removed with failures in the monthly totals.

Frequency graphs were prepared with the total monthly and annual precipitation, in order to compare the seasonal and annual behaviors for the respective studied locations. On the same time scale, the monthly averages of average, maximum and minimum air temperatures were also estimated and plotted. The annual range of air temperature averages was also estimated. Climatic data were analyzed by comparing their variability according to the different locations with different physical characteristics: the lowland and plateau areas on a sub-regional climate scale.

2. Results

The results show that a sub-regional climatic variability was observed from north to south, influenced by the relief, higher to the north, on the Parecis plateau, where Comodoro is located, and lower and flatter to the south, in the Guaporé River valley, which permeates the municipalities of Pontes e Lacerda and Vila Bela da Santíssima Trindade. Figure 2 presents the summary of the monthly distribution of the series of analyzed climatic data, precipitation and air temperature.

The monthly distribution of precipitation (Fig.2A) in Pontes e Lacerda (1) and Vila Bela da Santíssima Trindade (2) is similar in relation to the climatic conditions of the localities. It is observed in the first and last month of the year (January-March, November-December), during the summer rainy season in the Southern Hemisphere, the monthly totals are close to 250 mm. The condition of the tropical climate with dry winter (Aw), influenced by continentality, means that, in the months of the winter season (May-September), the total or near monthly rainfall is not uncommon. This precipitation condition characterizes the condition of an alternately rainy and dry climate in the region (Tarifa, 2011; Moreno & Higa, 2017), a common pattern of the Köppen Aw type (Beck *et al.*, 2018; Alvares *et al.*, 2013; Dubreuil *et al.*, 2017). The monthly totals of precipitation of Commodore (3) differ in magnitude and in the climatic pattern of the previous ones. In March, monthly precipitation totals reach more than 300 mm; in '1' and '2',

there is a decrease in precipitation totals from January to February and March, which is not seen in '3'. This condition is associated with a rainier climatic type, close to the Equatorial type, and with the effect of the higher elevation on the Comodoro weather station.

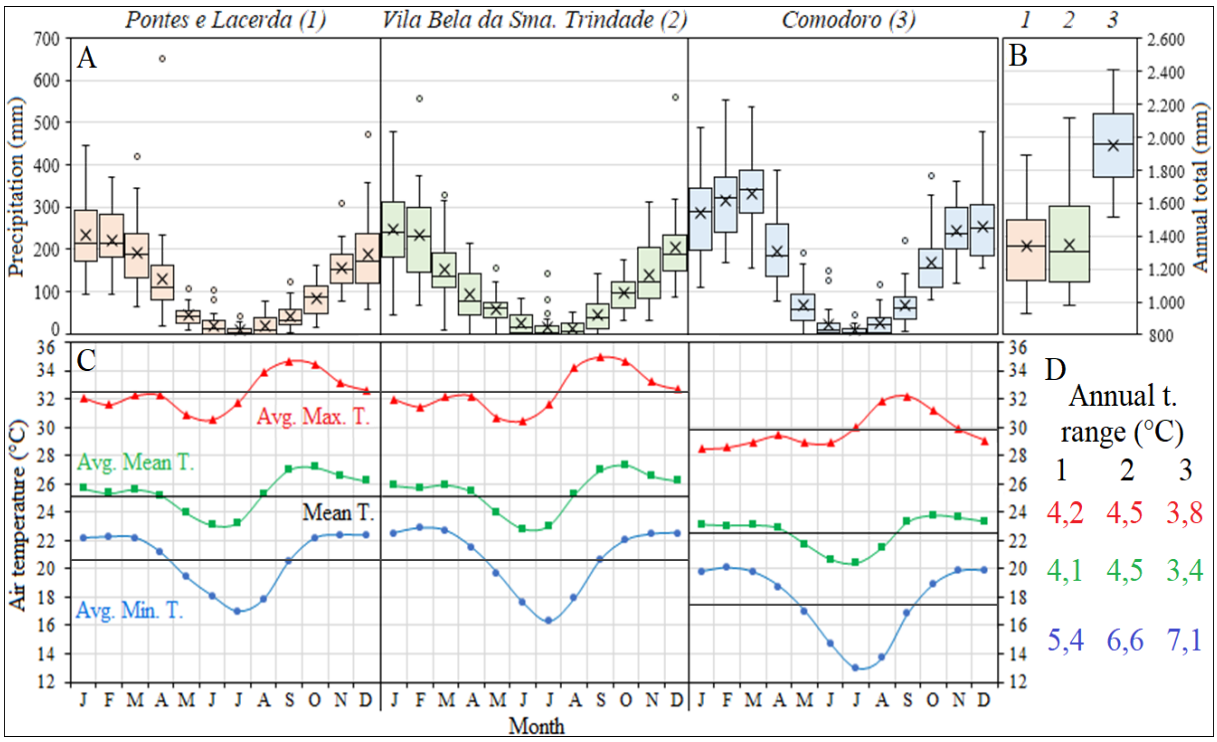


Figure 2. Frequencies of total monthly (A) and annual (B) precipitation, and monthly air temperature averages (C) and annual amplitudes (D).

Annual precipitation totals (Fig.2B) show the difference between the conditions of the plain and the plateau. On the plain, average totals close to 1,400 mm are observed; on the plateau, annual totals reach an average of 2,000 mm. Among them, there is a difference of about 500 mm per year. The effect of this on vegetation is that there is a transition between savannah (Brazilian savannah) and tropical forest in the highlands. On the plain, longer periods of drought favor the presence of savanna vegetation.

As with precipitation, the monthly variation in air temperature (Fig.2C) between '1' and '2' is quite similar; as their annual averages are practically identical (black line). In the months of the rainy season, the average monthly temperatures are more homogeneous, remaining close to 26, 32 and 22 ° C, for average, maximum and minimum temperatures, respectively, in the plain (1 and 2). In the plateau (3) of 22, 29 and 20 ° C, where, in the months of the dry period, between May and September, it presents differently from the rainy season and there is still a greater thermal amplitude in the region. In the localities analyzed, there are low monthly averages in June and July and high temperatures in September, at the end of the dry period. This greater thermal amplitude is due to drier winter conditions and sporadic fronts in the region at this time of year (Tarifa, 2011). This amplitude of the dry period defines the average, maximum and minimum annual temperatures in the locality. There is a larger annual temperature range on the plain than on the plateau. The wetter plateau reduces its annual temperature variation than in the plains (Fig.2D). This is not observed in the minimum annual average, as the combination of more humidity and low temperatures causes greater thermal amplitude of the analyzed places.

Conclusions and Discussion

The results showed a relationship between the spatial distribution of the climatic variables and the landforms, characterizing climatic variability on a sub-regional scale. Similar to other parts of Brazil (Jardim *et al.*, 2019; Oliveira & Galvani, 2015; Wanderley *et al.*, 2018), the effect of relief on climate variability was observed in the southwest region of Mato Grosso.

Climatic contrasts were verified in the study area on a sub-regional scale (Monteiro, 2013). The analyzed data from the municipalities located in the lower and flat lands, Pontes e Lacerda and Vila Bela da Santíssima Trindade, show lower annual precipitation totals and higher average temperatures. The plateau region, represented by the municipality of Comodoro, presents higher annual precipitation totals and milder temperatures for the place.

Literature

Alvares C. A., Stape J. L., Sentelhas P. C., Gonçalves J. L. M. & Sparovek G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 22, n. 6.

Beck H. E., Zimmermann N. E., McVicar T. R., Vergopolan N., Berg A., & Wood E. F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, y. 5.

IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics), 2017. *IBGE Cidades*. URL: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt. Access in: July 2019.

Dubreuil V., Fante, K. P., Planchon O., & Sant'anna Neto J. L., 2017. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo*, n. 41.

Jardim C. H., Galvani E., Silva M. R., & Garcia R. A., 2019. Clima em áreas limítrofes ao planalto meridional do espinhaço: Belo Horizonte, Sete Lagoas e Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais-Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, n. 15, v. 25.

Monteiro C. A. F., 2013. Teoria e Clima Urbano. In: Monteiro C. A. F., & Mendonça F. (orgs.). *Clima Urbano.* São Paulo, Contexto, ed. 2.

Moreno G., & Higa T. C. S. (orgs.), 2017. *Geografia de Mato Grosso: território, sociedade, ambiente.* Cuiabá, Entrelinhas, ed. 2.

Oliveira M. R. P., & Galvani E., 2015. Avaliação do efeito orográfico na variação das precipitações no perfil longitudinal Paraty (RJ) e Campos do Jordão (SP*). Entre-Lugar*, Dourados-MS, y. 6, n. 11.

Tarifa J. R., 2011. *Mato Grosso - Clima: análise e representação cartográfica*. Cuiabá, Entrelinhas.

Wanderley L. S. A., Nóbrega R. S., Moreira A. B., & Menezes R. S. C., 2019. A relação entre o relevo e o clima como proposição de caracterização da fisiologia da paisagem em Pernambuco, Brasil. *Geo UERJ*, n. 34.

RISQUES CLIMATIQUES ET PRODUCTION AGRICOLE AU BENIN : EFFETS, PERCEPTIONS ET STRATEGIES D'ADAPTATION

ATIDEGLA S.C.[1], KOUMASSI H.D.[2], HOUNMENOU C.[3]

1 Laboratoire d'hydraulique et de Maîtrise de l'Eau, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin (atideglaser@gmail.com)
2 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème Développement, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin
3 Laboratoire de Biomathématiques et d'Estimations Forestières, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Résumé : *La présente étude donne un aperçu sur les effets des risques climatiques sur la production agricole en régime pluvial dans la Commune de Sô-Ava. Les données utilisées sont issues entre autres de l'analyse de la variabilité interannuelle des températures et des précipitations, des tests statistiques, des investigations socio-anthropologiques et des tests de rendement de trois principales cultures. Les résultats obtenus ont révélé des extrêmes climatiques qui se sont traduites par inondations, sécheresse, et qui ont des conséquences sur la baisse des rendements agricoles et le bouleversement du calendrier agricole classique. Ainsi, à l'issue des essais agronomiques conduits au cours des années 2016, 2017 et 2018, les rendements de la tomate, du piment et de la patate douce ont régressé respectivement de 34%, 44% et 48%. En réponse aux effets des risques climatiques, les producteurs ont développé plusieurs stratégies d'adaptation dont notamment la diversification des sources de revenus (91%), l'agriculture de contre saison (100%) et l'abandon de la saison classique de production (63%).*

Mots clés : *inondations ; sécheresse ; rendements ; stratégies d'adaptation*

Summary: ***Climate risks and agricultural production in Benin: impacts, perceptions and adaptation strategies.*** *The present study brings into focus the effects of climatic risks on agricultural production during rainy season in the Commune of Sô-Ava. Data used come among others from the analysis of climate factors, the statistic tests, the social and anthropologic investigations and the yield trials of three main crops. The results revealed some climatic extreme, which lead floods, drought, and caused drop of yields and disruption of the classic cropping calendar. Thus, at the end of the agronomic tests conducted in 2016, 2017 and 2018, the yields of tomato, pepper and sweet potato decrease respectively of 34%, 44% et 48%. To overcome the effects of climate risks, producers developed adaptation strategies such as the diversification of income sources (91%), the dry season cropping (100%) and the abandonment of rainy season cropping (63%).*

Key words: *floods; drought; yields; adaptation strategies*

Introduction

De tout temps, les conditions climatiques ont eu une influence déterminante sur les écosystèmes naturels et les sociétés humaines. Pour FAO (2008), l'agriculture est le secteur le plus affecté par le changement des régimes climatiques. Partant, l'agriculture est sous la menace de fluctuations persistantes de certains paramètres climatiques que sont notamment : la température, les précipitations, l'ensoleillement, etc. Dans un tel contexte climatique défavorable au regard des impacts inévitables sur l'agriculture, la question de l'adaptation constitue une urgence pour le secteur rural béninois en général et les producteurs de la Commune de Sô-Ava en particulier. C'est pourquoi, l'objectif visé par le présent travail est d'analyser les effets des risques climatiques sur la production agricole dans la Commune de Sô-Ava, d'appréhender les perceptions des producteurs des irrégularités pluvio-thermométriques ainsi que les stratégies mises en œuvre pour s'adapter aux changements.

1. Données et Méthodes

1.1. Données

Les données collectées sont : i) les données climatologiques (précipitations, températures et évapotranspiration) extraites des fichiers de la Direction Nationale de la Météorologie à Cotonou pour étudier les indicateurs de risques climatiques et la situation climatique par rapport

aux saisons de production agricole, ii) les données socio-anthropologiques relatives à la perception des producteurs sur les causes et conséquences des risques climatiques sur les cultures ainsi que les adaptations collectives et individuelles réalisées et iii) les essais agronomiques pour la mesure des rendements de la tomate, du piment et de la patate douce.

1.2. Méthodes

1.2.1. Techniques d'enquêtes et traitement des données socio-anthropologiques

Des enquêtes socio-anthropologiques ont été conduites auprès des producteurs concernés par le phénomène sur la base d'entretiens individuels et structurés. Les villages cibles et l'effectif des producteurs enquêtés sont respectivement Ahomey-Gblon (30), Ahomey-Houmè (28) et Houkèkomè (22). Aucun échantillonnage n'a été effectué au regard de l'effectif disponible de la population enquêtée (80 producteurs) à qui un questionnaire a été administré. Les trois critères de choix de ces producteurs étaient : i) avoir pratiqué les activités agricoles au cours des cinq dernières années dans la Commune de Sô-Ava, ii) être âgé d'au moins trente (30) ans et avoir sa résidence dans l'un des trois arrondissements retenus par l'étude. Enfin, les données relatives aux stratégies développées face aux effets du changement climatique ont fait l'objet de calculs de fréquence absolue et relative puis représentées sous forme de diagrammes en barre et de tableau.

1.2.2. Traitement des données climatologiques

Le régime thermo-pluviométrique a été diagnostiqué à partir de l'analyse des indices pluviométriques sur la série 1980 à 2018. La moyenne arithmétique est employée pour étudier les régimes pluviométriques et thermométriques à Sô-Ava ainsi que les tests de Pettitt, (1979) et de celui de Buishand, (1984) pour détecter la rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques. Enfin, la méthode d'analyse agro climatique en région tropicale de Franquin, (1968) sera utilisée pour interpréter le régime pluviométrique.

1.2.3. Essais agronomiques et mesure du rendement

Trois paysans ont été suivis de 2016 à 2018 durant trois campagnes agricoles pendant la grande saison de pluies d'Avril à Juillet. La parcelle élémentaire d'essai retenue par spéculation et par campagne est de 400 m^2 en 3 répétitions sans randomisation. Les divers entretiens (sarclage et protection phytosanitaire) ont été identiques au niveau de chaque parcelle. Les producteurs de la zone n'utilisent pas les engrais minéraux du fait du bon niveau de fertilité des sols de la plaine inondable. Il est procédé au moment de la récolte, à la pesée des produits obtenus au niveau du carré de densité installé sur chacune des neuf parcelles.

2. Résultats

2.1. Indicateurs de risques climatiques

La Commune est marquée par une forte variabilité pluviométrique (Fig.1) qui se présente sous la forme d'une alternance d'années déficitaires et excédentaires. Les déficits les plus prononcés sont enregistrés au cours des années 1971, 1973, 1976, 1977, 1980, 1981, 1984 et ceux excédentaires sont 1988, 1993, 1997, 2009, 2010 et 2017. Cela a permis d'identifier trois phases dans l'évolution de la pluviométrie sur la station. La première phase est marquée par la prédominance des déficits sur la station, et concerne la période 1970- 1986. La deuxième sous-série est caractérisée par des excédents pluviométriques entre la période 1987-2005. La troisième phase est caractérisée par une très forte instabilité dans l'évolution de la pluviométrie et concerne la période 2005- 2018. En somme, la tendance pluviométrique reflète bien la grande variabilité pluviométrique entre 1981 et 2018. L'application des tests de Pettitt et de Buishand à la série des données (1970-2018) a permis d'identifier à un seuil de significativité de 95 %,

une rupture chronologique en 1986 dans la Commune de Cotonou. La série 1960-2018 utilisée peut être subdivisée en deux sous périodes : 1960-1986, période sèche et 1986-2018 période d'excédent pluviométrique.

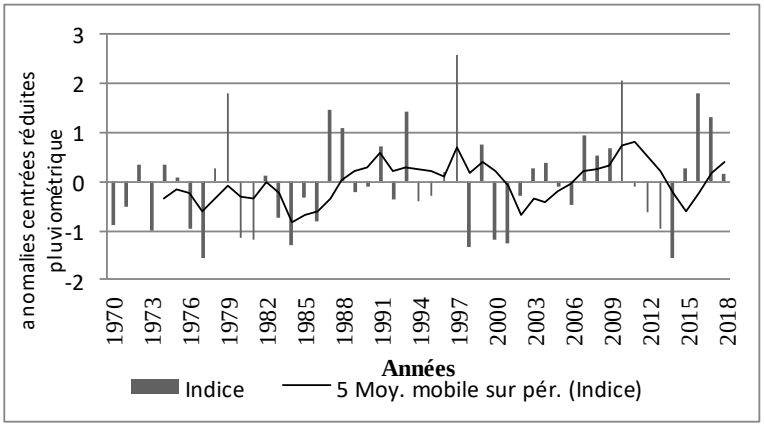


Figure 1. Anomalies centrées réduites pluviométrique de Sô-Ava

Par ailleurs, tous les mois de l'année ont connu une nette augmentation de la température minimale, variant entre 0,58°C (août) et 1,05°C (avril) (Fig.2). Le mois ayant connu la plus importante augmentation des températures minimales est celui d'avril.

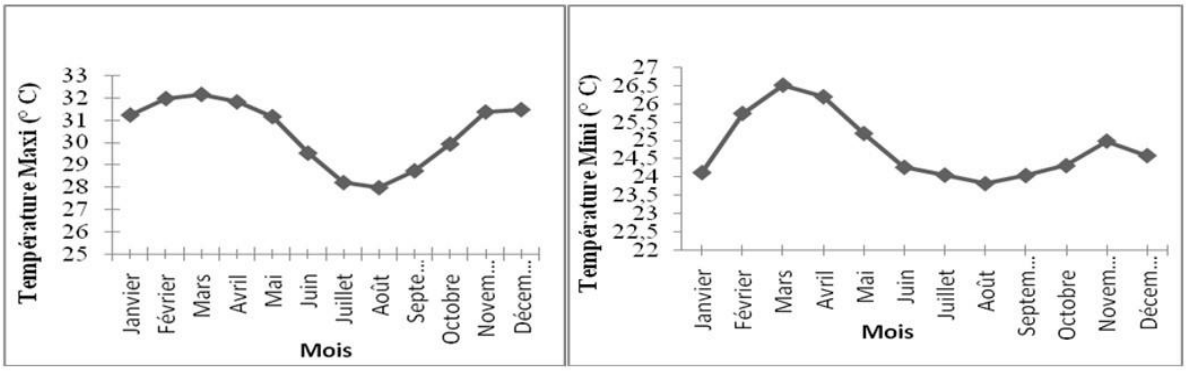


Figure 2. Variation des températures maximales et minimales de Sô-Ava

L'application de la méthode d'analyse agro climatique (Fig.3) en région tropicale de Franquin, (1968) a montré que le régime pluviométrique a suivi un rythme annuel unimodal au lieu du bimodal qu'on lui connaissait, il y a de cela quelques années.

En outre, le bilan climatique (BC) qui est un indicateur de disponibilité en eau du sol (Fig.4), traduit le rythme des excédents ou des déficits en eau dans la zone d'étude.

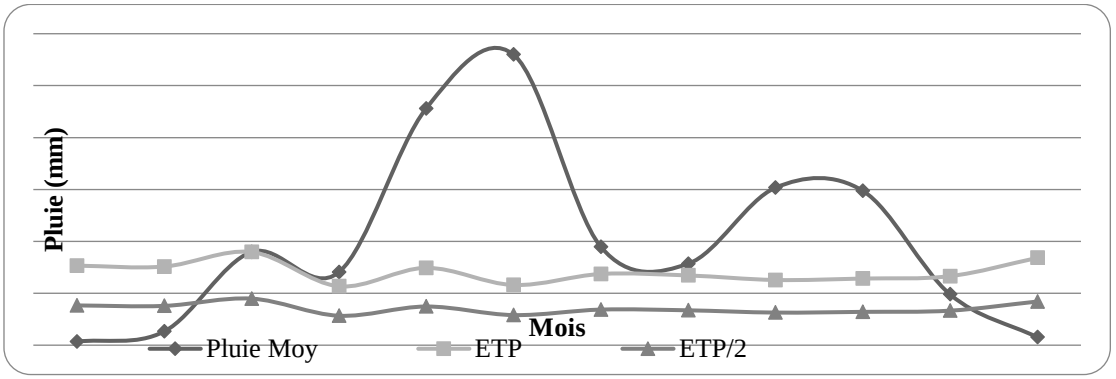


Figure 3. Courbe de Franquin réalisée à partir de la pluviométrie et de l'ETP à Sô-Ava de 2016 à 2018

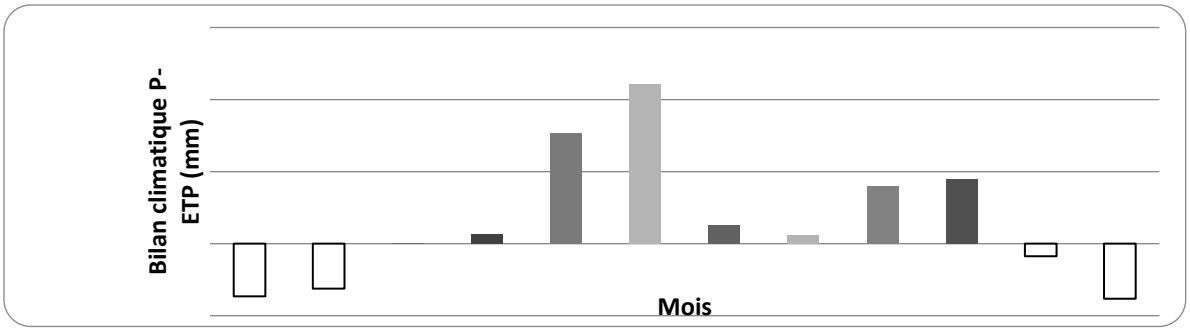


Figure 4. Bilan climatique (P-ETP) sur la période 2016-2018

2.2. Effets des risques climatiques sur les principales cultures

Le tableau 1 fait l'état des baisses de rendements engendrées par les risques climatiques au cours des trois années de production (2016-2018) de la grande saison des pluies (avril-juillet) sur la plaine.

Tableau 1. Evolution des rendements moyens de la tomate, du piment et de la patate douce de 2016 à 2018

	2016	*2017*	*2018*	*Taux de regression (%)*
Tomate (t/ha)	8	6.8	5.2	- 31
Piment (t/ha)	5.9	4	3.3	- 44
Patate douce (t/ha)	6.4	4.6	3.3	- 48

2.3. Perceptions socio-anthropologiques de l'évolution du climat

D'une manière générale, les causes attribuées par les populations à ces changements rendent l'homme fautif de par ses actions et son comportement sur le milieu mais également font état d'une évolution intrinsèque de la nature elle-même. Des différentes informations recueillies auprès des populations rurales, il ressort que les causes des changements climatiques vécus actuellement sont connus de 90% des enquêtés tandis que 10% déclarent ne pas les connaître. Ainsi, selon 45 % des enquêtés, les manifestations sont dues aux « faiseurs » et « empêcheurs » de pluies, pour 10% à Dieu ou à la nature elle-même et pour 35% au non respect des normes sociales et des divinités. L'évolution du climat, est caractérisée par la diminution du nombre de jours de pluies (90%), la rupture des précipitations (95%), l'élévation de la température et chaleur excessive (95%), la diminution des hauteurs de pluie (98%), la longueur de la période pluvieuse (99%) le démarrage tardif et/ou la mauvaise répartition des pluies (96%) et la submersion des cultures par les eaux d'inondation (100%).

2.4. Stratégies d'adaptation à la variabilité climatique

Les stratégies d'adaptation visent à mitiger, voire à surmonter les risques à travers des comportements résilients en vue de sauvegarder les activités agricoles, de contribuer à l'autosuffisance alimentaire et d'accroître le revenu. Il s'agit de : 100% des producteurs s'adaptent aux risques climatiques en pratiquant l'agriculture de contre saison (ACS), 77% pratiquent l'irrigation des parcelles et des cultures (IPC), 30% adoptent les semences de variétés précoces (SVP), 79% modifient les dates de semis (MDS), 91% diversification les sources de revenus (DSR), 63% abandonnent la saison de production (ASP).

Conclusions et Discussion

Discussion

Les résultats relatifs aux indicateurs de risques climatiques confirment ceux obtenus par plusieurs auteurs notamment Ogouwalé, (2006), Vissin *et al.*, (2007) et Atidegla *et al.*, (2017). Les années excédentaires et les années déficitaires sont des périodes au cours desquelles, respectivement les excès et les insuffisances des hauteurs de pluies, ont été très préjudiciables aux cultures.

Pour ce qui est des températures, les résultats déjà rapportés par Ogouwalé, (2006) sur le Bénin méridional, et central par Codjo *et al.*, (2013) sur la Commune d'Adjohoun, sont conformes à ceux obtenus. S'agissant de la température maximale, la situation demeure la même et l'augmentation est comprise entre 0,29°C (septembre) et 0,56°C (avril). Le mois d'avril a également battu le record. Ces résultats correspondent à ceux des travaux de Ogouwalé (2006), Akindélé *et al.*, (2013) et Codjo *et al.*, (2013).

Les rendements obtenus sont en phase avec le contenu des rapports annuels des années 2013, 2014 et 2015 du Secteur Communal pour le Développement Agricole (SCDA) de Sô-Ava. Ils sont également similaires à ceux obtenus dans d'autres régions du Bénin par Atidegla *et al.*, (2017) et Bamahossovi *et al.*, (2016). Les principales causes des pertes et baisses de rendement sont selon les producteurs enquêtés : la longueur de la saison des pluies (99%), la rupture des précipitations (95%), la réduction du nombre de jours de pluies (90%) et la submersion des cultures par les eaux d'inondation (100%). En effet, bien que certaines exploitations soient exposées aux dégâts causés par les volumes trop importants d'eau au milieu de la 1[ère] saison, il est à souligner les effets désastreux des inondations cycliques causant beaucoup de désagréments aux productions et aux populations pendant la crue.

Enfin, les producteurs de la zone ont des perceptions divergentes des causes des changements climatiques, mais en relations étroites avec les croyances de chacun, même si certains points de vue sont partagés. Cependant, malgré les divergences des perceptions, c'est heureux qu'ils aient adopté en majorité les mêmes stratégies pour faire face aux changements climatiques.

Conclusion

Dans la zone d'étude, les rendements des cultures testées de 2016 à 2018, ont régressé de 34% (tomate), 44% (piment) et 48% (patate douce) à cause des inondations. Face aux manifestations du climat, les producteurs ont adopté plusieurs stratégies d'adaptation dont les plus appliquées sont : l'agriculture de contre saison (ACS), l'irrigation des parcelles et des cultures (IPC), la modification de la date de semis (MDS), les semences de variétés précoces (SVP), la diversification des sources de revenus (DSR) et l'abandon de la saison de production (ASP). Toutefois, la stratégie favorable à eux pourrait être la pratique de l'agriculture de contre saison car présentant moins de risques par rapport au régime fluvial. Enfin, il convient de retenir que les principaux déterminants de l'adoption des stratégies sont les variables de perception. Partant, il importe que les techniques d'adaptation mises en place par les producteurs soient testées et analysées par les scientifiques dans le but de contribuer à la réduction effective de la vulnérabilité, à l'adaptation des sociétés et des écosystèmes au changement climatique.

Bibliographie

Akindélé A. A., 2013. Vulnérabilité et adaptation de la production vivrière aux contraintes climatiques dans la Commune de Adja-Ouèrè. *Actes du 26ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie,* 3-7 Septembre 2013, Cotonou, Bénin, 6p.

Atidegla C. S., Koumassi D. H., & Houssou S. E., 2017. Variabilité climatique et production maraîchère dans la plaine inondable d'Ahomey-Gblon au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5): ISSN 1991-8631, 1-16.

Bamahossovi C., Djessonou F.N.S.C., Akindele A. A., & Ogouwalé E., 2016. Effets des risques climatiques sur la production vivrière dans la Commue de Lokossa (Bénin). *European Scientific Journal*, 12 (29), ISSN: 1857 – 7881, 1-10.

Buishand A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 58, 51- 69.

Codjo H. T., Lamodi F., Agbelessi S., Ogouwale R., & Ogouwale E., 2013. Stratégies paysannes d'adaptation aux changements climatiques dans la Commune de Pobè. *Actes du 26ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 3-7 Septembre 2013, Cotonou, Bénin, 164-169.

FAO, 2008. L'eau pour l'agriculture et l'énergie en Afrique : les défis du changement climatique'', Ateliers régionaux, Syrte, Jamahiriya Arabe Libyenne, 15-17. URL : *www.sirtewaterandenergy.org/.../Regional-Workshops-Fr.pdf*

Franquin P., 1968. Analyse agroclimatique en région tropicale: les conditions hydriques. s. l : *Cahier ORSTOM*, Série biologique, 5, 15-23.

Ogouwale E., 2006. *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire*. Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH/ EDP/ UAC, Cotonou, Bénin, 302p.

Pettitt A. N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 28, n° 2, 126-135.

Vissin E., Boko M. Perard J., Houndenou C., 2003. Recherche de rupture dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin du fleuve Niger. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon, 368-376.

L'UTILISATION DES TRANSECTS MOBILES NOCTURNES ET DES DONNEES SATELLITAIRES POUR CARACTERISER LES ILOTS DE CHALEUR URBAINS DANS L'AGGLOMERATION RENNAISE (BRETAGNE, FRANCE)

BARBOSA H.P., DUBREUIL V.

Université Rennes 2, CNRS, LETG (Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique), UMR 6554, Rennes, France (pbhiago@outlook.com)

Résumé : *Les îlots de chaleur urbains (ICU) reflètent l'impact à l'échelle locale des activités humaines sur les températures. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour étudier l'ICU, notamment les mesures de la température de l'air (fixes et mobiles), les estimations de la température de surface (images satellitaires par télédétection) et la modélisation physique ou géostatistique. L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques spatiales et temporelles des températures de surface et de l'air dans l'agglomération de Rennes (Bretagne, France) en période estivale lors de l'année 2016. Les températures de surface dérivées de l'imagerie thermique du satellite Landsat 8 ont été comparées aux observations des mesures de la température de l'air nocturnes obtenues par des transects mobiles. Des analyses statistiques du coefficient de corrélation linéaire (r) ont été employées pour l'ensemble des données thermiques. Les résultats de cette étude montrent l'importance de combiner différentes méthodes pour caractériser l'ICU.*

Mots clés : *changement climatique ; îlot de chaleur urbain ; transects mobiles ; température de surface ; température de l'air*

Summary: ***The use of night mobile transects and satellite data to characterize urban heat islands in the Rennes agglomeration (Brittany, France).*** *Urban heat islands (UHIs) reflect the local impact of human activities on temperatures. Several methods can be used to study UHIs, including air temperature measurements (fixed and mobile), surface temperature estimates (satellite images by remote sensing) and physical or geostatistical modelling. The objective of this study is to analyze the spatial and temporal characteristics of surface and air temperatures in the urban agglomeration of Rennes (Brittany, France) during the summer period in 2016. Surface temperatures derived from thermal imagery from the Landsat 8 satellite were compared to observations of nighttime air temperature measurements obtained from mobile transects. Statistical analyzes of the linear correlation coefficient (r) were used for the thermal data set. The results of this study show the importance of combining different methods to characterize the UHIs.*

Key words: *climate change; urban heat island; mobile temperature measurements; surface temperature; air temperature*

Introduction

Les recherches sur les îlots de chaleur urbain (ICU) prennent de plus en plus d'importance dans le cadre du changement climatique. Les ICU reflètent l'impact à l'échelle locale des activités humaines sur les températures et ils sont considérés comme l'une des principales manifestations du climat urbain (Oke, 1982 ; Amorim et Dubreuil, 2017). Il en existe trois types : l'ICU atmosphérique de basse couche (*urban canopy layer*), l'ICU de l'atmosphère supérieure (*urban boundary layer*) et l'ICU de surface (Oke, 1978). Ainsi, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour analyser l'ICU, notamment les mesures de la température de l'air (fixes et mobiles), les estimations de la température de surface (images satellitaires par télédétection, Matson *et al.*, 1978) et la modélisation physique ou géostatistique (Foissard *et al.*, 2019).

L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques spatiales et temporelles des températures de surface terrestre (TST) et de l'air (TA) dans l'agglomération de Rennes (Bretagne, France) en période estivale lors de l'année 2016.

1. Données et Méthodes

1.1. Présentation du site d'étude

Rennes est une commune française située dans le Nord-Ouest de la France dans la région Bretagne. La population de Rennes est estimée à 216 815 habitants soit la 11ème plus grande ville de France. L'agglomération (Rennes Métropole) comprend 43 communes et 447 429 habitants (Insee, 2019).

La région de Rennes est sous l'influence d'un climat océanique tempéré, plus précisément le type Cfb selon la classification de Köppen-Geiger (Eveno *et al.*, 2016) caractérisé par des hivers doux et des étés frais. La température moyenne annuelle est de 12,1°C, avec une température maximale quotidienne moyenne en Juillet de 24,5°C et les précipitations sont modérées et constantes tout au long de l'année (pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 700mm ; Foissard *et al.*, 2019).

Trois méthodes différentes pour caractériser le phénomène d'ICU ont été utilisées dans cette étude : 1) la télédétection (pour l'îlot de chaleur de surface : ICS), 2) les mesures itinérantes nocturnes et 3) les mesures fixes de température de l'air (pour l'îlot de chaleur atmosphérique : ICA).

1.2. Données et méthodes de mesure de la TA

Depuis 2004, le programme d'écologie urbaine avec une composante climatique intitulé ECORURB (Ecologie du Rural vers l'Urbain) a permis la constitution d'un réseau des mesures des variables météorologiques avec 16 stations météorologiques automatiques de la marque DAVIS ® : Weather Monitor II et Vantage Pro 2. La station météorologique de Météo-France située à l'aéroport de Saint-Jacques est également disponible (Dubreuil *et al.*, 2010).

En outre, des mesures itinérantes par transects mobiles ont été réalisées. Nous avons utilisé une sonde thermocouple placée dans un abri et l'ensemble est installé sur un mât fixé à une voiture à environ 2 mètres du sol. Nous avons utilisé une console de stockage de données *Weather Monitor 2*. La vitesse de la voiture était d'environ 30 kilomètre par heure (kmh/h) et les itinéraires réalisés ont débuté et ont fini dans la campagne avoisinante de l'aire urbaine de Rennes. La durée de chaque transect a été d'environ 30 minutes pour conserver un ICU représentatif de l'instant de mesures (Foissard, 2015). Nous avons réalisé des campagnes de mesures nocturnes dans des conditions atmosphériques « idéales » pour la mise en place d'un épisode d'ICU, caractérisées par ciel dégagé et vent faible. Enfin, les journées choisies correspondent à des périodes proches de celles du passage du satellite *Landsat* et ont été précédées d'au moins 48 heures sans précipitations. Il s'agit aussi de séquences de journées plutôt chaudes avec des maximas dépassant 30°C.

1.3. Données et méthodes d'estimation de la température de surface

Nous avons utilisé des images satellitaires issues du satellite *Landsat* 8 dont la résolution temporelle est de 16 jours et la résolution spatiale est de 30 mètres. Les scènes utilisées sont : 201/27 et 202/26. Le satellite *Landsat* capture des images sur le site d'étude entre 10h30 et 11h (UTC/GMT). Nous avons effectué des corrections atmosphériques et radiométriques sur les bandes du visible passant des comptes numériques bruts aux réflectances exo-atmosphériques puis au sol sur le logiciel *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling Software (Clark Labs)*. Ensuite, pour estimer la température de surface, nous avons utilisé les formules disponibles sur le site de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (*United States Geological Survey*) en utilisant les paramètres de conversion des comptes numériques (CN) en rayonnement, puis en TST. Nous avons également corrigé les paramètres de radiance et/ou réflectance des bandes

thermiques, rouge et proche infrarouge. Enfin, les images avec les valeurs d'émissivité estimées selon les différents indices ont été intégrées dans le calcul pour l'obtention de la TST en degrés Celsius (°C) (Barbosa *et al.*, 2017).

Les valeurs de températures de surface estimées à partir des images *Landsat* ont ensuite été mises en corrélation pour les différents trajets (Nord – Sud et Nord-Est – Ouest) réalisés sur le site d'étude en utilisant le calcul d'un coefficient de corrélation linéaire (r).

2. Résultats

Les quatre transects de mesures mobiles nocturnes réalisés sur le site d'étude le 16 Juillet 2016 (Fig.1) et le 13 Août 2016 (Fig.2) montrent l'existence des ICA. Le trajet Nord – Sud s'étend sur 14,2 kilomètres avec une variation d'altitude de 70 à 100 mètres alors que le trajet Nord-Est – Ouest s'étend sur 12,7 kilomètres avec une variation d'altitude de 70 à 120 m.

2.1. Campagne de mesure du 16 Juillet 2016

Pour le trajet Nord – Sud (Fig.1), nous avons constaté une différence de TA de 3,3°C avec les valeurs extrêmes de 13,8°C et 17,1°C. Dans les sites proches de Melesse et de Saint-Grégoire (Nord de Rennes) la température n'a pas dépassé 15°C. La TA a augmenté dans l'aire urbaine et dans la zone industrielle de Saint-Grégoire. Le pic maximal de la TA a été enregistré lors du passage aux Champs Libres (Centre-ville de Rennes). La TA est restée élevée dans la zone commerciale située au Sud de Rennes (Centre Commercial Alma). Après le passage sur la rocade Sud vers la campagne, une baisse de la TA a été constatée.

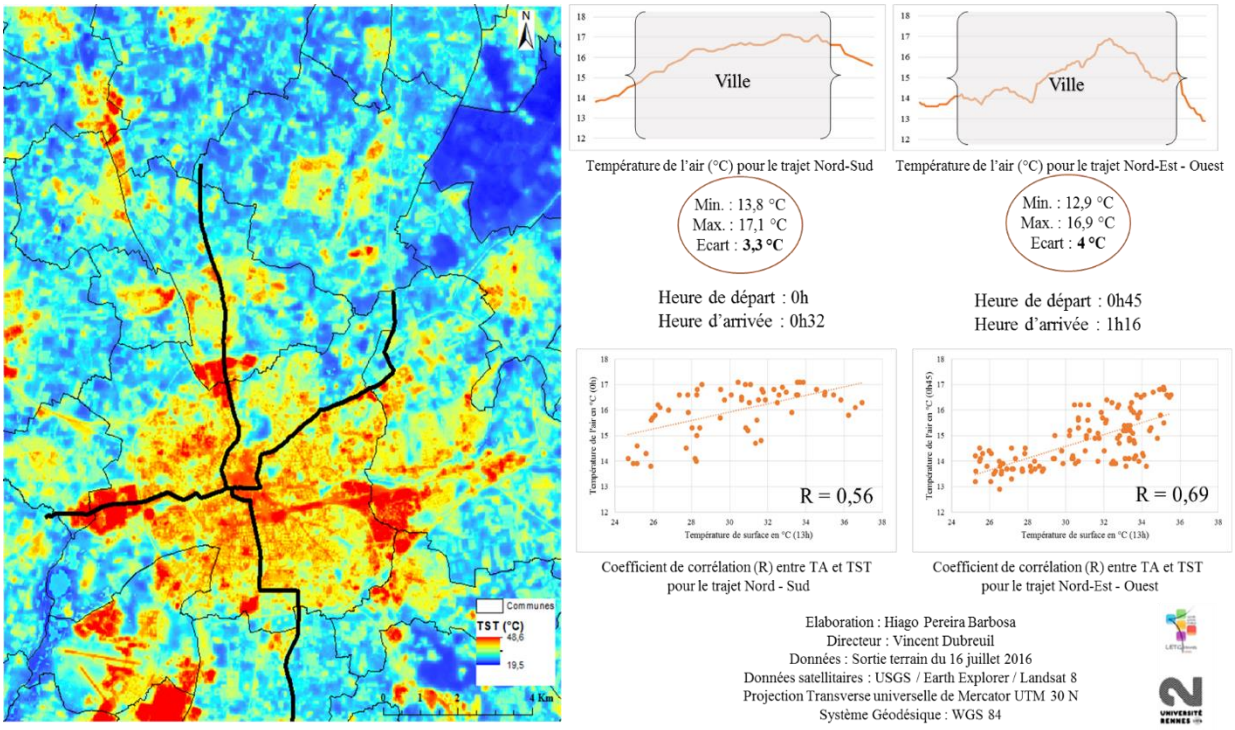


Figure 1. Carte de TST du 16/07/2016 à 10h30 UTC/GMT, valeurs de TA (mesures mobiles nocturnes et fixes) du 16/07/2016 et coefficient de corrélation linéaire (r) entre ces deux variables.

La différence de TA sur le trajet Nord-Est – Ouest (Fig.1) a été de 4°C avec les valeurs de 12,9°C et 16,9°C. Dans la campagne au Nord-Est de Rennes, les valeurs varient de 13,8°C à 14,2°C. La TA a maintenu une tendance à l'augmentation en ville (14,6°C) et de baisse à proximité du Parc des Gayeulles (13,8°C). Ensuite, la température est restée élevée même lors du passage près du Parc du Thabor (15,7°C). Le pic maximal de la TA a été enregistré lors du

passage sur la Place de Bretagne (16,9°C). La TA est restée inférieure à 16,9°C lors du passage au Quai de la Prévalaye vers la Route de Lorient et le Stade Rennais (15,6°C). Malgré quelques valeurs de TA localement plus élevées à proximité de certains établissements industriels (zone industrielle Ouest), la TA a rapidement chuté vers la campagne. Enfin, la TA minimale enregistrée de ce trajet a été de 12,9°C.

2.2. Campagne de mesure du 13 Août 2016

La différence de TA sur le trajet Sud – Nord (Fig.2) a été de 4,4°C avec des valeurs comprises entre 11,8°C et 16,2°C. Dans la campagne située au Sud de Rennes, les températures observées ont été inférieures à 15°C. Le vent de direction Nord et l'effet de la brise thermique ont possiblement influencé la variation de la TA, comme dans le cas du 16 Juillet.

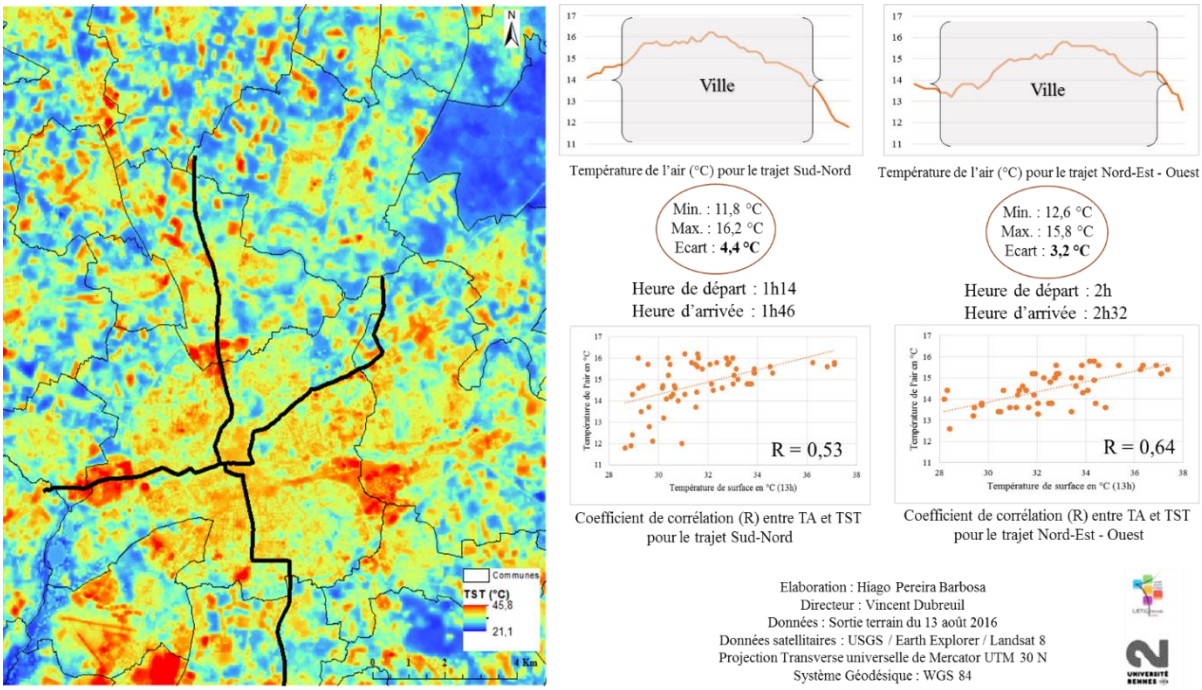


Figure 2. Carte de TST du 17/08/2016 à 10h30 UTC/GMT, valeurs de TA (mesures mobiles nocturnes et fixes) du 13/08/2016 et coefficient de corrélation linéaire (r) entre ces deux variables.

La différence de TA sur le trajet Nord-Est – Ouest (Fig.2) a été de 3,2°C avec des valeurs comprises entre 12,6°C et 15,8°C. Ce trajet a présenté la même tendance observée pendant la nuit du 16 Juillet 2006. Durant ce trajet, une baisse de la TA a été observée aux alentours du parc des Gayeulles (13,2°C) au Nord-Est de la ville ainsi que du parc du Thabor (13,6°C) au centre-ville. Le pic de température a été observé lors du passage sur la Place de Bretagne (comme déjà constaté précédemment).

2.3. Comparaison entre les deux dates de campagne des mesures

Les différences de température entre la ville et les zones rurales avoisinantes sont très liées à l'hétérogénéité des surfaces urbaines et rurales. Le rayonnement infrarouge est plus élevé en ville (surfaces asphaltées et volumes d'habitation) qu'en campagne, d'où des températures plus élevées (Oke, 1982 ; Dubreuil *et al.*, 2010).

Les différences observées entre les températures au sein de ces deux transects mobiles peuvent être liées à la différence de l'heure des mesures, mais aussi à l'effet du vent pour le trajet Sud-Nord. Dans tous les cas, cependant, les situations ont été favorables à l'observation du phénomène de l'ICA au sein de l'agglomération rennaise.

Les différences de TA entre la ville et la campagne avoisinante sont fortement liées à l'occupation du sol et notamment la densité du bâti et la présence de végétation. Les écarts de température ont été moins importants sur le trajet Nord-Sud en raison du vent et de l'effet de la brise thermique, qui a eu tendance à homogénéiser la température de l'air alors que pour le trajet Nord-Est – Ouest, une différence plus importante de la TA a été constatée.

2.4. Coefficient de corrélation linéaire entre TST et TA

Le coefficient de corrélation linéaire a montré une relation positive entre la TS et la TA pour les deux campagnes des mesures (Fig.1,2). Les coefficients de corrélation les plus remarquables sont ceux du trajet Nord-Est – Ouest (0,69 pour Juillet et 0,64 pour Août) car l'échantillonnage de points dans la campagne est moins important (en quantité) que celui de la ville. Pour les deux autres trajets, la corrélation a également été satisfaisante (0,56 pour Juillet et 0,53 pour Août) mais montre qu'il est difficile d'extrapoler les TA à partir des seules TS. Signalons aussi que le coefficient de corrélation a été plus élevé pour les données de Juillet : en effet, les mesures mobiles et le passage du satellite ont été effectués dans la même journée alors que pour le mois d'Août, un décalage de quatre jours a eu lieu.

Les résultats montrent que les ICA et les ICS n'ont pas la même forme ni la même dynamique temporelle. Deux points principaux doivent être mentionnés ici :

D'abord, les ICA présentent un réchauffement de l'atmosphère avec une intensité maximale durant la période nocturne (Foissard, 2015 ; Foissard *et al.*, 2019). En revanche, les ICS mesurées de jour par *Landsat* correspondent à une période où l'ICA est absent et représentent un réchauffement de la surface fortement lié à l'occupation du sol.

Ensuite, même si une corrélation entre les deux variables TST et TA peut paraître bonne, des anomalies importantes ont été constatées. Ces anomalies correspondent surtout aux températures mesurées dans les zones industrielles ou sur des surfaces de sols nus et/ou secs. Dans les zones industrielles, les surfaces chauffent plus intensément le matin car il s'agit principalement de hangars (en tôle et en béton), d'où la forte intensité des TST. Cependant, ces matériaux n'accumulent que peu ou pas de chaleur, de sorte qu'ils ne peuvent pas dégager de chaleur pendant la nuit du fait de leur faible inertie thermique (Portela *et al.*, 2020). De ce fait, les TST élevées pendant la journée ne coïncident pas avec des TA élevées lors des transects mobiles nocturnes.

Les TA les plus élevées sont bien observées la nuit dans le centre-ville alors que sur les TST issues des images satellitaires *Landsat* ce sont les zones industrielles qui apparaissent comme les surfaces les plus chaudes. Or, on n'observe pas, de jour comme de nuit, de températures significativement plus élevées dans ces secteurs qui conservent des TA inférieures au centre-ville.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent l'importance de combiner différentes méthodes pour caractériser l'ICU. Cette approche peut aider à comprendre les interactions entre la morphologie urbaine et l'atmosphère locale. L'utilisation des images satellitaires diurnes ou nocturnes peut être appropriée pour mieux comprendre les liens entre les ICS et les ICA mais elles ne peuvent se substituer à des mesures climatologiques locales pour cartographier les ICA.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes qui ont aidé à réaliser les mesures mobiles nocturnes de température de l'air durant la période estivale de l'année 2016.

Bibliographie

Amorim M. C. C. T., Dubreuil V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, (5), 91-104.

Barbosa H. P., Dubreuil V., Amorim M.C.C.T., 2017. Utilização de imagens do satélite Landsat 8 para a análise da emissividade e da temperatura de superfície da aglomeração urbana de Rennes (França). *Anais do XVIII SBSR*, Santos, maio de 2017, 4542-4549.

Dubreuil V., Quenol H., Foissard X., Planchon O., 2010. Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes, in P.Clergeau (dir.) *Ville et biodiversité: les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire*. Presses Universitaires de Rennes, 105-122.

Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil, V., Quénol H., Maëlle E., Johan O., 2016. Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : analyse au moyen de la classification de Köppen et des "types de climats annuels". *Climatologie*, 13, 47-70.

Foissard X., 2015. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. *Thèse de doctorat de Géographie*, Université Rennes 2, Rennes, France, 247p.

Foissard X., Dubreuil V., Quénol H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29, 1-13.

Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), 2019. Ille-et-Vilaine : la population des communes au 1er janvier 2017. *Insee Flash Bretagne*, 57, décembre 2019.

Matson M., McClain E. P., McGinnis D. F. Jr., Pritchard J. A. Satellite Detection of Urban Heat Islands. *Monthly Weather Review*, 106, 1978, 1725-1734.

Oke T. R., 1978. Inadvertent climate modification. In : *Boundary Layer Climates.* Second edition, 1987, New York, Ed. Oke, T. R., 263-302.

Oke T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 455, 1-24.

Portela C. I., Massi K. G., Rodrigues T., Alcantâra E., 2020. Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices. *Sustainable Cities and Society*, 56. Doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102100.

FUTURE DROUGHT EVENTS IN ITALY

BARONETTI A.[1], ACQUAOTTA F.[1,2], DUBREUIL V.[3], GONZÁLEZ-HIDALGO J.C.[4,5], FRATIANNI S.[1,2]

1 Earth Sciences Department, University of Turin, 10125, Turin, Italy (alice.baronetti@unito.it)
2 Centro Interdipartimentale sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare, University of Turin, Turin, Italy
3 Université Rennes 2, UMR 6554, CNRS, LETG Rennes, France
4 Department of Geography, University of Zaragoza, Saragossa, Spain
5 IUCA, University of Zaragoza, Saragossa, Spain

Summary: *Near future (2021-2050) and far future (2071-2100) weekly drought episodes in the North of Italy were investigated. For this purpose, daily precipitation and daily temperature RCM EURO-CORDEX projection models were collected at a scale resolution of 0.11 degrees. Two scenarios were investigated the RCP 4.5 and RCP 8.5. Subsequently models were validated with daily climatic series collected at the ground and weekly future heavy and extreme droughts were investigated by mean of SPEI and SPI indices calculated at 12-,24- and 36-months scale. Future analysis has highlighted an intensification of drought passing throw near future to far future, in terms of length and percentage of area interested for both the scenarios. While the trend analysis has showed that for the RCP 4.5 the Alps chain will be interested by an increase of drought, while according with the RCP 8.5 the whole study area will experience drought.*

Key words: *Projection models; RCM; drought; SPEI; SPI*

Résumé : ***Futurs épisodes de sécheresse en Italie.*** *Les épisodes hebdomadaires de sécheresse ont été étudiés dans un avenir proche (2021-2050) et lointain (2071-2100) dans le nord de l'Italie. A cet effet, modèles de projection RCM EURO-CORDEX de précipitations et températures quotidiennes ont été collectés à une résolution d'échelle de 0,11 degrés. Deux scénarios ont été étudiés : le RCP4.5 et RCP 8.5. Par la suite, les modèles ont été validés avec des séries climatiques quotidiennes au sol et les futures épisodes sécheresse hebdomadaires lourdes et extrêmes ont été étudiées au moyen des indices SPEI et SPI, calculés à 12, 24 et 36 mois. Une analyse future a mis en évidence une intensification de la sécheresse passant près de l'avenir proche au futur lointain, en termes de longueur et de pourcentage de zones intéressées pour les deux scénarios. Alors que l'analyse de la tendance pour le RCP 4.5 a montré que la chaîne des Alpes serait intéressée par une augmentation de la sécheresse, selon le RCP 8.5, toute la zone d'étude connaîtra une sécheresse.*

Mots clés : *Modèles de projection ; RCM ; Sécheresse ; SPEI ; SPI*

Introduction

Drought is a recurrent climate hazard that is generated by a natural and temporary imbalance of water availability. Differently from aridity that is a climate feature that characterize arid portions of the earth surface, it can occur worldwide. It develops slowly, and it consists of precipitation below the normal, of duration and severity, of uncertain frequency and of unpredictable (Carrão *et al.*, 2017). Due to the complexity to detect drought, several drought indices have been developed, and the most applied in literature are: Standardized Precipitation Index (SPI, McKee *et al.*, 1993) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-Serrano *et al.*, 2010). The Mediterranean basin is an "hot spot" of climate change and, that area suffered the highest increase in drought magnitude, affecting agriculture and hydrological conditions (Paeth *et al.*, 2017). However, even if the Northern part of Italy is historically rich in water resources, since 1983 the Po Plain was affected by several extreme drought episodes which became more frequent and intense after 2000s, affecting the hydrological behavior of the Po river (Baronetti *et al.*, 2020). Nowadays few studies up to now have studied future projection of drought for the Mediterranean basin, taking into account only one drought index and only one mitigation scenario: the RCP 4.5 (stabilization strategies) or the RCP 8.5 (very high greenhouse gas emissions, Heting and Tramblay 2017).

The aim if this research is to identify and characterize the main future weekly drought episodes that will affect the North of Italy for near (2021-2050) and far future (2071-2100).

Regional Climate Models (RCM) belonging to the EURO-CORDEX project were analyzed comparing the results of RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios (https://www.euro-cordex.net/index.php.en). SPEI and SPI indices are used to perform the drought analyses at different time scales and, future number of evets, magnitude, percentage of area under drought and trends were detected and compared.

1. Data and Method

1.1. Data and study area

In the following study 10 daily maximum and minimum temperature and 10 precipitation ensembles belonging to the RACMO22, HIRHAM and CCLM4 RCM of the EURO-CORDEX project at a spatial resolution of 0.11 degree (EUR-11) were selected and collected. To compare the drought results in relation with the possible mitigation strategies, 5 RCM for the RCP4.5 and 5 RCM for the RCP8.5 were analysed (Tab.1). Subsequently the selected models were cropped on the North of Italy with the following vertices, expressed in WGS84 UTM-32N cartographic coordinates: North 5233915 m South 4822840 m, East and West 893343 m 300918 m.

The models validation was then performed. For each model 10 precipitation and temperature daily series were extracted and compared with the respective quality controlled series recorded at the ground. The statistical comparison was developed by means of Co.Temp (Guenzi *et al.*, 2019) and Co.Rain (Guenzi *et al.*, 2017) software classifying episodes in weak, mean, heavy and extreme.

Table 1. In table are reported the 10 RCM projection models, 5 for the RCP 4.5 and 5 for the RCP 8.5 for the North of Italy. In grey the less reliable models.

N°	***RCP4.5***	***N°***	***RCP8.5***
1	EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v1	**6**	EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v1
2	EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1	**7**	EUR-11_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1
3	EUR-11_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	**8**	EUR-11_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
4	EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1	**9**	EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
5	EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2	**10**	EUR-11_MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2

The models validation has highlighted that for precipitation the highest difference between ground records and models is observed in the class of extreme events. The first and third couple are the less reliable. In fact, a model overestimation with a Root Mean Square Error (RMSE) of respectively 37.8 mm and 31.43mm was observed, differently form the other couples where the RMSE is no more than 5. Looking at temperatures, the validation has showed a general overestimation of the models with a RMSE of 4°C for the mean events.

1.2. Methods

To detect the main near (2021-2050) and far (2071-2100) future weekly drought episodes, for each model, daily data were converted in weekly, and to avoid the problem of leap years, each month was divided in four weeks. Subsequently from maximum and minimum temperature RCMS, the atmospheric evaporative demand was obtained. For this purpose, the Hargreaves and Samani (HS) method was adopted (Hargreaves and Samani, 1985). HS is an empirical model and the influence of the humidity is approximated with diurnal temperature range (DTR) and solar radiation (Rs). Using the precipitation RCM and the previously calculated atmospheric evaporative demand, the SPI and SPEI drought indices were applied at 12-, 24- and 36 - months scales. Subsequently the drought events were classified in heavy and extreme. The selection was based on three parameters: i) identification of fixed thresholds (Tab.2); ii) minimum duration of 3 consecutive weeks; iii) drought conditions that affect almost the 25% of study area (González-Hidalgo *et al.*, 2018). Subsequently the obtained drought episodes where characterised identifying for near and far future: magnitude, duration, percentage of covered area, and future trend by mean of the Mann Kendall test (Mann, 1945). The results for RCP 4.5 and RCP 8.5 were then compared.

Table 2. Classification of drought episodes in four class events: weak, mean, heavy and extreme, where R is the observed SPEI or SPI drought value

Class event	***Range***
Severe	-1.65≤R<-1.28
Extreme	R<-1.65

2. Results

Table 3 shows the characterization of the main events for near (2021-2050) and far future (2071-2100) in the North of Italy calculated with SPEI at 12-month time scale. The analysis of the obtained results, has showed that there is an increase of drought episodes passing through near future to far future. For both the scenarios the number of drought episodes will increase only of +1 or +2 events. While looking at the percentage of area under drought an increase between 11% and 14% will be expected in the most reliable models in both the RCP 4.5 and 8.5. Especially for the couple made by models 5 and 10 the maximum increase of 14% will be observed. Concerning the length of future drought events, the models analysis has showed an increase of 4 and 5 consecutive weeks for both the RCP 4.5 and 8.5 except for the model number 3 where is projected an increment of 8 consecutive weeks.

Table 3. In table are reported the number of drought evens, percentage of are under drought and consecutive weeks observed in near future (2021-2050) and far future (2071-2100) for the 5 couple of RCM projection models made of RCP 4.5 and RCP 8.5 for the North of Italy. In grey the less reliable models.

	RCP4.5					
	SPEI 2021-2050			***SPEI 2071-2100***		
N° model	**n° events**	**%Area**	**Weeks**	***n° events***	***%Area***	***Weeks***
1	4	36	9	6	38	8
2	4	34	15	5	45	19
3	4	39	11	4	43	14
4	4	40	15	6	53	23
5	6	35	12	8	49	17
	RCP8.5					
	SPEI 2021-2050			***SPEI 2071-2100***		
N° model	***n° events***	***%Area***	***Weeks***	***n° events***	***%Area***	***Weeks***

The trend analysis calculated for near future and far future, did not evidenced negative or positive trend of drought, but in almost the cases trends are close to zero. In this regard, in figure 1 is reported the future trend of SPEI calculated until the end of the century (2020-2100 period) at 12-months for the most reliable models. The trend analysis has highlighted a coherence between models number 2 and 3 for the RCP4.5, in fact the Occidentals Alps are the sectors where a significant increase of drought will be expected. In particular, in this area drought index will decrease between -1.2 and -1.8. While for model number 1 drought will interest not only the occidental portion of the study area but also the central portion (North of the Po Plain) with significant and negative trends between -1.8 and -2.4 of the drought index. While looking at the scenario where no mitigation strategies will be not adopted, for models 4 and 6 the trend analysis has showed significant trends for all the study area, and instead of the RCP 4.5, the scenario 8.5 will projects a marked intensification of drought for all the North of Italy, especially for the Alps chain with trends of SPEI index between -2.4 and -3.0. Also, in model number 3 the Alps chain will be affected by a drought intensification, but in the Po Plain no negative trend will occur.

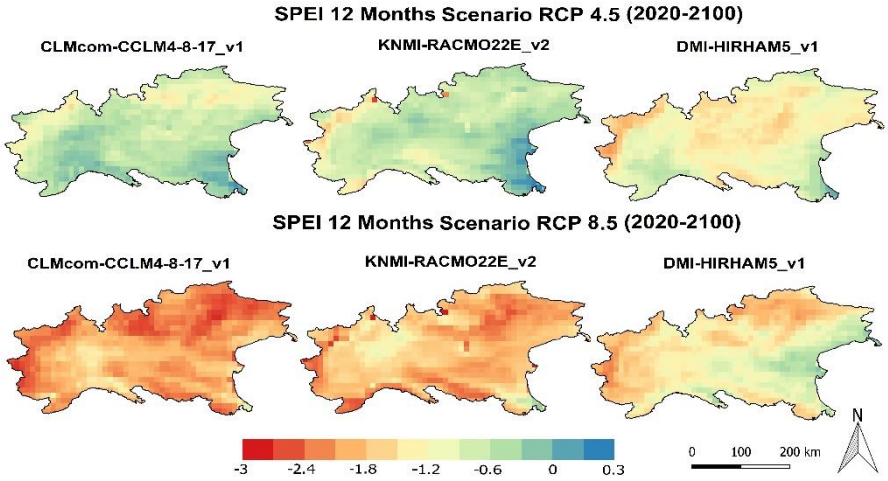


Figure 1. Spatial distribution of SPEI 12 months trend calculated for RCP 4.5 and 8.5 in the North of Italy for the reliable models.

drought recorded by SPEI and SPI. Positive values indicate a larger area of drought according to the SPEI and vice versa. Figure 2 has not figured out a clear behavior between the two indices. In particular, for the RCP 8.5 is possible to highlight that for the last decade of the century SPI has detected longer and more severe drought episodes instead of the SPEI, indicating that the main triggering factor is a lack of precipitation. While in the years before positive value of the line is observed showing that one of the possible trigging factor of drought is potential evapotranspiration values above the normal.

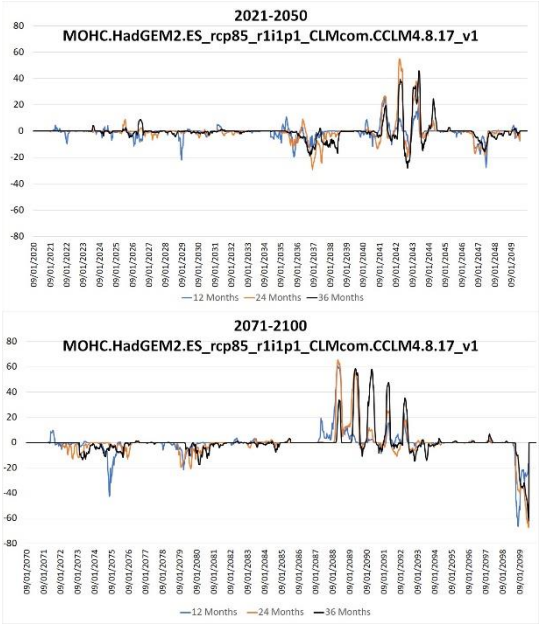


Figure 2. Difference of land affected by extreme drought between SPEI and SPI calculated for near future and far future for RCP 8.5.

Conclusions and Discussion

This work proposes to characterize near (2021-2050) and far (2071-2100) future weekly drought episodes in the Northern part of Italy. In this study EURO-CORDEX RCMs with a spatial resolution of 0.11 were analyzed. RCMs models are more suitable to perform local scales analysis, instead of Global Climate Models that generally operate at 100–250 km. RCMs exhibit uncertainty that arise from the nature of model design, in fact different RCMs simulations are driven by different GCMs (Lhotka *et al.*,2018). In this regard the validation of the collected RCMs was performed and the study showed an increase in terms of length and percentage of drought episodes passing through near future to far future, while the number of events has remained almost the same. In particular, the study has evidenced that at the end of the century the main triggering factor is the lack of precipitation. This results are coherent with Bonanno and Faggian (2018) that in their study highlighted a decrease of 10% in the total precipitation amount for the RCP 8.5 in Italy, in particular dry spells will increase and the consecutive dry day's variations will range from 5 to 20%. Looking at drought trends, the RCP 4.5 scenario has evidenced that the Alps chain, the rainiest sector of the study area with an annual precipitation of 1800 mm (Baronetti *et al.* 2018), will be also the one mostly interested by an intensification of drought. In conclusion this work would verify the complexity of each drought episode and

likewise what observed by Baronetti *et al.* 2020 for the period 1965-2017, several drought triggering factors acted during the years passing by evapotranspiration demand above the normal to lack of precipitation. This is probably linked to anomalies in circulation patterns observed by Toreti *et al.* (2010) for the western Mediterranean.

Acknowledgments

This work is financed by the projects Erasmus Traineeships+ (University of Turin, Italy, I TORINO01). The authors would also thank Renan Le Roux of the UR Forêts et Sociétés of CIRAD (Montpellier, France) for the help in the data rescue.

Literature

Baronetti A., González-Hidalgo J.C., Vicente-Serrano S.M., Acquaotta F., Fratianni S., 2020. A weekly spatio-temporal distribution of drought events over the Po Plain (North Italy) in the last five decades. *International Journal of Climatology*, 1-14. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.6467.

Baronetti A, Acquaotta F., Fratianni S., 2018. Rainfall variability from a dense rain gauge network in North-West Italy. *Climate Research*, 75, 201-213. Doi: https://doi.org/10.3354/cr01517.

Bonanno R., Faggian P., 2018. Changes in Precipitation Regime over Italian Peninsula and their possible impacts on the Electric System. *Tethys*, 18-30.

Carrão H., Naumann G., and Barbosa P., 2018. Global projections of drought hazard in a warming climate: a prime for disaster risk management. *Climate dynamics*, 50(5-6): 2137-2155.

McKee T.B.N., Doesken J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to timescales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Boston, American Meteorological Society, 179-184

Guenzi D., Acquaotta F., Garzena D., Baronetti A., and Fratianni S., 2019. An algorithm for daily temperature comparison: co. temp-comparing series of temperature. *Earth Science Informatics*, 1-6. Doi: https://doi.org/10.1007/s12145-019- 00414-y.

Guenzi D., Acquaotta F., Garzena D., Fratianni S., 2017. CoRain: a free and open source software for rain series comparison. *Earth Science Informatics*, 10(3), 405-416. Doi: https://doi.org/10.1007/s12145-017-0301-y.

González-Hidalgo J. C., Vicente-Serrano S. M., Peña-Angulo D., Salinas C., Tomas-Burguera M., and Beguería S., 2018. High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin (Spanish mainland, Iberian Peninsula). *Acta Geophysica*, 1-12.

Hargreaves G.H. and Samani Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*,1, 96–99.

Hertig E., Tramblay Y., 2017., Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 151, 36-48.

Lhotka O., Kyselý J., and Farda A. 2018. Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and applied climatology*, 131(3-4), 1043-1054.

Mann H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.

Paeth H., Vogt G., Paxian A., Hertig E., Seubert S., and Jacobeit J., 2017. Quantifying the evidence of climate change in the light of uncertainty exemplified by the Mediterranean hot spot region. *Global and Planetary Change*, 151, 144-151.

Toreti A., Xoplaki E., Maraun D., Kuglitsch F.G., Wanner H., Luterbacher J., 2010. Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1037-1050.

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. Doi: https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1.

CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE LIN FIBRE EN NORMANDIE A L'HORIZON 2100 : SIMULATION BIOCLIMATIQUE PROSPECTIVE A PARTIR DES DONNEES CNRM-2014 ET IPSL-2014

BEAUVAIS F.[1,2], CANTAT O.[1], LE GOUEE P.[1], BRUNEL-MUGUET S.[3], MADELINE P.[2], GAILLARD H.[4], BATAILLE M.P.[1], SALLENT A.[1], PREUX T.[1,2], MEDJKANE M.[1,5]

1 Normandie Université, UNICAEN, CNRS, LETG, Caen, France (francois.beauvais@unicaen.fr)
2 Normandie Université, UNICAEN, CNRS, ESO, Caen, France
3 Normandie Université, UNICAEN, INRA, EVA, Caen, France
4 INRA, UR 0272, Unité Science du Sol, Centre de recherche Val de Loire, Orléans, France
5 Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, Caen, France

Résumé : *La Normandie est la première région au monde productrice de fibre de lin (Linum usitatissimu L.), majoritairement exportée à destination de la Chine. Le lin est une plante cultivée au printemps qui affectionne un climat océanique, régulièrement arrosé et aux excès thermiques limités. Si la réduction de la durée du cycle liée au réchauffement climatique permettrait de contrer l'exposition au manque d'eau du début de l'été, les conditions thermiques pourraient être défavorables à cette production végétale, notamment à cause de l'occurrence plus importante des jours de chaleur.*

Mots clés : *changement climatique ; Normandie ; lin fibre ; bioclimatologie ; modélisation*

Summary: ***Consequences of climate change on fibre flax in Normandy by 2100: prospective bioclimatic simulation based on CNRM-2014 and IPSL-2014 data.*** *Normandy is the world's leading producer of flax fiber (Linum usitatissimu L.) which is mainly exported to China. Flax is a spring cultivated plant which thrives in an oceanic climate, regularly watered and with limited thermal excesses. While the reduction in cycle length due to global warming would help counter the exposure to water scarcity in early summer, thermal conditions could be unfavourable to this crop production, particularly due to the greater occurrence of hot days.*

Key words: *climate change; Normandy; flax fiber; bioclimatology; modelisation*

Introduction

En Normandie, d'après la Chambre Régionale d'Agriculture, la production de lin fibre représente 63 % de la production nationale avec 377 500 tonnes récoltées en 2017. Si les surfaces consacrées à cette plante sont faibles (3 % de la Surface Agricole Utile régionale, soit 55 107 ha en 2016 d'après les données du Registre Parcellaire Graphique), la Normandie est tout de même la première région productrice du monde. Cette culture, spécifique à la région et nécessitant un savoir-faire technique particulier, est attractive compte-tenu de la forte valeur ajoutée qui lui est associée[1]. Une fois récolté, le lin est transporté vers les coopératives linières spécialisées dans la technique du teillage (extraction des fibres de la plante). Les fibres sont alors exportées à hauteur de 90 % vers la Chine pour la fabrication de textile tandis qu'une plus faible partie est utilisée comme composites (par Terre de Lin, qui est une coopérative linière : http://www.terredelin.com/). Les grandes plaines agricoles de Normandie, au climat tempéré océanique, conviennent à la culture du lin fibre. On retrouve d'ailleurs cette culture sur le littoral allant de Caen jusqu'aux Pays-Bas. Les précipitations régulières, associées aux sols limoneux et profonds, garantissent de l'eau pour que le lin puisse satisfaire son développement. Il profite également de l'inertie thermique de la Mer de la Manche, modérant les excès thermiques du printemps (gelée tardive) et du début de l'été (forte chaleur). Le nord de la plaine de Caen,

[1] Les recettes du lin vont de 700 euros (parcelles les moins performantes) à 8000 euros (performances exceptionnelles) par ha (*in* Ouest France, « *Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot* », G. Le Du, 11/01/20).

espace retenu pour cette étude, s'inscrit dans ce trait de caractère climatique. Les précipitations totales annuelles sont de l'ordre de 740 mm sur la Normale climatique 1981-2010, et cumulent plus précisément 224 mm pour les mois d'avril, mai, juin et juillet lorsque le lin fait son cycle végétatif. La température moyenne annuelle est de 11,4°C et on dénombre 32 jours de gel et 23 jours de chaleur[2] à l'année. Concernant les quatre mois de culture, la température moyenne est de 13,9°C, avec 1,2 jour de gel (en avril) et 12,3 jours de chaleur. Pourtant, malgré ces conditions favorables, cette culture reste fragile aux aléas météo-climatiques comme le soulignent des liniculteurs : *« on tremble du semis jusqu'à la récolte »*[3].

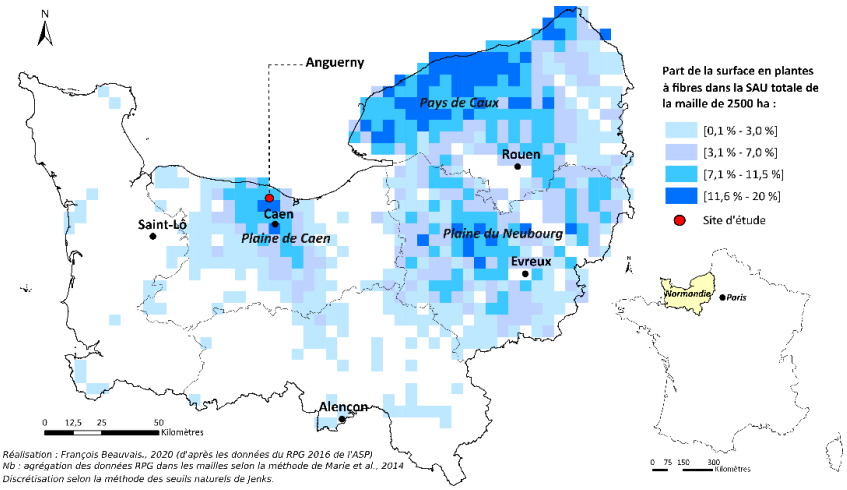


Figure 1. Carte de localisation du site d'étude et des plantes à fibres[4] en Normandie.

Dans la perspective de printemps plus chauds et plus secs, la culture du lin de printemps apparait comme vulnérable au changement climatique. Il convient de se demander quelles pourraient être les contraintes climatiques futures pour cette plante en Normandie ? Jusqu'à présent et à notre connaissance, aucune étude prospective n'a été menée sur ce sujet en Normandie et plus largement en France. La démarche employée pour ce travail est similaire à celle utilisée pour la culture du blé tendre d'hiver (Beauvais *et al.*, 2019) mais s'intéresse à une culture au cycle plus court et effectuant son développement uniquement sur la saison printanière.

1. Données et méthode

Pour projeter le lin fibre de printemps à l'horizon 2100, les données issues de la modélisation prédictive du climat sont nécessaires. Il s'agit ici des données CNRM-2014 et IPSL-2014 (Ouzeau *et al.*, 2014)[5], sorties respectivement des modèles régionaux ALADIN-Climat et WRF, avec une résolution de 8 x 8 km (grille Safran). Les simulations sont produites pour une période de référence (1976-2005) et une période lointaine (2071-2100) selon deux scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) du GIEC, afin d'exprimer les changements du bilan radiatif au sommet de la troposphère (IPCC, 2014). Le premier (RCP 4.5) fait écho à une stagnation de l'évolution du bilan radiatif en seconde partie du XXI^{ème} siècle. Le second (RCP 8.5) illustrerait le climat possible sans politique climatique à l'échelle mondiale. Il apparait pertinent de préciser que nos sociétés se trouvent actuellement sur la trajectoire de ce dernier

[2] Un jour de chaleur est comptabilisé lorsque la température maximale est supérieure ou égale à 25 °C.
[3] *in* Ouest France, « *Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot* », G. Le Du, 11/01/20.
[4] Dans le RPG 2016, les plantes à fibres regroupent le lin fibre et le sorgho. Ce dernier n'est que peu cultivé et équivaut à 0,9 % de la surface totale consacrée aux plantes à fibres. Par conséquent, la carte des plantes à fibres correspond à celle du lin.
[5] Ces données sont téléchargées sur le portail *Drias Les futurs du Climat* http://www.drias-climat.fr/.

scénario (IPCC, 2014). Notons qu'un biais froid des modèles ALADIN et WRF est constaté en Plaine de Caen (Beauvais *et al.*, 2019), avec notamment une sous-estimation des températures post-rupture 1987 observable en comparant le scénario historique au modèle SAFRAN pour le même point de grille. Le scénario historique est donc corrigé en considérant le biais moyen mensuel des températures minimales et maximales (Dubreuil *et al.*, 2019) sur la période 1976-1987 puis 1988-2005. Les données des scénarios RCP sont quant à elles rajustées uniquement selon le biais post-rupture.

Ces données sont introduites dans une simulation bioclimatique du lin fibre de printemps pour une date de semis le 20 mars de chaque année. Le cycle de la culture est simulé à partir d'une somme de températures (base 5°C ; écrêtage à 28°C) relative à l'atteinte des différents stades phénologiques[6]. Des indicateurs phénoclimatiques sont ensuite associés à ces différentes phases du cycle de la culture. Leur évolution ou le dépassement de seuils fait appel à de possibles impacts sur le rendement. Pour cette étude quatre indicateurs (d'après Arvalis, http://www.fiches.arvalis-infos.fr/liste_fiches.php?fiche=acc&type=ALF) sont retenus en lien avec les paramètres disponibles en sortie des modèles climatiques : la durée du cycle ; le déficit hydrique et les jours de chaleur (TX25[7] ; totalité du cycle) pouvant occasionner des fibres creuses ; les fortes pluies (RR10 et RR20[8] ; entre 10 cm et floraison) susceptibles d'engendrer une verse physiologique. Le manque d'eau pour le végétal est estimé à partir d'un bilan hydrique journalier à décroissance logarithmique selon la méthode de Thornthwaite et Mather (1955) afin d'intégrer la difficulté progressive de la plante à mobiliser l'eau de la réserve utile à mesure que celle-ci se vide. La demande climatique est celle du lin (ETM, évapotranspiration maximale) déterminée par le jeu de coefficients culturaux, multipliés par l'évapotranspiration potentielle[9], variant selon les périodes phénologiques, comme exposé par Allen *et al.* (1998). La RUM (Réserve Utile Maximale) retenue est de 199 mm sur un mètre de profondeur de sol (potentiel d'enracinement du lin, d'après Arvalis[10]) et correspond à celle d'une parcelle agricole située sur la commune d'Anguerny, représentative de la couverture pédologique du secteur nord de Caen (sols épais et limoneux). Elle a été estimée à partir de mesures en laboratoire (densités apparentes ; échantillons sur mottes effectués à l'aide d'une presse à membrane par l'unité INRA d'Orléans) sur les échantillons prélevés lors de l'ouverture d'une fosse pédologique *in situ* le 02 avril 2019, selon le protocole RMQS2[11] (Jolivet *et al.*, 2018).

2. Résultats

La durée du cycle du lin est actuellement de l'ordre de 120 jours. En appliquant les scénarios RCP 4.5, elle diminuerait d'environ 15 jours avec ALADIN et 12 jours avec WRF d'ici la fin du siècle. Dans le cas du scénario au réchauffement le plus important, RCP 8.5, la réduction

[6] Les sommes de températures retenues sont celles exposées par Arvalis pour la région Normandie (https://www.evenements-arvalis.fr/reunion-agriculteurs-le-8-decembre-2015-saint-pierre-sur-dives-14--@/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=36524&prop=file).

[7] Le 27/10/11, F. Bert, Directeur de l'Institut technique du lin expose lors du colloque « Changement climatique : quelles conséquences et stratégies d'adaptation pour les grandes cultures » que le lin est vulnérable aux températures supérieures à 25°C (https://www.youtube.com/watch?v=tAPJ0sCCCT8).

[8] Les valeurs de RR10 et RR20 ont été retenues par défaut compte tenu de l'absence de seuil connu.

[9] ETP calculée à partir de la formule de Thornthwaite, fondée sur la température et la latitude, jugée représentative pour le nord-ouest de la France (comm. personnelle de V. Dubreuil). En effet, le rayonnement, utile au calcul de l'ETP Turc, plus précise, n'est pas disponible en sortie de la simulation IPSL-2014.

[10] C.-H. Biard, 21/02/17, « Le lin, l'azote et les intercultures », Arvalis (organisé par le SIAEPA de la Région de Criquetot l'Esneval et le SMBV Pointe de Caux Etretat). http://www.smbv-pointedecaux.fr/upload/editeur/presentation_lin-azote_210217_COMPIL.pdf

[11] En parallèle, nous avons estimé la texture du sol à partir de la méthode de la pipette de Robinson en reportant les résultats sur le diagramme de Jamagne. En appliquant les règles de pédotransfert, la RUM est de 185 mm.

serait respectivement de 25 et 21 jours. La variabilité interannuelle diminuerait légèrement dans le cas des données CNRM-2014, notamment pour le scénario RCP 8.5. Par ailleurs, certaines années très chaudes, au cycle très court, pourraient survenir, à tel point que le troisième quartile de ce dernier scénario serait inférieur au minimum de la référence 1976-2005 (Fig.2A).

Malgré une augmentation de la demande climatique au printemps, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle serait plus faible qu'en période de référence. La réduction de la durée du cycle (anticipation de la maturité des fibres) permettrait de réduire la fenêtre d'exposition aux sécheresses d'autant plus que le sol limoneux garantit de l'eau à la plante jusqu'à la fin du printemps. Actuellement, le déficit hydrique est estimé à 24 et 28 mm avec les deux modèles. Ce manque d'eau pour la plante diminuerait de 8 et de 11 mm pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 d'ALADIN. Avec WRF, il resterait équivalent dans le cas du premier scénario et diminuerait de 10 mm dans le cas du second. Il n'y a donc pas d'évolution significative (Fig.2B).

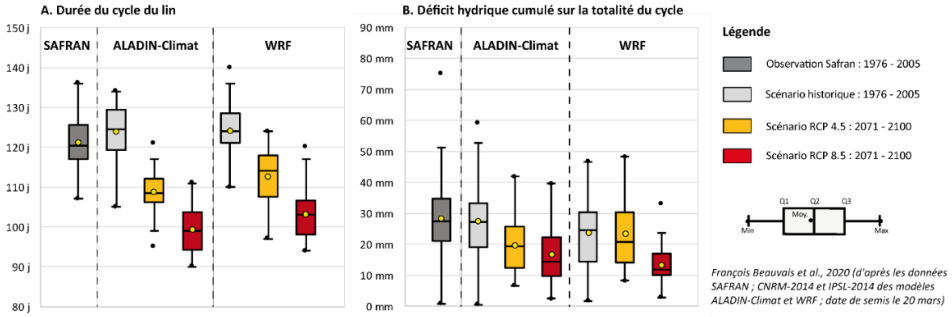


Figure 2. Comparaison de la durée du cycle du lin (A) et du déficit hydrique cumulé sur la totalité du cycle (B) à Anguerny (nord de Caen) entre la période de référence (1976-2005) et lointaine (2071-2100) pour trois scénarios RCP à partir des modèles ALADIN-Climat et WRF.

Toutefois, l'élévation de la température pourrait être un facteur limitant. En effet, malgré l'avancement du cycle, les périodes phénologiques se dérouleraient dans le cadre d'une température plus élevée. A titre d'exemple, la température moyenne durant la maturité des fibres serait de 18,1°C avec ALADIN et de 17,1°C avec WRF, alors qu'elle est respectivement de 16,7°C avec ces deux modèles en période de référence. En conséquence, les jours de chaleur subis par la plante pourraient être plus nombreux. Sur l'ensemble du cycle, ce type d'aléa est déjà présent puisque la moyenne de l'observation (modèle SAFRAN) est de 5,6 jours (contre 5,2 jours avec le scénario historique d'ALADIN et 3,4 jours avec WRF, modèle au biais froid plus marqué malgré la correction des données). Mais l'augmentation du nombre moyen de jours d'échaudage thermique pourrait être de 4 jours et de 2 jours d'ici 2100 avec les deux modèles dans le cas du scénario le plus chaud.

Les fortes précipitations sur la période phénologique « 10 cm – floraison » constituent un aléa régulièrement observé en Plaine de Caen. En effet, 20 années sur 30 sont concernées par au moins 1 journée durant laquelle les précipitations sont supérieures ou égales à 10 mm. Concernant les très fortes pluies journalières (20 mm), l'occurrence est faible (5 années sur 30). Pour les prochaines décennies, les résultats sont contrastés entre les deux modèles. ALADIN simule une très légère hausse des fortes pluies mais sans tendance significative pour celles dépassant le seuil des 20 mm. Avec WRF, c'est l'inverse, avec une nette augmentation des très fortes pluies alors même qu'elles sont sous-estimées en période de référence.

Enfin, il n'est pas rare de rencontrer en Normandie des gelées tardives, pouvant donc intervenir au début du cycle du lin (fin mars, début avril). Avec l'élévation des températures,

l'occurrence de cet aléa serait en nette diminution dans le cas du RCP 4.5 (occurrence très faible de l'ordre de 1 année sur 30), voire inexistante dans le cas du RCP 8.5.

3. Discussion et perspectives

Si certains aléas ne peuvent pas être étudiés en sortie de modèle climatique (vent fort et grêle), pas plus que des analyses avec des pas de temps fins (précipitations horaires), d'autres indicateurs devront compléter l'analyse. Car le lin est également sensible aux excès d'eau à la surface du sol (eau stagnante à la levée perturbant le développement racinaire, pourriture des pailles au cours du rouissage[12]). La germination sur pied peut également intervenir si le rouissage dure jusqu'à la fin de l'été et que les conditions atmosphériques deviennent fraiches et humides. *A contrario*, en cas de fort ensoleillement et de forte chaleur, les pailles peuvent griller. Enfin, les conditions climatiques favorables à l'apparition de maladies ne doivent pas être négligées. Par exemple la verticilliose est favorisée par les sécheresses et les températures élevées, tandis que lorsque les conditions sont trop humides la septoriose peut intervenir.

Comme les données sont corrigées par la méthode du biais mensuel, et qu'avec le modèle WRF, le nombre de jours de chaleur en période de référence reste encore trop sous-estimé, il conviendra d'envisager une nouvelle correction, par type de temps.

Le déficit hydrique est calculé en ayant recours à une évapotranspiration calculée selon la formule de Thornthwaite afin de comparer les simulations CNRM-2014 et IPSL-2014. Les valeurs obtenues sont alors moins représentatives qu'avec la formule de Turc qui intègre le rayonnement solaire. Ce dernier est simulé avec le modèle ALADIN-Climat. Dans ce cas, le déficit hydrique moyen est de 33 mm sur la période de pousse en période de référence et de 35 mm et 36 mm avec respectivement les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à la fin du siècle. Il y a donc respectivement un écart de 9, 19 et 22 mm entre les deux formules d'évapotranspiration. Le manque d'eau ne diminue donc pas compte-tenu de l'augmentation du rayonnement solaire au printemps mais il n'augmente tout de même pas grâce à l'avancée de la phénologie.

Le lin est également cultivé dans les plaines agricoles de l'Eure, légèrement continentalisées, mais également de Seine-Maritime (Pays de Caux) un peu plus océanisées. Ces espaces devront faire l'objet de la même analyse, qui pourrait ensuite au même titre intégrer les plaines de Picardie et du Nord-Pas-de-Calais.

Conclusion

Finalement, l'élévation de la température d'ici la fin du siècle engendrerait une réduction de la durée du cycle du lin fibre de printemps. Par conséquent, la maturité interviendrait avant la fin de l'été et la culture éviterait alors l'exposition au manque d'eau de cette période. Après un printemps plus sec et plus chaud, le lin ne cumulerait pas au cours de son cycle un déficit hydrique plus important qu'aujourd'hui. Toutefois, le cycle s'effectuerait dans un contexte plus chaud et pourrait rencontrer des vagues de chaleur alors même que la fraicheur est plus propice à cette plante. La Normandie perdrait alors une des caractéristiques favorables à la culture du lin. En revanche, en lien avec ce constat, l'occurrence des gelées en début de cycle pourrait disparaitre. Enfin, les résultats sont plus nuancés pour les fortes et les très fortes pluies mais il convient de rester prudent face à ces évolutions (risque de verse accru). Les données des deux

[12] Le rouissage a lieu après l'arrachage du lin. Ce dernier est alors couché au sol durant tout l'été (de juillet à septembre) et la plante se transforme en fibre. Elle peut rouir grâce à l'alternance de soleil et de pluies. Une fois les pailles sèches, elles sont enroulées et stockées avant le teillage (d'après l'Industrie française du lin : http://www.usrtl-ifl.fr/spip.php?article34).

modèles climatiques (ALADIN-Climat et WRF) dégagent donc des résultats aux tendances similaires excepté pour le risque de verse.

En se plaçant dans l'hypothèse de réalisation du scénario RCP 8.5, les semis devraient être avancés d'environ trois semaines pour maintenir des températures équivalentes à la période de référence pendant toute la durée du cycle. Néanmoins, dans ce cas, il conviendra de vérifier que les conditions climatiques et agronomiques soient malgré tout favorables (jours disponibles pour le semis, modification du calendrier agricole, engorgement en eau des sols en sortie d'hiver, risque de gelées tardives…). D'autres leviers existent, à savoir, la recherche de nouveaux idéo-types de lin, adaptés aux stress climatiques identifiés, ce qui peut passer par la sélection variétale ou les semences paysannes, par exemple. Si le lin de printemps n'est pas adapté à cette nouvelle donne climatique, le lin d'hiver pourrait garantir les débouchés actuels. Il est expérimenté dans les territoires où les effets du changement climatique se font déjà ressentir, à l'intérieur des terres notamment. Cette culture devra faire l'objet de la même analyse.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Eric LEMARINIER, exploitant agricole à Anguerny (Calvados), ainsi que sa fille Mélanie pour la mise à disposition d'une parcelle agricole ayant permis l'ouverture d'une fosse pédologique.

Bibliographie

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56, FAO, Rome, 300p.

Beauvais F., Cantat O., Madeline P., Le Gouée P., Brunel-Muguet S., Medjkane M., 2019. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? Etude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie*, (à paraitre).

Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie., 2019. Panorama de l'agriculture et de l'agroalimentaire en Normandie. *Agriscopie*, 69p.

Dubreuil V., Meme K., Bonnardot V., Aubert J.F., Verger A.C., Melec D., 2019. Changement climatique et date de floraison des pommiers dans le Val de Rance (Bretagne). *Actes du 32ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie,* Thessalonique, Grèce, 83-88.

IPCC, 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team., Pachauri RK., Meyer L.A (eds.)], Genève, IPCC, 151p.

Jolivet C., Aalmeida Falcon J.-L., Berche P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maitre B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N., 2018. Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016-2027. INRA, 150p.

Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., [Dir : Jouzel J.], 2014. Le climat de la France au XXIème siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 64p.

Thornthwaite C., Mather J., 1955. The water balance. Centerton, *Climatology*, 104p.

EFFET DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE PHREATIQUE ET DE L'AGRICULTURE IRRIGUEE DANS LA CÔTE DE BIZERTE (TUNISIE)

BEN HAMMOUDA A., BEN JALLOUL M.

Unité de recherche Régionalisation et Développement régional et urbain, FSHST, Tunis, Tunisie (sebeiafifa@yahoo.fr)

Résumé : *La côte de Bizerte est une région dépendante de l'agriculture irriguée alimentée par trois nappes phréatiques. Les caractéristiques des eaux souterraines ont changé au niveau qualitatif et quantitatif en raison de facteurs naturels et d'interventions aléatoires menées par l'homme dans les zones agricoles et urbaines. On a enregistré une baisse de la nappe phréatique et une dégradation de la qualité des eaux depuis les années 1960.Ces évolutions s'expliquent par la variabilité pluviométrique (entre 300mm/an et 900mm/an) et l'utilisation croissante des pesticides chimiques, la surexploitation de la nappe, l'invasion saline et la contamination des eaux par la fuite d'eau domestique et industrielle non traitée .Tous ces facteurs ont contribué à la baisse de niveau de la nappe (de 0 à 20m en 1966 vers 0 à 40m en 2012), à la salinité élevée (2.1 à 3.4 g/l en 2005 vers 2.6 g/l en 2012) et à des taux élevés de nitrates dans l'eau (233mg/l en 2012). Les surfaces irriguées continuent d'augmenter dans la zone d'étude.*

Mots clés : *nappe phréatique ; variabilité pluviométrique ; agriculture irriguée*

Summary: ***Effect of rainfall variability on the characteristics of the water table and irrigated agriculture in the coast of Bizerte (Tunisia).*** *The coast of Bizerte is a region that depends on irrigated agriculture fed by three water tables. Groundwater characteristics have changed qualitatively and quantitatively due to natural factors and anthropogenic interventions in agricultural and urban areas. There has been a drop in groundwater and a change in water quality since the 1960s. These evolutions are explained by the rainfall variability (between 300mm / yr and 900mm / yr) and the increasing use of chemical pesticides, over-exploitation of groundwater, the saline invasion and contamination of water by untreated domestic and industrial water leakage. All these factors contributed to the decline in the water table (from 0 to 20m in 1966 to 0 to 40m in 2012), the high salinity (2.1 to 3.4 g / l in 2005 to 2.6 g / l in 2012) and the high levels of nitrates in water (233mg / l in 2012). In spite of the deterioration of the aquifer irrigated areas continue to expanding the study area.*

Key words: *water table; rainfall variability; irrigated agriculture*

Introduction

La côte de Bizerte est située à l'Est du gouvernorat de Bizerte et s'étend sur trois délégations : Ras Ejebel, Al-Alia et Ghar El-Melh, couvrant ainsi une superficie de 293,38 km^2 (Fig.1). Cette région principalement de l'agriculture irriguée alimentée par les trois nappes phréatiques de la région Ras El Jjebel, El Alia et Ghar El-Melh. Les ressources des nappes phréatiques sont évaluées à 22.9Mm^3. L'exploitation a connu une progression remarquable estimée à 38.2Mm^3 en 2017 résultant d'une surexploitation. Cette exploitation se fait par le biais de 4614 puits de surfaces de 50 m de profondeur dont plus de 50% sont équipés d'une pompe électrique.

Ainsi, les caractéristiques des eaux souterraines de la côte de Bizerte ont changé au niveau qualitatif et quantitatif en raison de la variabilité de la pluviométrie et d'interventions aléatoires menées par l'homme dans les zones agricoles et urbaines. En 1966, la salinité de la nappe est estimée à 1,7 g/l, la profondeur varie de 0 à 20 m et l'exploitation annuelle est estimée à environ 12M m^3. Alors qu'en 2012 la salinité est relativement élevée dans la nappe à Aousja estimée à 2,6 g/l et la profondeur varie de 0 à 40 m.

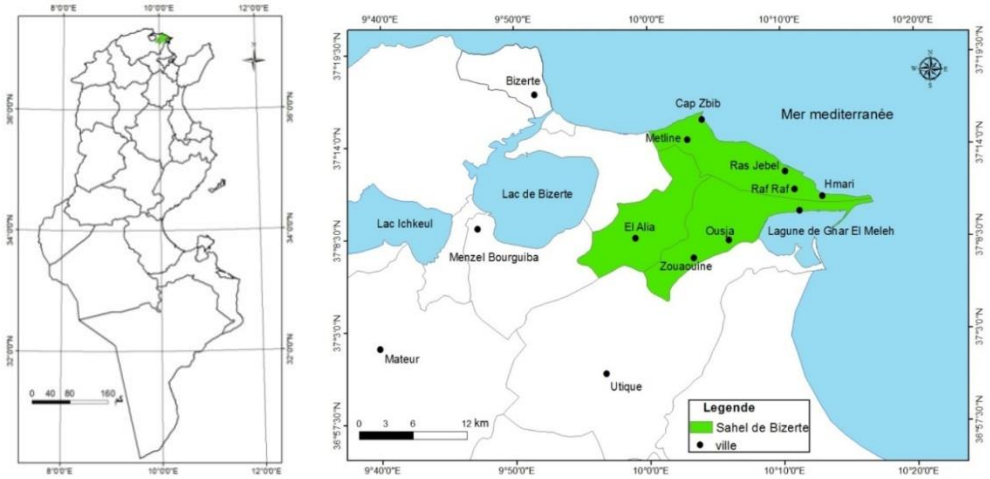


Figure 1. Terrain d'étude

1. Données et Méthodes

L'étude de la relation entre la baisse de la nappe phréatique et l'évolution de la quantité de précipitations se base sur l'analyse des données pluviométriques annuelles et un réseau de surveillance de la nappe composé d'un nombre de puits de surface et de piézomètres (19 puits de surface et de 7 piézomètres à Ras Jebel et 21 puits de surface et 5 piézomètres à Ousja-Ghar El Meleh). Tout d'abord, nous étudions l'évolution des précipitations annuelles entre 1950 et 2017 et le niveau des nappes à certains points de mesure. Puis, nous examinons la dégradation de la qualité des eaux souterraines en relation avec le déclin de la nappe phréatique au moment où les besoins du secteur agricole en eau augmentent suite à l'expansion des superficies irriguées. Les données statistiques utilisées pour étudier le développement des zones irriguées dans la zone d'étude ont été obtenues à partir des cellules de vulgarisation agricole, du rapport d'activités de la Commission régionale de développement agricole de Bizerte 1993, du rapport économique de la Commission régionale de développement agricole de Bizerte 2016 et de la publication du Comité général du développement régional de Bizerte.

1.1. Analyse de la variabilité pluviométrique

Pour étudier les taux de précipitations annuels, nous avons adopté les données disponibles pour trois stations principales, Alia, Ras El Jebel et Ghar El Meleh, pour la période allant de 1950 à 2017, fournies par l'Institut national de météorologie. Les trois stations se caractérisent par des précipitations annuelles importantes entre 500mm et 600mm (voir Fig.2). En ce qui concerne le régime mensuel des précipitations, décembre et janvier sont les mois les plus humides. Il y a une forte concentration dans cette région des premières dates pluvieuses de la saison agricole, principalement entre 60 et 70% pendant le mois de septembre et entre 20 et 30% dans une moindre mesure en août. La fin de la saison des pluies se concentre principalement en juin et, dans une moindre mesure, en mai. Le nombre de jours de pluie est généralement relativement important dans cette région par rapport au reste de la Tunisie et est souvent estimé à 100 jours. La région côtière de Bizerte appartient à l'étage bioclimatique subhumide selon la classification d'Emberger, à savoir les hivers doux qui dominent les parties ouest et sud de la région. D'une manière générale, le climat est caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 550mm/an, qui convient à l'agriculture pluviale (céréales, fourrages et montagne en fournissant un réservoir d'eau destiné à l'agriculture irriguée. Mais la fréquence d'années sèches successives entrave le renouvellement annuel des ressources en eau. On note qu'entre 1952 et 2017 environ 18% des années ont une pluviométrique annuelle inférieure à 300 mm/an et la variabilité mensuelle engendre une baisse au niveau de la nappe durant la période estivale.

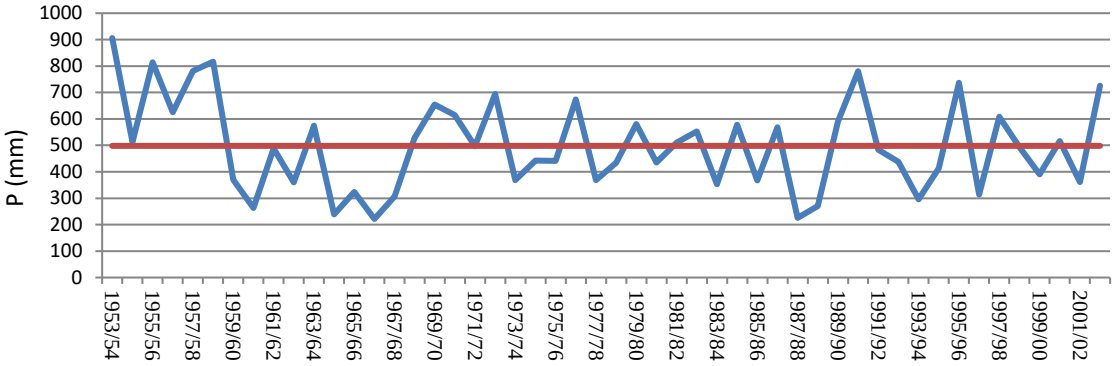


Figure 2. Les moyennes annuelles de pluviométrie dans la côte de Bizerte de 1953 - 2002

1.2. La baisse de niveau des nappes phréatiques

En 2015 le réseau de surveillance de la nappe de Ras Jebel est composé de 19 puits de surface et de 7 piézomètres. Les fluctuations piézométriques saisonnières sont généralement négatives et l'amplitude maximale est de -3.93 m. Pour la nappe de Ousja-Ghar El Meleh la baisse saisonnière est de -2.17m. En 2016, Les fluctuations piézométriques saisonnières de la nappe de Ras Jebel sont généralement négatives et d'amplitude maximale de -1.66 m. Et pour la nappe de Ousja-Ghar El Meleh, le réseau piézométrique comprend 21 puits de surface et 5 piézomètres, la baisse saisonnière maximale a atteint -5.52 m (Tab.1).

La baisse de la piézométrie est amplifiée pendant les années sèches et la période estivale et les ressources sont alors insuffisantes pour répondre aux besoins.

Tableau 1. Fluctuation saisonnière (amplitude maximale en m) de la nappe de Ras Jebel et Ousja-Ghar El Meleh (Source : Direction Générale des Ressources en Eau)

	2011	*2012*	*2013*	*2014*	*2015*	*2016*
Ras Jebel	*-1.67*	*-3.15*	*-4.23*	*-1.96*	*-3.93*	*-1.66*
Ousja/Gahr el Meleh	*-2.23*	*-6.25*	*-3.46*	*-3.46*	*-2.17*	*-5.52*

2. Résultats

2.1. Le changement de qualité des eaux des nappes

En dépit de l'importance de la dynamique agricole dans le développement rural, elle comportait certains aspects négatifs, notamment sur le plan environnemental. La dynamique agricole menace la nappe par l'épuisement et la contamination.

Les impacts négatifs sur les nappes phréatiques dans la zone d'étude ont été multipliés par des interventions humaines aléatoires dans les domaines agricoles et urbains. On a enregistré une baisse significative de la nappe phréatique et un changement de qualité des eaux depuis les années 1960, liée d'une part à la variabilité pluviométrique (entre 300mm/an et 900mm/an) et d'autre part, à l'utilisation croissante des pesticides chimiques dans le domaine agricole, à l'exploitation intensive de la nappe phréatique, à l'invasion saline et à la contamination des eaux douces. La nappe phréatique est également contaminée en raison de la fuite d'eau domestique et industrielle non traitée à cause de l'absence d'une installation d'assainissement dans la région pendant une longue période. Tous ces facteurs ont contribué à la baisse du niveau de la nappe (de 0 à 20m en 1966 vers 0 à 40m en 2012), à la salinité élevée (2.1 à 3.4 g/l en 2005 vers 2.6 g/l en 2012) et à des taux élevés de nitrates dans l'eau (308mg/l en 2005, 233mg/l en 2012), avec une baisse (des taux de nitrates) qui indique l'efficacité de l'alimentation artificielle de la nappe. Cette salinité élevée perturbe la croissance des cultures, limite la

capacité de la plante à absorber l'eau et affaiblit sa productivité. Pour améliorer la qualité de l'eau, on a eu recours à l'alimentation artificielle de la nappe depuis 1993 à travers 13 puits. Ce processus a contribué à l'augmentation du niveau de la nappe de 9,4 cm/jour et à une légère amélioration de la qualité de l'eau et la salinité est de 1 à 3g/l.

Entre 2000- 2005, la surexploitation de la nappe a été réduite, notamment au cours de l'année 2003 qui fut particulièrement pluvieuse (720mm/an). Cependant, les taux de nitrates (entre 32 et 308 mg/l) et de salinité (entre 2,1 et 3,4 g/l) restent élevés dans la nappe de Ras El Jjebel. Pour la nappe de Gar Elmeleh les taux de nitrates varient entre 27 et 251 mg/l et la salinité est comprise entre 2,5 et 4,2g/l à cause de l'utilisation intensive d'engrais chimiques .En 2016 et 2017, le niveau de la nappe phréatique a continué à se dégrader à cause de la pluviométrie. Ainsi la Commission régionale de développement agricole a demandé aux agriculteurs de réduire les zones irriguées.

Globalement, les taux de salinité et de nitrates sont très élevés, à cause de la baisse du niveau des nappes phréatiques due à la fluctuation des précipitations et à la surexploitation due à l'augmentation du nombre de puits (+ 41,42%) et notamment du nombre de puits équipés de pompes électriques doublé de (+89,63%) entre 1966 et 2016 (Tab.2).

Par conséquent, il est devenu nécessaire de prendre conscience de la gravité de la situation de l'eau et de trouver des solutions pour surmonter la crise de l'eau, qui est le résultat à la fois de la variabilité pluviométrique et de l'expansion des surfaces irriguées.

Tableau 2. Evolution de mobilisation de la nappe phréatique de Ras Ejebel- Metlin (Source : Direction générale des ressources en eau, 2000)

Année	*Puits équipés d'un pompage électrique*	*Taux d'équipement %*	*Nombre de puits*	*Taux d'exploitation Mm3/an*
1966	*434*	*38,8*	*1120*	*12*
1985	*710*	*50,9*	*1396*	*13,5*
1990	*687*	*50,1*	*1372*	*11,5*
1995	*600*	*39,9*	*1502*	*12,31*
2000	*705*	*45,9*	*1536*	*12,31*
2005	*792*	*50,7*	*1563*	*10,27*
2010	*819*	*51,8*	*1580*	*10,7*
2016	*823*	*51,95*	*1584*	*11,2*
Tx de croissance	*%89,63*		*%41,42*	

2.2. Extension des périmètres irrigués

Malgré la dégradation de la nappe l'expansion des surfaces irriguées continue. Aussi, la culture irriguée présente depuis longtemps une composante dynamique de l'activité agricole dans le Nord-est en général et sur la côte de Bizerte en particulier avec des besoins en eau qui dépassent les potentialités de la région.

En raison de l'augmentation rapide du nombre de puits, la nappe aquifère a diminué et la salinité a augmenté. La côte de Bizerte a été alimentée en eau par la mise en œuvre du projet de développement de l'agriculture agricole Ras Al-Jebel - Qualat Al-Andalus. Ce projet fait partie du deuxième volet du plan de la direction des eaux du Nord et relève du sixième plan quinquennal (1982- 1986) pour le développement économique et social de la Tunisie dans le

secteur agricole. Des zones irriguées publiques ont été créées dans la zone d'étude au début des années 90, après avoir été connectées au réseau public d'eau d'irrigation. En 1993, elles s'étendaient sur 3 900 ha et étaient divisées en trois zones : la zone irriguée de Ras El Jebel, la zone irriguée d'Alia et la région de Ghar El Melh - Awsja. La superficie irriguée a doublé pour atteindre 8330 ha en 2017. Cela signifie que le taux de croissance est élevé au cours de cette période. Les zones irriguées couvrent 29,31% de la superficie totale de la zone d'étude et représentent 38% des terres cultivées. Ces zones sont spécialisées en premier lieu dans la culture de légumes, en deuxième lieu d'arbres fruitiers et de fourrages irrigués. Elles sont alimentées en eau par le barrage de Sidi Salem et par 4614 puits de surface. Ainsi le nombre de puits et la quantité d'eau utilisée ont augmenté de 34.2M m^3 en 1995 à vers 38.2Mm^3 en 2017, ce qui reflète une surexploitation de la nappe de plus 165% (en 2017) malgré l'utilisation généralisée de l'irrigation locale à faible consommation d'eau (depuis 1999).

L'expansion a concerné toutes les zones irriguées, en particulier Alia ou la superficie irriguée est passée de 70 ha en 1993 à 1981 ha en 2016. Cela s'explique par le déracinement d'oliviers et leur remplacement par des cultures irriguées. En ce qui concerne Ras El Jebel et Ghar El Melh, l'agriculture irriguée étant une tradition agricole ancienne, l'expansion a été moins importante car la culture intensive dans la région remonte à une période antérieure à la préparation des zones irriguées. En fait, elle a été instaurée par les morisques depuis le XVII siècle qui se sont installés dans le nord du pays et qui sont principalement des paysans.

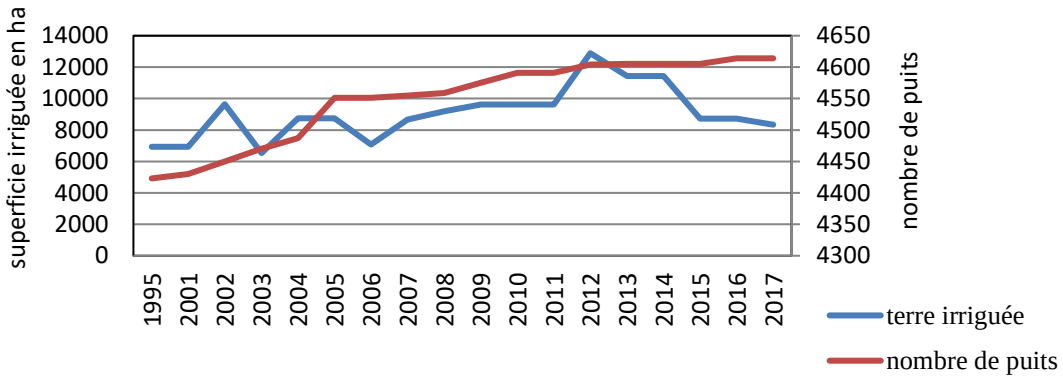


Figure 3. Evolution des surfaces irriguées et du nombre de puits entre 1995 et 2017

Les zones irriguées sont divisées en deux classes. Les superficies publiques irriguées, que l'État a établies et connectées à un réseau d'irrigation public, sont estimées à 5856 ha. Les zones irriguées privées s'étendent autour des puits de surface sur une superficie de 2090 ha.

Conclusions et Discussion

La baisse de la piézométrie est amplifiée pendant les années sèches et la période estivale et les ressources se sont révélées insuffisantes pour répondre aux besoins. La côte de Bizerte a un besoin urgent de réviser le système agricole, qui repose principalement sur l'agriculture irriguée et menace les ressources en eau, et d'orienter l'exploitation des ressources vers des cultures à faible besoin. Il est également nécessaire d'impliquer les paysans dans la formulation de solutions, dans un cadre de gouvernance locale et sensibilise les utilisateurs à l'importance de l'eau et de leurs responsabilités dans la préservation de l'eau. Afin de soulager la surexploitation des ressources en eaux souterraines, il est nécessaire d'économiser et de rationnaliser l'exploitation des eaux. En fin on note la nécessité d'une meilleure gestion des ressources en eaux pour assurer la régulation de stocks d'eau entre les années sèches et les années pluvieuses

et garantir une agriculture durable qui maintienne l'équilibre environnemental et le développement rural.

Remerciements

Nous remercions les responsables au niveau du Commissariat Régional au Développement Agricole de Bizerte (CRDAB) et les membres de l'Unité de recherche Régionalisation et Développement régional et urbain qui ont aimablement accepté de participer à cette étude.

Bibliographie

Banque Africaine de Developement., 1995. Projet d'aménagement hydro-agricole de Ras Djbel-GalaatAndlous. Rapport d'achèvement, 19-335.

Atlas du gouvernorat de Bizerte., 1993. Ministère de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire.

Al Atiri R., 2005. Analyse des politiques hydrauliques : Cas de la Tunisie. *Actes du séminaire euro-méditerranéen Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués*. Sousse, Tunisie, 23p.

Ben Hammouda A., 2019. *La partie orientale de côte de Bizerte : Dynamique économique et relations spatiales.* Thèse doctorat, Faculté des sciences Humaines et Sociales de Tunis, 342p.

Bouchouicha S., 2004. *Etude hydrogéologique de la nappe Utique-Aousja vulnérabilité et établissement des périmètres de protection.* Mémoire de DEA en géologie appliqué, Faculté des Sciences de Bizerte, 79p.

Hamza M.H., Added A., Frances A., Redriguez R., Ajimi M. et Abdeljaouad S., 2008. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Metline-Ras Jebel-Raf Raf selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau*, vol n°21, 75-80.

Henia L., 1993. *Climat et Bilans de l'Eau en Tunisie : Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Publications de l'Université de Tunis I, 391p.

Sayari N. et Rejeb H., 2009. Origine du paysage Andalous dans le nord-ouest tunisien. *Revue les cahiers de la Méditerranée*, n°79, 319-335.

HAUSSE SIGNIFICATIVE DES PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MACTA (NORD-OUEST DE L'ALGERIE)

BENZATER B., ELOUISSI A., BENARICHA B.

Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et de la Géomatique (LRSBG), Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (SNV), Université Mustapha Stambouli de Mascara, Mascara, Algérie (benzaterbenali@gmail.com)

Résumé : *L'analyse des tendances des pluies extrêmes, à différentes échelles spatiales et temporelles, est devenue une préoccupation pour la communauté scientifique depuis le siècle dernier en raison du changement climatique observé. Ce travail décrit l'impact du changement climatique sur la distribution des tendances des pluies maximales quotidiennes dans le bassin versant de la Macta (nord-ouest de l'Algérie). Les données mensuelles maximales de pluies quotidiennes ont été collectées, analysées et complétées pour former une base de données avec 41 stations d'observation sur 41 ans (1970-2010). Depuis 1992, Benzater et al. (2019) ont détecté une évolution significative des tendances croissantes des pluies extrêmes. Les analyses de tendance des pluies maximales mensuelles, saisonnières et annuelles ont été identifiées par le test de Mann-Kendall. L'étude a détecté une tendance à la baisse significative au cours de la première période (1970-1992). En revanche, la deuxième période (1992-2010) a été marquée par le basculement des tendances vers la hausse significative.*

Mots clés : *changement climatique ; pluies extrêmes ; tendance ; Mann Kendall ; Macta ; Algérie*

Summary: ***Significant increase in maximum daily rain in the basin of Macta (northwest of Algeria).*** *The analysis of trends in extreme rain, at different spatial and temporal scales, has become a concern for the scientific community since the last century due to the observed climate change. This work describes the impact of climate change on the distribution of trends in maximum daily rainfall in the Macta watershed (northwest of Algeria). Maximum monthly daily rainfall data were collected, analyzed and supplemented to form a database with 41 observation stations over 41 years (1970-2010). Since 1992, Benzater et al. (2019) detected a significant change in the increasing trends in extreme rains. Trend analyzes of maximum monthly, seasonal and annual rainfall were identified by the Mann-Kendall test. The study detected a significant downward trend during the first period (1970-1992). On the other hand, the second period (1992-2010) was marked by a shift in trends towards a significant increase.*

Key words: *climate change; extreme rain; trend; Mann Kendall; Macta; Algeria*

Introduction

Les pluies extrêmes sont la principale source d'inondations dans le monde. Comprendre leur variabilité spatiale et temporelle joue un rôle important dans la gestion des ressources en eau, en particulier dans l'atténuation et la prévention des inondations.

De nombreuses études montrent que les pluies extrêmes sont devenues plus intenses au cours du 20ème siècle et que cette tendance devrait se poursuivre avec le réchauffement de la planète (Benzater *et al.*, 2019a, 2019b; Caloieroa *et al.*, 2016; Carvalho *et al.*, 2014). Les dernières années ont connu un changement dans la structure des pluies journalières en termes de fréquence et d'intensité dans certaines parties du monde. Les résultats de Min *et al.* (2011) et Westra *et al.* (2013) sur les pluies extrêmes ont montré que près des deux tiers des stations pluviométriques mondiales ont connu cette tendance.

En Algérie, la forte baisse des pluies totales depuis les années 1970 a coïncidé avec une augmentation des dégâts causés par les inondations (Elouissi *et al.*, 2017, 2016 ; Elouissi, 2016). Plusieurs études ont été effectuées sur les totaux pluviométriques, mais peu d'entre elles se sont intéressées aux pluies extrêmes. Il est donc nécessaire de se concentrer sur les pluies extrêmes et leur tendance en Algérie. Nous étudions ici les tendances des pluies extrêmes observées dans 41 stations pluviométriques appartenant au bassin versant de la Macta (nord-ouest de l'Algérie), en appliquant le test de Mann-Kendall.

1. Zone d'étude

La zone d'étude est située dans le bassin versant de Macta, dans le nord-ouest de l'Algérie, entre -1,25 ° Ouest et 0,60 ° Est en longitude et entre 34° et 36° Nord en latitude (Fig.1). La Macta est un bassin versant d'une superficie de 14410 km².

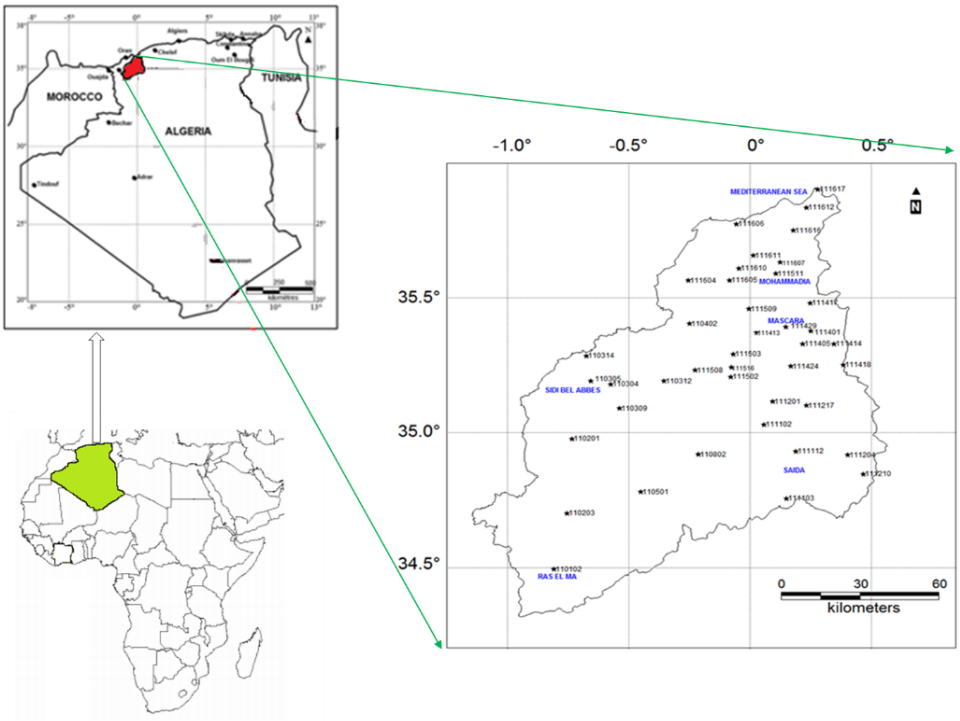


Figure 1. Carte de localisation de la Macta avec les stations sélectionnées

2. Données et méthodes

2.1. Données

Les données pluies maximales journalières (Pjmax en mm/j) ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). 41 stations ont été retenues et symbolisées numériquement (par exemple, Ras El Ma: 110102, Mascara: 111429). La période d'observation de ces séries temporelles est de 41 ans (1970-2010).

2.2. Méthodes

2.2.1. Test de Mann-Kendall

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (MK) (Mann, 1945 et Kendall, 1975) a été utilisé pour déterminer les tendances monotones des séries météorologiques non normales (Ouarda *et al.*, 2014). L'hypothèse nulle H0 est celle de stationnarité de la série (pas de tendance). L'hypothèse alternative H1 correspond à la non-stationnarité de la série.

Le test commence par calculer le nombre de pairs correspondants (P = le nombre de (x, y) où y augmente à mesure que x augmente) et discordants (M = le nombre de (x, y) où y diminue lorsque x augmente).

L'application de la méthode de Mann-Kendall aux pluies extrêmes mensuelles, saisonnières et annuelles dans le bassin versant de Macta donne des résultats de coefficients τ variant entre -0,50 et 0,50. La tendance de chaque série est déterminée par la classification de Westmacott et Burn (1997) (Tab.1). Le seuil de signification est la limite entre la variabilité des pluies interne (naturelle) et la variabilité externe (anthropique ou changement climatique).

Tableau 1. Classifications des tendances selon Westmacott et Burn (1997)

Catégorie	Strong Increasing Trend	Moderate Increasing Trend	Non-Significant Trend	Moderate Decreasing Trend	Strong Decreasing Trend
	SIT	**MIT**	**NST**	**MDT**	**SDT**
$\mathbf{Z_{Kendall}}$	$Z>0$ and $Z > Z_{0.05}$	$Z>0$ and $Z_{0.10}<Z \leq Z_{0.05}$	$-Z_{0.10} \leq Z \leq Z_{0.10}$	$Z<0$ and $-Z_{0.05}<Z \leq - Z_{0.10}$	$Z < 0$ and $Z < -Z_{0.05}$

3. Résultats et discussion

L'analyse spatiotemporelle des tendances des maxima journaliers des pluies du bassin versant de la Macta sur deux périodes (1970-1992) et (1992-2010) a été réalisée sur une échelle mensuelle, saisonnière et annuelle. Le tableau 2 présente les catégories de tendances en fonction des valeurs de τ, de la taille de la série n et du seuil de signification α. Le tableau 2 présente les cinq tendances obtenues selon classification de Westmacott et Burn (1997).

Tableau 2. Cinq catégories de tendances selon Westmacott et Burn (1997)

Catégorie	**SIT**	**MIT**	**NST**	**MDT**	**SDT**
$\mathbf{Z_{Kendall}}$	$Z_{Kendall}>1.64$	$1.28< Z_{Kendall} \leq 1.64$	$Z_{Kendall}<-1.28$	$-1.28>Z_{Kendall} \geq -1.64$	$Z_{Kendall}<-1.64$

3.1. Tendances mensuelles des pluies extrêmes

L'application du test de Mann-Kendall, aux pluies mensuelles maximales pour les 41 stationsdu bassin versant de Macta, nous permet d'obtenir lescoefficients mensuels τ de Kendall avec la classification de Westmacott et Burn (1997) (Fig.2).

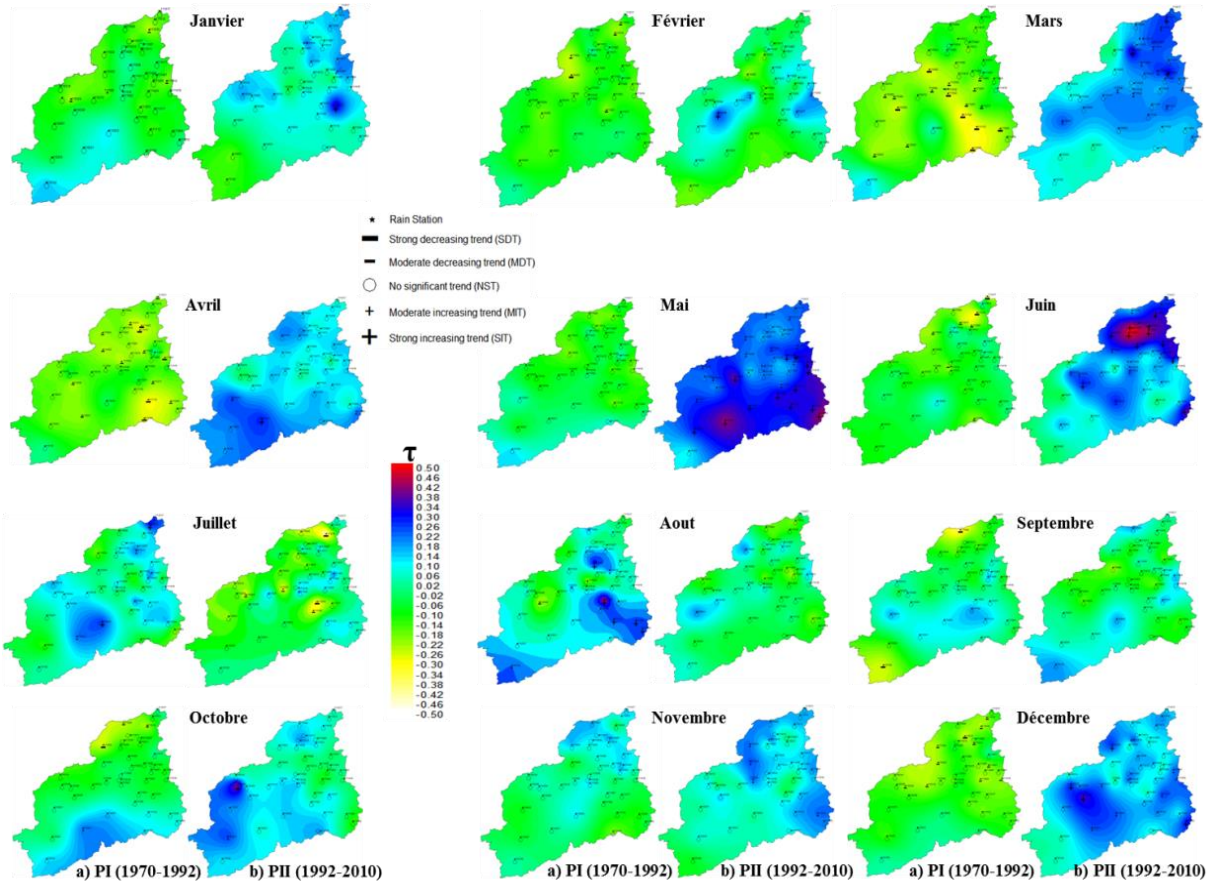


Figure 2. Tendances mensuelles des pluies maximales. L'échelle de couleur montre les coefficients mensuels tau (τ) de Kendall. Les symboles montrent les catégories des tendances des pluies extrêmes des 41 stations.

La figure 2a décrit les tendances des 12 mois de la période I (1970-1992): A l'exception des deux (02) mois: août et octobre, qui ont un faible pourcentage de croissance significative,

respectivement 17% et 3%, le reste des mois montre une tendance à la baisse non significative. Le mois de mars est marqué par un fort pourcentage de tendance à la baisse significative de 41%. Le mois de mai est également marqué par un pourcentage élevé de 37% avec 15 stations. Les mois de juin et novembre ne montrent aucune tendance significative. Le mois de septembre montre un faible pourcentage de diminution (5% avec 2 stations) et enfin le mois de décembre est marqué par un pourcentage relativement élevé de 27%.

Dans de la figure 2b, nous caractérisons les tendances des 12 mois de la deuxième période II (1992-2010): Au cours de cette période la tendance décroissante bascule vers la tendance croissante avec des pourcentages variables: les mois de mars, mai, juin et décembre montrent respectivement une croissance significative de 32%, 66%, 49% et 30%. Les stations les plus touchées par ce changement climatique sont situées principalement à l'ouest, au centre et au nord du bassin versant.

La figure 2b montre que les mois de mars, mai, juin et décembre sont affectés par l'augmentation de la tendance des pluies extrêmes avec respectivement 13, 27, 20 et 12 stations (soit 32%, 66%, 49% et 29%) au cours de la deuxième période (1992-2010).

3.2. Tendances saisonnières des pluies extrêmes

L'application du test de Mann-Kendall, aux pluies extrêmes saisonnières, nous permet d'obtenir les résultats des coefficients saisonniers τ de Kendall (Fig.3).

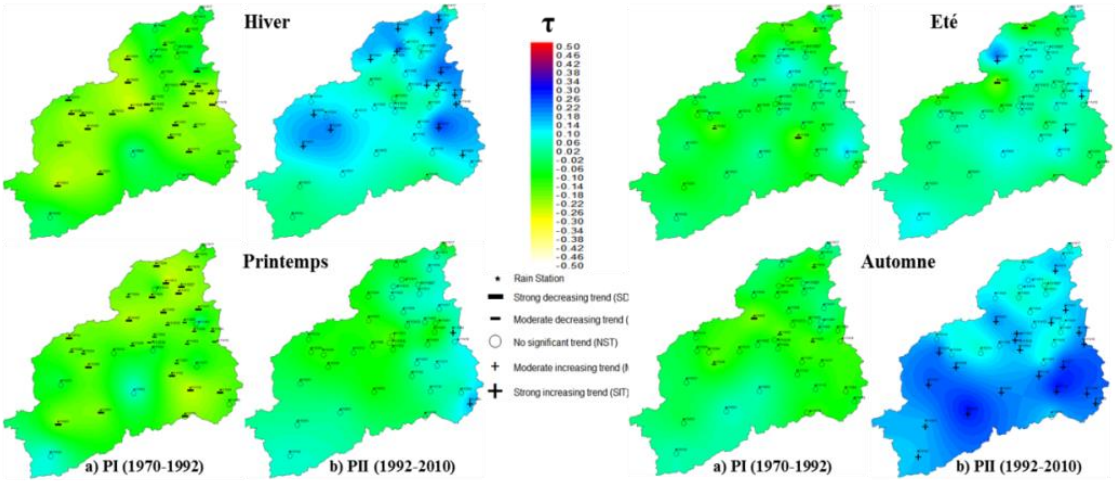


Figure 3. Tendances saisonnières des pluies maximales. L'échelle de couleur montre les coefficients saisonniers tau (τ) de Kendall. Les symboles montrent les catégories des tendances des pluies extrêmes des 41 stations.

La figure 3 montre les tendances saisonnières des pluies maximales quotidiennes :

- Période I (1970-1992): l'hiver est caractérisé par une tendance à la baisse significative de 63% réparties sur tout le bassin. La saison de printemps est marquée par une tendance décroissante très significative avec 77%. L'été et l'automne ne comptent que 10% et 12% en décroissance significative (Fig.3a).
- Période II (1992-2010): le printemps et l'été n'ont aucune tendance significative. L'hiver et l'automne manifestent une tendance à la hausse significative avec respectivement 37% et 51% (Fig.3b). Les deux saisons d'hiver et d'automne peuvent être donc considérées comme affectées par le changement climatique.

3.3. Tendances annuelles des pluies extrêmes

L'application du test de Mann-Kendall aux pluies maximales annuelles pour les 41 stations de la Macta, permet d'obtenir les résultats des coefficients annuels τ de Kendall (Fig.4).

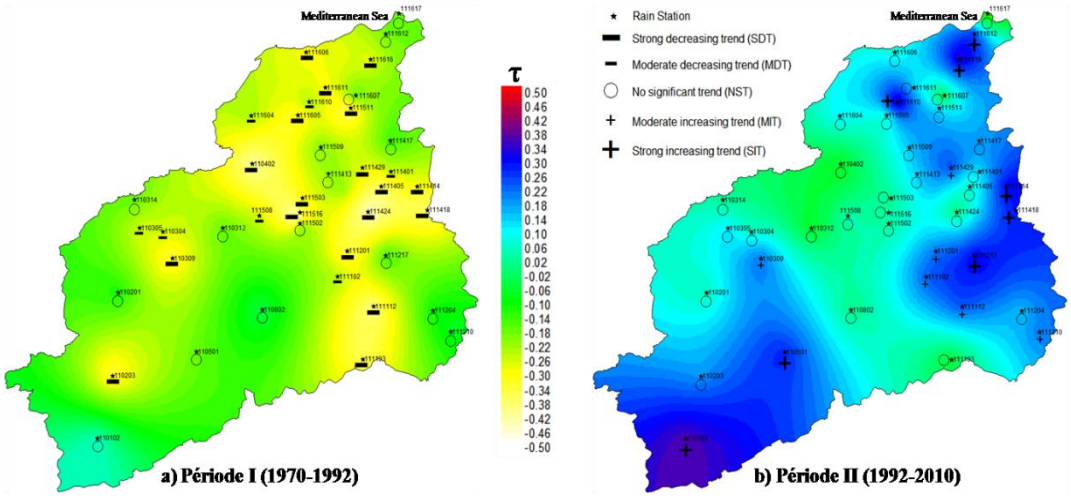


Figure 4. Tendances annuelles des pluies maximales. L'échelle de couleur montre les coefficients annuels tau (τ) de Kendall. Les symboles montrent les catégories des tendances des pluies extrêmes des 41 stations.

L'examen de la figure 4, qui présente les cartes de tendances des pluies maximales annuelles du bassin de la Macta, montre qu'un basculement de la tendance décroissante significative de 61% au cours de la première période (Fig.4a) vers la tendance croissante significative de 34% au cours de la deuxième période (1992-2010) (Fig.4b).

Conclusion

L'application de la méthode Mann-Kendall, aux pluies extrêmes dans le bassin de la Macta durant la période (1970-2010), nous a permet de détecter :

A l'échelle mensuelle, les cinq mois de mars, mai, juin, novembre et décembre ont été affectés par la hausse significative au cours de la deuxième période (1992-2010). Le mois le plus touché par ce phénomène est le mois de mai qui a montré une tendance de 66%.

A l'échelle saisonnière, les deux saisons d'Hiver et d'Automne sont marquées par la hausse significative. Il est clair que la saison d'Automne est la plus frappée par ce phénomène avec 51% (21 stations affectées).

À l'échelle annuelle, le changement climatique se caractérise par un basculement total de la tendance à la baisse significative observée pendant la période I (1970-1992) vers la tendance à la hausse significative observée pendant la période II (1992-2010) sur l'ensemble du bassin de la Macta, avec 14/41 stations touchées (34%).

Bibliographie

Benzater B., Elouissi A., Benaricha B., Habi M., 2019. Spatio-temporal trends in daily maximum rainfall in northwestern Algeria (Macta watershed case, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. ISSN 1866-7511 Volume 12 Number 11 Arabian Jourenal of Geosciences 12, 1-18. Doi: 10.1007/s12517-019-4488-8.

Benzater B., Hachemaoui A., Elouissi A., Benaricha B., 2019. The Reuse of Wastewater in the Context of Climate Change: Case of Mascara Wilaya (Algeria). *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources, Advances in Science, Technology & Innovation*. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5_38.

Blanchet J., Molinié G. and Touati J., 2018. Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Clim Dyn* 51, 799–812. Doi: https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7.

Caloieroa T., Coscarelli R., Ferrari E. & Sirangelo B., 2016. Trends in the daily precipitation categories of Calabria (southern Italy). *Science Direct. Procedia Engineering,* 162, 32–38.

Carvalho J. R. P., Assad E. D., Oliveira A. F. & Pinto H. S., 2014. Annual maximum daily rainfall trends in the Midwest, southeast and southern Brazil in the last 71 years. *Weather and Climate Extremes*, v. 5–6, 7-15. Doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2014.10.001.

Elouissi, 2016. *Changement climatique, impacts et vulnérabilité. Cas du bassin versant de la Macta.* Doctoral thesis. Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen, Tlemcen, Algérie. URL : http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/15065/1/Doc.Hyd.Elouissi.pdf

Elouissi A., Şen Z. & Habi M., 2016. Algerian rainfall innovative trend analysis and its implications to Macta watershed. *Arabian Journal of Geosciences.* Doi: 10.1007/s12517-016-2325-x.

Elouissi A., Habi M., Benaricha B., Boualem S.A., 2017. Climate change impact on rainfall spatiotemporal variability (Macta watershed case Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. ISSN: 1866-7511. Doi: 101007/s12517-017-3264-x.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)., 2013. The physical science basis. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Min S. K., Zhang X., Zwiers F. W., Hegeri G. C., 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, Vol 470.

Ouarda T.B.M.J, Charron C, Niranjan Kumar K, Marpu PR, Ghedira H, Molini A et Khayal I., 2014. Evolution of the rainfall regime in the United Arab Emirates. *Journal of Hydrology* 514, 258–270.

Westmacott J. R., & Burn D. H., 1997. Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, 202, 263–279.

Westra S., Alexander L. V., Zwiers F. W., 2013. Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. 3904, *Journal of climate*, Volume 26.

OUTIL D'ALERTE POUR IDENTIFIER LES PERIODES PROPICES AU RAFRAICHISSEMENT DES PARCS

BERNARD J.[1], BODÉNAN P.[2,3,] KÉRAVEC P.[3,4], MORILLE B.[2,5], RODLER A.[3,6]

1 Chercheur associé au LAB-STICC, Université de Bretagne Sud, France (jeremy.bernard@zaclys.net)
2 Soleneos, France
3 Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV), Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France
4 Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA), École Centrale Nantes, Centre National de la Recherche Scientifique, Nantes, France
5 Chercheur associé au Crenau, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, Nantes, France
6 Cerema, Equipe-Projet BPE, France

Résumé : *Dans le cadre du projet CoolParks, des campagnes de mesures mobiles vont être menées pour mesurer le rafraîchissement occasionné par des parcs et la diffusion de cette fraîcheur dans leurs quartiers environnants. Afin d'identifier les conditions propices pour la mise en œuvre de ces campagnes, des mesures fixes de température de l'air réalisées pendant plusieurs années dans des parcs nantais et leur environnement urbain sont utilisées. Cinq périodes intéressantes par saison sont identifiées pour les futures campagnes : 3 périodes diurnes et 2 périodes nocturnes. Pour chacune de ces combinaisons {période, saison}, les conditions météorologiques permettant de maximiser le rafraîchissement des parcs ou la diffusion de fraîcheur dans leur environnement proche sont étudiées. Des arbres de décision sont construits pour faciliter la mise en œuvre d'alertes permettant d'identifier les journées propices à la tenue des futures campagnes de mesure.*

Mots clés : *mesure mobile ; alerte météorologique ; rafraîchissement urbain ; espaces verts ; température d'air*

Summary: ***Alert tool for identifying good periods to refresh parks.*** *In the coolparks framework, mobile measurement campaigns will be performed to quantify the cooling induced by urban parks and the cool air diffusion within their surrounding urban areas. In order to identify the optimal conditions to implement these campaigns, fixed air temperature measurements performed during several years within parks (in Nantes, France) and their surrounding urban environment are utilized. Five interesting periods per season are identified for future campaigns : 3 are diurnal and 2 are nocturnal. For each of the {period, season} combinations, the meteorological conditions that allow to maximize the park cooling or the cool air diffusion within their close environment are investigated. Decision trees are constructed to facilitate the weather alert implementation allowing to identify the favorable days for future measurement campaigns taking place.*

Key words: *mobile measurement; weather alert; urban cooling; green spaces; air temperature*

Introduction

Plusieurs solutions existent pour rafraîchir la ville. Une des solutions les mieux documentées est l'usage de la végétation. En quantité importante (par exemple dans un parc), plusieurs études ont montré qu'elle permettait d'obtenir un rafraîchissement de quelques degrés Celsius (Barradas, 1991; Jauregui, 1990) et que cette fraîcheur pouvait être mesurée jusqu'à une fois la taille du parc (Jauregui, 1990). Ces résultats ont été observés durant le jour et la nuit et sous différentes conditions météorologiques. Bernard *et al.* (2018) ont identifié une diffusion maximale par vent faible et avec un grand nombre de rues adjacentes au parc. Cependant, ces résultats sont issus de simulations réalisées avec des hypothèses simplificatrices fortes et méritent donc d'être approfondis.

Le projet de recherche CoolParks, financé par l'ADEME, a donc pour objectif de mieux comprendre et d'évaluer l'effet des espaces verts sur le climat urbain. Dans ce cadre, des campagnes de mesure mobiles seront réalisées pour évaluer leur impact sur le rafraîchissement (dans le parc et également dans ses alentours). Plusieurs stations de mesure seront utilisées pour mesurer la température et l'humidité de l'air à l'intérieur de deux espaces verts nantais ainsi que dans leurs rues adjacentes.

Les mesures mobiles présentent l'avantage de couvrir un territoire très large. Leur inconvénient majeur est leur faible représentativité temporelle. Il faut donc identifier les

périodes pendant lesquelles il sera le plus intéressant de réaliser les campagnes. On cherchera donc deux types de périodes : celles où le parc est beaucoup plus froid ou beaucoup plus chaud que la ville ; celles où la fraîcheur (ou chaleur) du parc se diffuse dans ses quartiers périphériques.

Ces conditions sont dépendantes de la dynamique du climat urbain (alternance jour / nuit - qui est fonction de la saison) et des conditions météorologiques (certains jours ne présenteront aucune différence de température en raison de conditions défavorables). Ce travail présente une méthodologie qui permet d'identifier les conditions optimales pour réaliser nos campagnes de mesure dans le cadre de CoolParks. Ces conditions correspondent donc à (i) des périodes particulières de la journée, (ii) des conditions météorologiques particulières.

À partir de ces premiers résultats, des alertes météorologiques seront mises en place afin de réaliser les campagnes de mesure dans des conditions qui sembleront optimales.

1. Données et Méthodes

1.1. Données

Dans le projet CoolParks, les campagnes de mesures auront lieu dans des espaces verts de la ville de Nantes. Au cours de précédents travaux de recherche, (réalisés dans le cadre du projet URBIO), des capteurs de température d'air ont été placés dans des tissus urbains contrastés le long d'un gradient ville-campagne au nord-ouest (Fig.1). Les données de température de sept stations, échantillonnées toutes les 15 minutes entre 2015 et 2017, seront utilisées dans cette étude préliminaire. Ces stations sont classées en trois catégories :

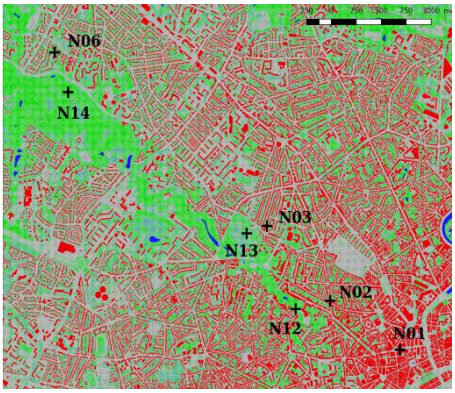


Figure 1. Position géographique des sites de mesure utilisées dans l'étude.

- parcs : trois stations sont situées dans des espaces verts (N12, N13 et N14)
- quartiers adjacents : trois stations sont situées dans les quartiers adjacents aux parcs (respectivement N02, N03, N06)
- centre : une station située dans le centre-ville de Nantes (N01), considérée comme suffisamment éloignée des parcs pour être représentative de conditions urbaines.

Il est important de noter que les stations N12 et N14 sont toutes deux situées en fond de vallée et à l'ombre des arbres. Ces sites peuvent donc développer un micro-climat propres à ces caractéristiques. Cette hypothèse pourra être vérifiée lors de la mise en place des mesures mobiles. Pour caractériser les conditions météorologiques, des données tri-horaires pour la station Météo-France de Bouguenais (située dans l'agglomération de Nantes) sont utilisées[1]. Les paramètres atmosphériques suivants sont conservés pour notre étude : nébulosité, pression atmosphérique, précipitations, humidité relative et température de l'air et vitesse du vent[2].

[1] Données d'observation terrestre produites par Météo-France (en libre accès) : https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=90&id_rubrique=32

[2] Pour plus d'information sur la signification de ces paramètres, se reporter à la documentation fournie par Météo-France : https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=90&id_rubrique=32

1.2. Méthode

L'objectif est de prévoir les périodes et les conditions météorologiques qui exacerbent au moins l'une des conditions suivantes :

- Condition C1 : les différences thermiques entre un parc et un quartier climatiquement peu sensible à l'effet des parcs (soit le centre urbain, soit le quartier adjacent),
- Condition C2 : la diffusion de fraîcheur ou de chaleur d'un parc dans ses quartiers alentours (diminution de l'écart de température parc/centre entre deux périodes où l'on s'attendrait à ce qu'elle augmente ou qu'elle soit stable).

Pour cela, après avoir déterminé les périodes correspondant à nos conditions C1 ou C2 et des indicateurs représentatifs de ces périodes, nous cherchons à construire un arbre de décision utilisant les données de la station Météo-France. Pour minimiser les effets saisonniers, le traitement s'effectuera sur des données classées par saison (telles que définies par l'Organisation Mondiale de Météorologie pour l'hémisphère nord). Pour chaque saison, un jour médian des différences de température entre chaque parc et son quartier alentour et chaque parc et la station centre-ville est calculé (Fig.2). Il permet d'identifier cinq périodes correspondant à nos conditions :

- pour C1 : en journée quand la différence de température centre/parc ($\Delta T_{C\text{-}P}$) est minimale (**période P_{J1}**), quand la différence de température quartier adjacent/parc ($\Delta T_{QA\text{-}P}$) est maximale (**période P_{J2}**) et la nuit quand ces toutes ces différences sont maximales (**période P_{N1}**),
- pour C2 : en journée quand la différence de température quartier adjacent/parc diminue par rapport à sa valeur en P_{J2} (**période P_{J3}**) et la nuit quand la différence de température centre/parc diminue par rapport à sa valeur en P_{N1} (**période P_{N2}**).

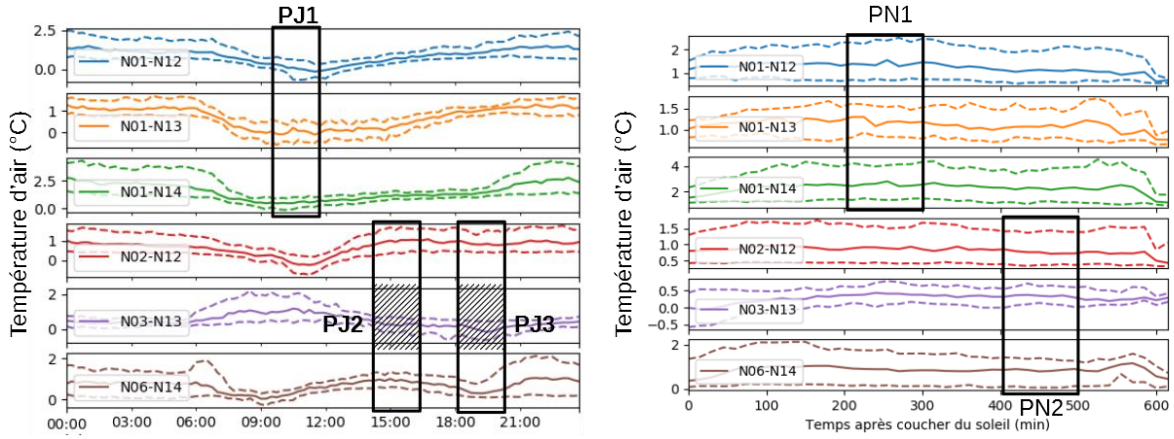


Figure 2. Différences de température médianes pour la période estivale et identification des périodes optimales P_i (a) pour la période diurne, (b) pour la période nocturne. Trait plein : valeur médiane pour chaque pas de temps. Traits pointillés inférieur et supérieur : respectivement valeur du pourcentile 25 et 75.

La différence de température $\Delta T_{03\text{-}13}$ est volontairement exclue en période diurne car les résultats sont trop atypiques.

Les différences de température sont moyennées tous sites confondus (centre/parc pour les périodes correspondant à C1, quartier adjacent/parc pour les périodes correspondant à C2) pour chaque période. Ces moyennes représentent les indicateurs qui seront utilisés pour identifier les conditions météorologiques propices à C1 ou C2. Il faut maintenant décider du critère permettant de décider qu'une combinaison {journée, période} appartient aux conditions C1 ou

C2. Pour cela, on fixe un seuil arbitraire de 20 % des valeurs les plus hautes de notre indicateur pour C1 et 20 % des valeurs les plus basses pour C2.

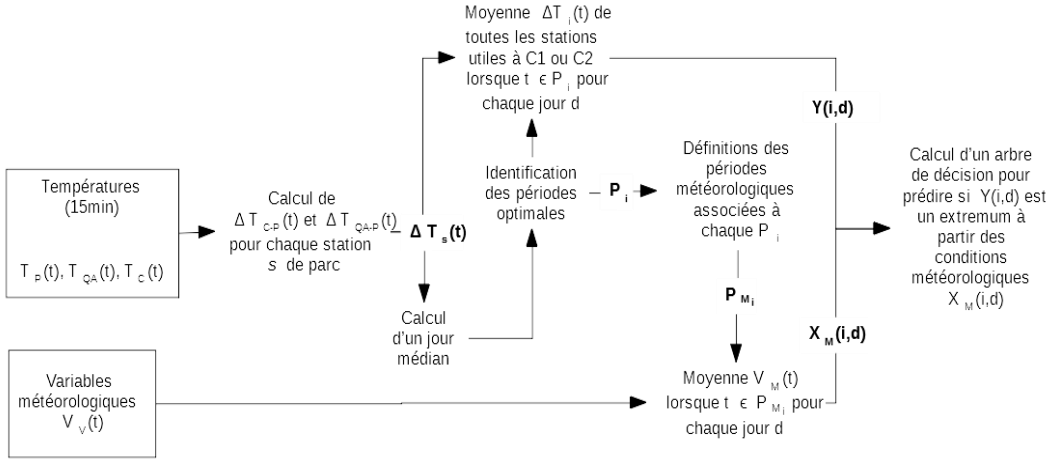


Figure 3. Procédure utilisée pour l'identification des conditions météorologiques optimales pour la mise en œuvre des campagnes de mesure.

Finalement, pour chaque période P_i, la valeur de nos indicateurs est impactée par les conditions météorologiques qui se sont déroulées pendant une période PM_i précédant ou confondue avec P_i. Une période P_{Mi} est arbitrairement définie pour chaque période P_i. Pour chaque période météorologique, la moyenne journalière de chaque variable météorologique est calculée et sert d'indicateur pour la construction de l'arbre de décision. L'arbre de décision doit permettre de prévoir l'appartenance d'une combinaison {journée, période} aux conditions C1 (20 % des valeurs de l'indicateur les plus hautes) ou C2 (20 % des valeurs de l'indicateur les plus basses).

Pour tester l'influence de la profondeur de l'arbre sur la précision des prédictions, différentes profondeur maximales sont testées (entre 1 et 7). Pour chaque profondeur, 70 % des données saisonnières sont tirées aléatoirement (en conservant un ratio de 20 % des valeurs extrêmes) pour construire l'arbre, les 30 % restantes sont utilisées pour vérifier la prédiction de l'arbre. Cette procédure est répétée 50 fois pour chaque profondeur. La profondeur ayant démontré les meilleurs résultats de prédiction est conservée pour construire l'arbre final en utilisant 100 % des données. La figure 2 récapitule l'ensemble de ces étapes.

2. Résultats

Pour la saison estivale, la Figure 4 présente la différence de température moyenne observée pendant P_{J2} entre les stations et leur quartier alentour (N06-N14 et N02-N12) en fonction de l'humidité relative moyennes pendant la période P_{MJ2} (démarrant 8h avant et terminant 2h après le début de P_{J2}).Plus l'air est saturé en humidité, moins la différence de température entre le parc et sa périphérie semble marquée (attribuable à un potentiel d'évapotranspiration de la végétation limité). Concernant la construction de l'arbre, la profondeur optimale de l'arbre est identifiée à partir du ratio de bonne prédiction : la valeur médiane la plus élevée est choisie comme valeur optimale (Fig.5 pour la période PJ2).

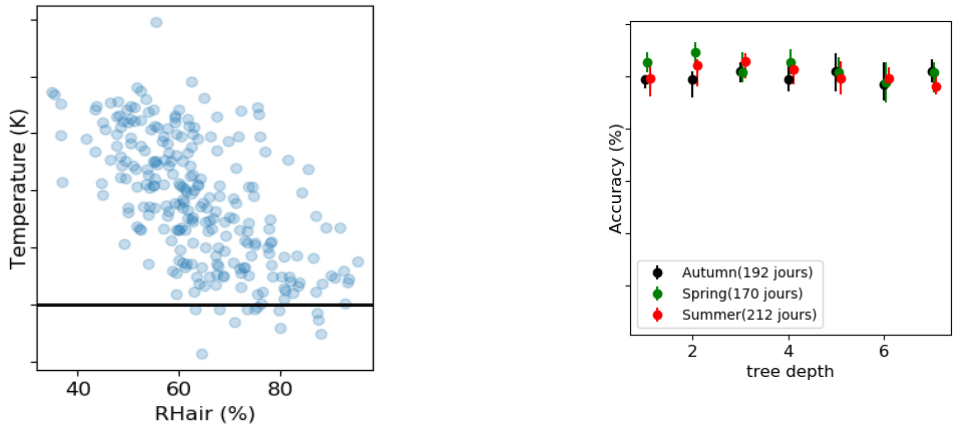


Figure 5. Différence de température parcs-quartier pendant PJ2 en fonction de l'humidité relative de l'air

Globalement, le taux de bonne prédiction diminue avec la profondeur de l'arbre. Le taux optimal est sensiblement le même (≈80 %) pour toutes les combinaisons {Période, saison}. Seules les valeurs printanières pour la période P_{N1} dénotent légèrement avec une précision optimale inférieure à 70 % (qui s'explique notamment par un échantillon d'apprentissage de taille faible). Pour l'été et la période P_{J2}, la profondeur optimale est de 3. L'arbre de décision final est construit pour chaque combinaison {période, saison} à partir de la valeur de profondeur optimale relevée. Un exemple est donné Figure 6 pour {P_{J2}, été}.

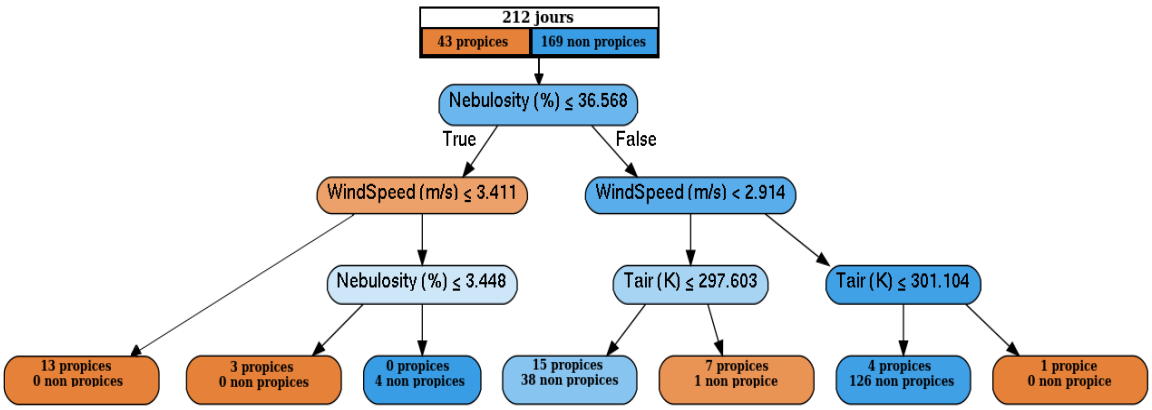


Figure 6. Arbre de décision permettant d'identifier une différence de température maximale entre ville et parc.

Des critères sur quatre variables météorologiques sont utilisés pour identifier les conditions météorologiques favorables. Par exemple si l'on s'intéresse à la branche gauche de l'arbre, si la nébulosité est faible, le vent doit être faible ou s'il est important c'est l'humidité relative qui doit être faible.

Pour les autres combinaisons {périodes, saisons}, le tableau 1 récapitule les variables météorologiques retenues pour l'identification des extremums. Globalement, les conditions météorologiques favorables diffèrent avec la saison et également avec la période. Seule la période hivernale semble avoir en commun à chaque période la vitesse de vent comme variable explicative de l'obtention des extremums.

Tableau 1. Variables présentes dans l'arbre de décision correspondant à chaque combinaison {période, saison}. Les cases grisées correspondent à des combinaisons qui ne présentent pas d'intérêt pour l'étude.

Saisons Périodes	Printemps	Été	Automne	Hiver
PJ1	Température d'air	Pression atmosphérique	Nébulosité	
PJ2	Température d'air Humidité relative Pression atmosphérique	Nébulosité Vitesse du vent Humidité relative Température d'air	Humidité relative Vitesse du vent Nébulosité Pression atmosphérique	
PJ3	Humidité relative Nébulosité Température de l'air	Pression atmosphérique	Nébulosité	Vitesse du vent
PN1	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Humidité relative	Vitesse du vent
PN2		Nébulosité	Température d'air	

Conclusions et Discussion

Ce travail permet de créer des alertes en vue de mettre en œuvre des campagnes de mesure favorables à la mesure :

- Condition C1 : pour de larges différences de température entre un parc nantais et la ville qui l'entoure,
- Condition C2 : lorsqu'une diffusion importante de fraîcheur a lieu entre les parcs et leurs quartiers adjacents.

Pour cela, 5 périodes favorables (3 diurnes, 2 nocturnes) à ces observations ont été identifiées pour chaque saison. Pour chaque combinaison {période, saison}, un arbre de décision permet de prédire si un jour est propice à l'observation d'extremums correspondant à l'une des 2 conditions. Ces arbres sont basés sur les conditions météorologiques observées à la station Météo-France la plus proche. Il reste maintenant à mettre en place les alertes à partir de chacun de ces arbres et des données météorologiques prévues pour les prochains jours. Ces résultats permettent d'avoir une information objective justifiant la mise en place des campagnes de mesure qui auront lieu dans le cadre du projet CoolParks.

Remerciements

Le projet est financé par l'ADEME (2019-2023), lauréat à l'appel MODEVAL URBA. Les analyses créées dans ce travail reposent sur les données tri-horaires ouvertes de Météo-France et sur les données de l'ONEVU obtenues dans le cadre du projet URBIO.

Bibliographie

Barradas V., 1991. Air Temperature and Humidity and Human Comfort Index of Some City Parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology,* 35 (1), 24-28. Doi: https://doi.org/10.1007/BF01040959.

Bernard J., Rodler A., Morille B., et Zhang X., 2018. How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air?. *Climate,* 6 (1), 10p.

Jauregui E., 1990. Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and buildings,* 15 (3-4), 457–463

ETUDE HYDROCLIMATIQUE DANS LE NORD-OUEST DE MADAGASCAR : APPORT DES DONNÉES SATELLITAIRES *GRACE*

BIGOT S.[1], DUMAS D.[2], BROU Y.T.[3], RAMBOARISON R.[4], RAZANAKA S.[5], PHILIPPON N.[1]

1 UGA, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001), Grenoble, France
2 Université Lyon 3, Environnement Ville Société (EVS, UMR 5600), Lyon, France
3 Université de La Réunion, Laboratoire OIES (Océan Indien : Espace et Sociétés), Saint-Denis, France
4 Cabinet d'études BEST-IDEES, Antananarivo, Madagascar
5 Centre National de Recherche en Environnement (CNRE), Antananarivo, Madagascar

Résumé : *Les données spatiales GRACE permettent d'estimer les variations saisonnières et interannuelles des hauteurs d'eau continentales sur la période 2003-2016, ce qui est crucial à Madagascar qui ne possède quasiment pas de relevés hydroclimatiques in situ récents. A l'échelle du bassin versant du Betsiboka, plus grand fleuve malgache, la tendance à la baisse des contenus en eau continentaux, notamment après 2007, est corrélé à une diminution des précipitations mais aussi à l'influence des oscillations du dipôle thermique de l'océan Indien. L'évolution des conditions de surface via la déforestation doit aussi être intégrée dans ces tendances.*

Mots clés : *hydroclimatologie continentale ; télédétection ; données GRACE ; Madagascar*

Summary: ***Hydroclimatic study in the north-west of Madagascar: contribution of grace satellite data.*** *The GRACE spatial data allow the estimation of seasonal and interannual variations in ground water equivalent thickness over the 2003-2016 period, which is crucial in Madagascar, which has almost no recent in situ hydroclimatic records. On the scale of the Betsiboka catchment basin, the largest Malagasy river, the negative trend in continental water content, particularly after 2007, is correlated with a decrease in rainfall but also with the influence of oscillations in the Indian Ocean thermal dipole. Changes in surface conditions through deforestation must also be integrated into these trends.*

Key words: *continental hydroclimatology; remote sensing; GRACE data; Madagascar*

Introduction

Madagascar est l'un des pays les plus vulnérables aux aléas météorologiques extrêmes, aux impacts du changement climatique ainsi qu'à la déforestation d'origine anthropique. Les principaux cours d'eau drainent une superficie d'environ 335 405 km², soit 57 % du pays (SHER, 2017). La même étude estime les ressources en eau de surface à 332 km³/an et celles souterraines à 55 km³/an. Mais ces estimations hydrologiques proviennent de sources anciennes ou ponctuelles dans le temps et/ou l'espace, à partir des données de Chaperon *et al.* (1993), de celles du *Global Runoff Data Centre* (GRDC) ou de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar (DGMET). Le suivi et les bilans hydroclimatiques nationaux reposent sur des estimations imprécises et anisotropes qui ne permettent pas d'étudier convenablement les variations régionales ou intra-saisonnières, déterminantes pour les nombreuses problématiques agronomiques, écoclimatiques et socio-économiques malgaches (Bigot *et al.*, 2018). Certains produits satellitaires pour quantifier les précipitations tropicales commencent à être bien connus (par exemple les données CMORPH, CMAP, TRMM, PERSIANN-CDR, NCEP-CFSR ou encore CHIRPS). Les techniques et données spatiales pour apporter des estimations hydrologiques continentales sont plus récentes et reposent surtout sur la mission GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) avec la quantification des hauteurs équivalentes en eau (*Water Equivalent Thickness – WET*).

Cette étude porte sur la province de Mahajanga (NW de Madagascar) traversée par l'un des plus grands fleuves malgaches, le Betsiboka dont le bassin versant participe à tout l'hydrosystème régional continental et côtier (Fig.1), pour cette région considérée comme le château d'eau de cette deuxième plus grande région rizicole du pays. L'objectif principal est de déterminer si les variations pluviométriques interannuelles et intra-saisonnières sont détectables dans les chroniques hydrologiques GRACE, ce qui permettrait à terme de pouvoir les utiliser

pour mieux déterminer et caler certaines phases de modélisation hydro- ou agroclimatiques indisponibles ou déficientes fautes de données *in situ*.

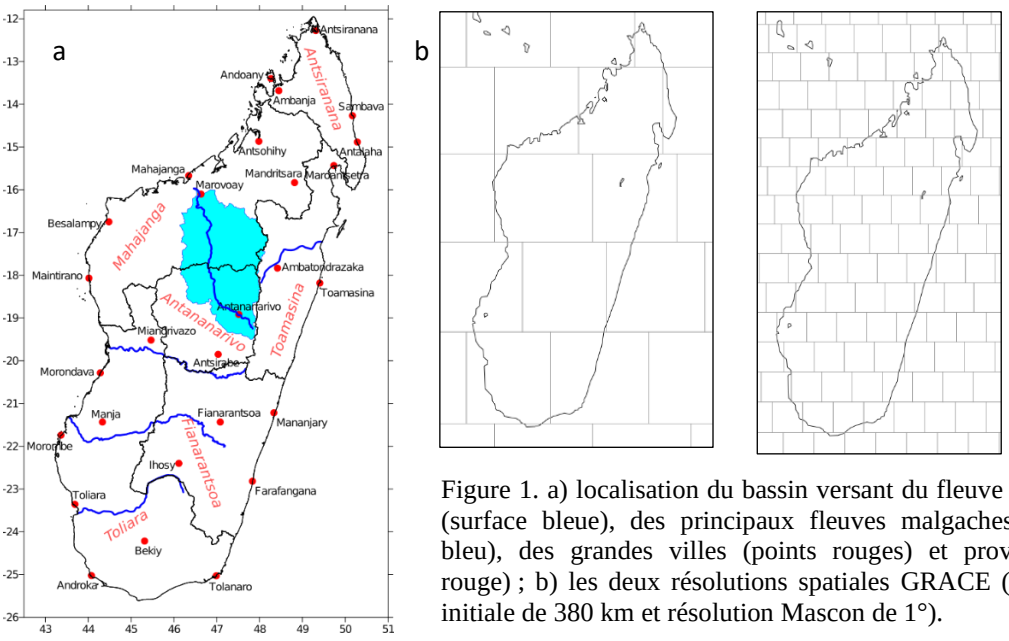


Figure 1. a) localisation du bassin versant du fleuve Betsiboka (surface bleue), des principaux fleuves malgaches (linéaire bleu), des grandes villes (points rouges) et provinces (en rouge) ; b) les deux résolutions spatiales GRACE (résolution initiale de 380 km et résolution Mascon de 1°).

1. La capacité des données GRACE à retranscrire les composantes du cycle de l'eau

1.1. Théorie et capteurs

La mission satellitaire GRACE est un projet conjoint entre la *National Aeronautic and Space Administration* (NASA, aux Etats-Unis) et le *Deutschen Zentrum für Luftund Raumfahrt* (DLR, en Allemagne). Mis en orbite le 17 mars 2002, GRACE consiste en deux satellites jumeaux co-orbitaux et interconnectés en télémétrie hyperfréquence, volant sur une orbite polaire quasi identique avec une inclinaison de 89,5° et à une altitude de 500 km, le binôme instrumental étant distant d'environ 220 km (NASA, 2004). Touchée par une panne énergétique, la mission GRACE s'est achevée le 12 octobre 2017 (alors qu'elle avait été lancée pour un fonctionnement théorique de 5 années seulement), en fournissant 163 champs mensuels (sur les 187 possibles). Une nouvelle mission a été lancée avec succès le 22 mai 2018, avec GRACE-FO (*Follow-On*), qui permet de poursuivre et améliorer ces acquisitions.

Les satellites survolent toute la surface terrestre en 30 jours environ, fournissant des estimations mensuelles d'un modèle gravitationnel global avec une résolution spatiale de surface d'environ 380 km (Fig.1). La précision des hauteurs d'eau continentales est d'environ 0,7 cm pour une zone de drainage de 400 000 km^2, et de 0,3 cm pour une de 4 000 000 km^2 (Swenson *et al.*, 2003). Les erreurs ont été estimées à environ 40 mm à l'équateur, et diminuant à 15 mm dans les régions polaires. L'objectif est de cartographier les grandes variations mensuelles du champ de gravité global de la Terre, sachant que d'un point de vue géophysique, la variabilité des solutions du champ de gravité de GRACE représente les réponses associées à la redistribution de la masse à la surface terrestre. En conséquence, les principales variations des signaux gravitationnels via les données GRACE proviennent de changements dans la répartition de l'eau, de la neige et de la glace stockées sur Terre, et permettent d'accéder à des estimations intégrées des stocks d'eau, des différentes composantes du bilan hydrique, de l'évapotranspiration, des taux de prélèvement et de stockage des aquifères, des intensité d'inondation ou encore, des variations cryosphériques (voir Ahmed *et al.*, 2014 pour plus de détails sur des applications régionales).

1.2. Applications pour des usages hydroclimatiques

A l'échelle continentale, l'analyse des stocks d'eaux et la dérivation de bilans hydriques via GRACE apportent une vision holistique des écoulements totaux au sein d'un bassin, car intégrant le débit des cours d'eau, mais également les entrées et sorties en surface ou en profondeur. Les expérimentations régionalisées recensées à l'échelle tropicale sont par exemple des bilans pour le bassin du Congo, de l'Amazonie, du Nil et de la Volta, ces très grands bassins versants étant bien adaptés à la précision des signatures GRACE. Car la résolution spatiale d'une cellule ne permet pas de saisir toute la variabilité spatiale des changements dans le stockage des eaux souterraines et des autres eaux de surface.

Grâce aux différents prétraitements analytiques, les contributions des marées, de l'atmosphère et des océans sont en grande partie éliminées à l'aide de modèles des processus géophysiques sous-jacents. Par conséquent, les modèles gravimétriques mensuels reflètent principalement les changements dans le stockage de l'eau terrestre, ainsi que le changement de la masse de neige et de glace des inlandsis polaires et des glaciers de montagne. Des travaux ont démontré qu'une fois filtrées, les variations temporelles des données GRACE acquises sur le centre de l'Afrique et jusqu'à 10°S sont essentiellement contrôlées par des composantes du cycle hydrologique, surtout le ruissellement et la recharge (Ahmed *et al.*, 2014). Les estimations GRACE sur le stockage en eau terrestre fournissent désormais une nouvelle composante d'assimilation pour la simulation des modèles de surface continentale, et peuvent être utilisées, en lien avec d'autres données issues de la télédétection, pour développer des services hydro-climatiques opérationnels (Byron *et al.*, 2019).

Cela permet de définir des indices normalisés de sécheresse représentatifs de la disponibilité en eau pour une région (Dai, 2011), aussi bien des indices de sécheresse météorologique (fonction des précipitations), agricole (fonction des sols et impactant les productions) ou hydrologique (fonction des débits et stockages des aquifères, lacs ou réservoirs). Un indice de stress total des eaux souterraines (*Total Groundwater Stress* - TGS) a été défini comme le rapport entre le volume d'eau de l'aquifère et la tendance des anomalies de hauteur d'eau de GRACE. Il est utilisé pour estimer préventivement le nombre d'années avant que le volume d'eau stocké dans les aquifères ne soit épuisé de 25 à 90 % de sa capacité totale (Frappart et Ramillien, 2018). D'autres indices s'appuient directement sur GRACE comme l'indice de déficit de stockage total (*Total Storage Deficit Index* – TSDI), de sécheresse hydrologique (*GRACE – based Hydrological Drought Index* – GHDI), de gravité de la sécheresse (*Drought Severity Index* – DSI) ou de sécheresse (*Drought Index* – DI).

1.3. Les données retenues pour l'étude

Les données et documentations GRACE sont fournies en accès libre par différents organismes distributeurs : le *Goddard Space Flight Center* (GSFC : earth.gsfc.nasa.gov/geo/), le *Jet Propulsion Laboratory* (JPL : grace.jpl.nasa.gov/), le *Center for Space Research* (CSR : www2.csr.utexas.edu/grace/) ou le *German Research Centre for Geosciences* (GFZ : gravis.gfz-potsdam.de/home). Il y a les produits de niveau 1 (harmoniques géophysiques mesurées) et les solutions évoluées de niveau 2 dérivées des mesures brutes (champs de gravité et produits exprimés en hauteur du géoïde ou en Hauteur Equivalente en Eau – HEE (ou *Water Equivalent Height* - WEH). Pour faciliter l'usage des données dans des applications en géosciences, les produits sont fournis après un prétraitement de contrôle de leur qualité, en points de grille réguliers. Les données sont utilisées soit avec la résolution spatiale initiale des solutions d'harmoniques sphériques, soit avec des solutions régionalisées qui permettent une meilleure estimation de la variance des hauteurs d'eau sans être affectées par les effets de troncature spectrale et en permettent une meilleure localisation géographique des schémas hydrologiques. Il y a en particulier l'approche appelée 'Mascon' (pour '*mass concentration*')

qui recalcule des cellules discrètes à partir des données d'origine possédant chacune son propre signal de gravité (Watkins *et al.*, 2015). Cependant, même si la résolution spatiale des données GRACE Mascon est meilleure (à 1° d'arc de résolution ; Fig.1), leur définition temporelle fondamentale est finalement proche de celle définie avec les données GRACE initiales du fait de l'autocorrélation spatiale. Cela signifie que la chronique de changement de masse pour un pixel Mascon est fortement corrélée aux pixels les plus proches. En complément, certaines techniques de filtres et de post-traitements sont utilisées pour séparer les signaux terrestres des signaux océaniques dans les pixels Mascon le long de la côte (comme cela est typiquement le cas insulaire de Madagascar).

2. Résultats pour la région de Mahajanga avec le bassin du Betsiboka

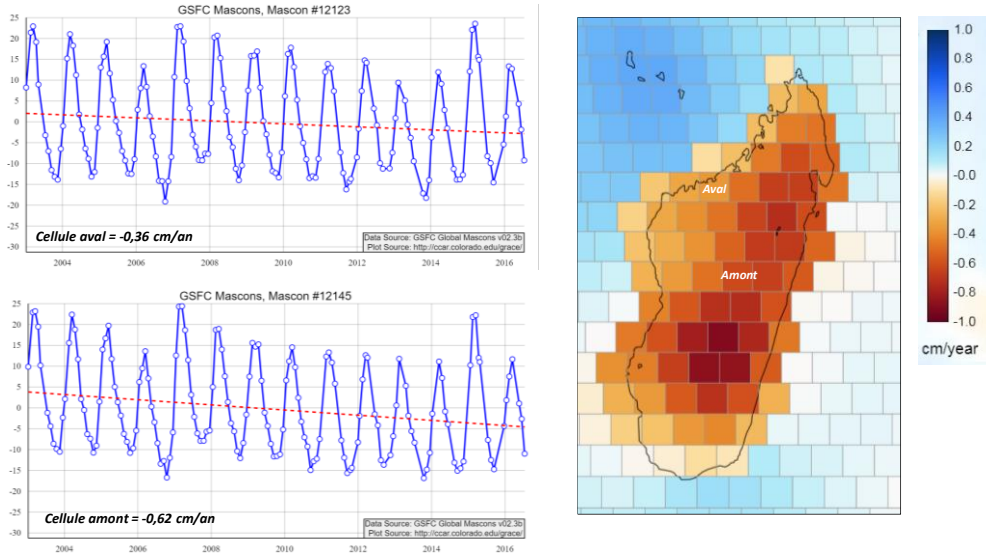


Figure 2. Tendance (en cm/an) des cellules GRACE Mascon sur la période 2002-2016 à l'échelle de Madagascar, avec comparaison de deux cellules situées en amont et en aval du bassin versant du Betsiboka (adapté d'après les données du *Goddard Space Flight Center* et du *Colorado Center for Astrodynamics Research*).

Ce bassin versant fluvial de 49 000 km² contribue aux transports latéritiques et sédimentaires des hautes terres jusqu'à son embouchure dans la baie de Bombetoka et dans le canal du Mozambique, avec un débit annuel moyen estimé à 271 m^3/s (et des variations saisonnières allant de 400 à 4500 m^3/s) pour une longueur totale de 600 km (Duvail *et al.*, 2017). L'analyse des séries GRACE Mascon (2002-2016) à l'échelle du pays révèle des contrastes dans les tendances interannuelles des hauteurs équivalentes en eau, avec les plus fortes valeurs négatives sur la façade orientale, les plaines et les reliefs centraux, notamment les massifs d'Itremo et d'Andringitra (Fig.2). La partie correspondant au haut bassin versant du Betsiboka indique une tendance de -0,62 cm/an de la hauteur d'eau, avec des valeurs qui diminuent en direction du bassin aval pour atteindre -0,36 cm/an.

Madagascar est donc plutôt atypique par rapport aux estimations globales des tendances de GRACE qui suggèrent une augmentation du stockage de l'eau aux hautes et basses latitudes, et plutôt une diminution aux latitudes moyennes avec un assèchement (Tapley *et al.*, 2019). Ces grandes tendances hydrologiques observées par GRACE sont multifactorielles, attribuées aux variations naturelles, aux changements climatiques d'origine anthropique ainsi qu'aux pratiques humaines de gestion de l'eau et d'occupation des sols. Théoriquement, en partant d'une approche simplifiée linéaire, l'augmentation des précipitations et/ou une diminution des températures explique plutôt une augmentation des hauteurs d'eau totales (car stockage des réservoirs et diminution de l'évaporation), et inversement. Cependant, des pratiques anthropiques exacerbées peuvent moduler ces variations dépendantes de la variabilité

climatique, voire même inverser les évolutions attendues. Ainsi, Goel (2006) a montré à l'échelle du bassin du Congo que la diminution des hauteurs d'eau souterraines dans un contexte de précipitations stable s'expliquerait essentiellement par les changements d'occupation du sol et la déforestation qui favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration et de la recharge. A Madagascar, les rares observations *in situ* récentes indiquent une diminution des débits et un rehaussement de l'estuaire du Betsiboka. Les explications avancées sont d'une part hydroclimatiques, mais aussi d'autre part anthropiques à cause de la déforestation et des pratiques agricoles (incendies, surpâturage) qui favorise l'érosion, le dépôt fluvial, le recouvrement des rizières et l'envasement des canaux d'irrigation. Les travaux de Maina *et al.* (2012) montrent qu'il y a une covariance significative entre le couvert forestier, la population, le débit des rivières, la charge sédimentaire et des indicateurs environnementaux côtiers interannuels et saisonniers. Ils observent également des années charnières dans la chronologie de ces changements environnementaux, avec au Nord du pays, 1958, 1991, 2002, qui correspondait à des modifications nettes des variables indirectes du ruissellement fluvial.

A l'échelle de la zone d'étude, en lien avec la tendance négative significative des masses d'eau continentale détectée grâce aux séries GRACE, deux corrélations peuvent être relevées (Fig.3) : une avec la tendance à la baisse des précipitations (identifiée ici grâce aux estimations CHIRPS), surtout après 2007 (Bigot *et al.*, 2019) ; l'autre avec les variations des températures de surface de l'océan Indien.

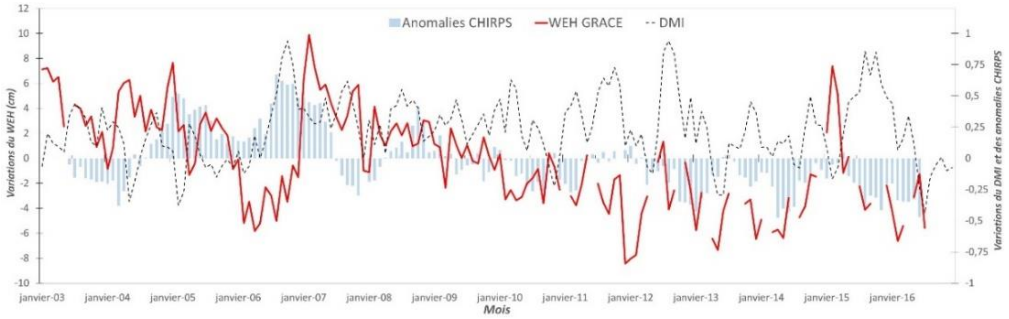


Figure 3. Covariations à l'échelle du haut bassin versant du Betsiboka, entre janvier 2003 et décembre 2016, des anomalies pluviométriques (estimations CHIRPS, valeurs centrées réduites) et du Water Equivalent Height (WEH, en cm) provenant d'une cellule GRACE Mascon : comparaison avec l'indice DMI (*Dipole Mode Index*) révélant les phases du dipôle thermique correspondant au gradient des anomalies de températures de surface océaniques entre l'océan Indien ouest équatorial et sa partie sud-est.

Plus précisément, comme cela est souvent le cas dans la relation temporelle conjointe pluie-écoulement-stockage, on observe régionalement un décalage de 6 mois entre les variations pluviométriques et celles hydrologiques synthétisées par les données GRACE, période à laquelle le coefficient de corrélation linéaire culmine (R = 0,38). Cette évolution récente des composantes du cycle de l'eau est aussi à mettre en relation avec la hausse des températures atmosphériques à Madagascar, de l'ordre de +1,93°C (±0,35) depuis 1960 (d'après berkeleyearth.lbl.gov/). La tendance à la baisse des ressources en eau régionales est très sensible aux variations du dipôle thermique océanique indien : les 3 évènements positifs transcrits par l'indice DMI en 2006, 2012 et 2015 correspondent à une hausse significative des précipitations à l'échelle de la zone d'étude, et à une augmentation des hauteurs d'eau dans le sol estimées par GRACE (Fig.3). Car lors d'une phase positive de l'Oscillation du Dipôle de l'océan Indien (IOD), les vents d'ouest s'affaiblissent le long de l'équateur, ce qui permet aux eaux chaudes de se déplacer vers l'Afrique et la création d'un différentiel thermique dans l'océan Indien tropical (plus froid que la normale à l'est et plus chaud à l'ouest). En moyenne, cela augmente la convection et les précipitations dans l'aire correspondant à Madagascar (alors qu'à l'inverse, cela se traduit par des précipitations anormalement basses et des températures plus élevées en Australie ; www.bom.gov.au/climate/iod/).

Conclusion

Ce travail préliminaire en hydroclimatologie grâce aux données spatiales GRACE indique que pour analyser finement les variations et tendances à l'échelle du plus grand bassin versant malgache du Betsiboka, il faut à la fois tenir compte des principales composantes du cycle de l'eau, mais aussi des variations océano-atmosphériques de l'océan Indien ainsi que des modifications anthropiques des facteurs d'écoulement, d'évapotranspiration et de stockage à cause des changements d'occupation du sol. Mais ces données spatiales fournissent un outil de diagnostic incomparable pour suivre les tendances hydrologiques régionales, puisqu'une veille *in situ* de qualité, homogène et pérenne pour le pays n'est pas à l'ordre du jour, et alors même qu'il y a encore 1 malgache sur 2 (soit environ 12 millions de personnes) qui n'a pas accès à l'eau potable, et que les bailleurs de fond internationaux prônent différents projets d'aménagements hydrauliques (barrages, irrigation) et environnementaux (reboisement).

Bibliographie

Ahmed M., Sultan M., Wahr J., Yan E., 2014. The use of GRACE data to monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa. *Earth-Science Reviews*, 136, 289-300.

Bigot S., Dumas D., Brou Y. T., Ramboarison R., Razanaka S., Descroix L., Philippon N., Gwiazdzinski L., 2018. La difficulté du monitoring climatique à une échelle fine dans une région fortement impactée par la déforestation tropicale : la forêt sèche du parc national d'Ankarafantsika (Madagascar). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 31, 356-361.

Bigot S., Dumas D., Brou T., Curt T., Razanaka S., 2019. Feux de végétation et conditions pluviométriques à Madagascar (2001-2017). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 32, 169-174.

Byron D. T., Watkins M. M., Flechtner F., *et al.*, 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 358 (9), 358-369.

Chaperon P., Danloux J., Ferry L., 1993. *Fleuves et rivières de Madagascar*. Monographies hydrologiques, 10, ORSTOM, Paris, France, 874p.

Dai A., 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. *J. Geophys. Res.*, 116, 1-26.

Duvail S., Hamerlynck O., Paron P., Hervé D., Nyingi W. D., Leone M., 2017. The changing hydro-ecological dynamics of rivers and deltas of the Western Indian Ocean: Anthropogenic and environmental drivers, local adaptation and policy response. *C. R. Geoscience*, 349, 269-279.

Frappart D., Ramillien G., 2018. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A review. *Remote Sens.*, 10, 829. Doi: 10.3390/rs10060829.

Goel P., 2006. *Water pollution: Causes, Effects and Control.* 2nd edition, New Age International Publisher, New Delhi, 432p.

Maina J., de Moel H., Vermaat J. E., Bruggemann J. H., Guillaume M. M., Grove C. A., Madin J. S., Mertz-Kraus R., Zinke J., 2012. Linking coral river runoff proxies with climate variability, hydrology and land-use in Madagascar catchments. *Marine Pollution Bulletin*, 64(10), 2047-2059.

NASA, 2004. CALIPSO, CloudSat, GRACES: Sciences writers's guide - A guide for reporters to understand the mission and purpose of NASA's satellites. NASA, sciences mission directorate, NP-2005-8-709-GSFC, 44p.

SHER (Ingénieurs-Conseils SA), 2017. Small Hydro Resource Mapping in Madagascar. Project "Renewable Energy Resource Mapping and Geospatial Planning – Madagascar", in association with Mhylab, under contract to The World Bank, 149p.

Swenson S., Wahr J., Milly P. C. D., 2003. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). Water Resources. Research, 39(8), 1223. Doi: 10.1029/2002WR001808.

Tapley B. D., Watkins M. M., Flechtner F., *et al.*, 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 358(9), 358-369.

Watkins M. M., Wiese D. N., Yuan D.-N., Boening C., Landerer F. W., 2015. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal. Geophys. Res. Solid Earth*, 120. Doi: 10.1002/2014JB011547.

VITICULTURE EN BRETAGNE : CHALLENGE OU OPPORTUNITE ? QUELQUES INDICES BIOCLIMATIQUES REGIONAUX

BONNARDOT V., QUENOL H.

LETG-Rennes, Université Rennes 2 / CNRS, UMR 6554 LETG, Rennes, France (valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr)

Résumé : *La vigne est présente en Bretagne et le nombre de projets de plantation augmente rapidement. Afin de contribuer au développement des connaissances sur les conditions environnementales et particulièrement climatiques pour la viticulture dans cette région, quelques indices bioclimatiques (Huglin, GFV et GSR) sont calculés en utilisant des données de température de stations météorologiques situées à proximité de deux parcelles de vigne au nord et à l'ouest de la Bretagne et les projections de changement climatique issues du modèle CNRM (RCP4.5 et RCP8.5). Les résultats montrent que l'augmentation observée des températures améliore les conditions thermiques actuelles de la région pour la maturation des raisins et les projections indiquent une augmentation théorique du taux de sucre dans les futures baies.*

Mots clés : *Changement climatique ; viticulture ; indice GFV ; indice GSR ; Bretagne*

Summary: ***Viticulture in Brittany : challenge or opportunity ? Some regional bioclimatic indices.*** *Grapevines are grown in Brittany and the number of winegrowing projects is rapidly increasing. In order to contribute to the development of knowledge on environmental and particularly climatic conditions for viticulture in this region, some bioclimatic indices (Huglin, GFV and GSR) were calculated using temperature data from weather stations located in proximity of grapevine plots to the north and west of Brittany as well as the climate change projections from the CNRM model (RCP4.5 and RCP8.5). Results showed that the observed temperature increase improves the current thermal conditions of the region for grape ripening and projections indicate a theoretical increase in the sugar level of future berries.*

Keywords: *Climate change ; viticulture ; GFV index ; GSR index ; Brittany*

Introduction

Viticulture en Bretagne ? L'activité interpelle en étant associée à cet espace géographique plutôt réputé pour ses paysages de bocage où règnent les pommiers à cidre et la polyculture-élevage ou pour ses productions de légumes emblématiques. Par conséquent, le sujet soulève des interrogations d'ordre environnemental et socio-économique au sein du territoire régional et au delà. D'un point de vue environnemental et particulièrement climatique, si l'on se réfère aux projections des indices bioclimatiques traditionnels pour la viticulture menées aux échelles européenne et mondiale pour l'horizon 2100, la Bretagne apparaît effectivement sur les cartes parmi les régions émergentes pour la viticulture (Malheiro *et al.*, 2010 ; Hannah *et al*., 2013). Malgré tout, consciente des impacts régionaux du changement climatique sur la viticulture en place et de la nécessité d'adaptation, l'industrie viticole française ne privilégie pas le scénario « nomade », basé sur une relocalisation des vignes (à plus haute altitude ou en exposition nord dans les régions viticoles existantes ; ou, scénario extrême, sous des latitudes plus septentrionales où aucune infrastructure viticole n'existe encore) comme moyen d'adaptation au changement climatique, même à long terme (Aigrain *et al*., 2019).

En parallèle, à l'échelle de la Bretagne, les impacts régionaux du changement climatique sur l'agriculture sont avérés (Merot *et al*., 2012 ; Dubreuil *et al*., 2019) et les organismes professionnels agricoles de leur côté se soucient en premier lieu de l'adaptation des cultures à fort enjeu pour la région (comme par exemple les céréales), comme en témoigne, entre autres, les travaux réalisés par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne dans le cadre du programme ORACLE (Tilly, 2019). En ce qui concerne la vigne, celle-ci était présente sur le territoire breton jusqu'à la crise du phylloxéra à la fin du XIXème siècle (Musset, 1908 ; Saindrenan, 2011). Elle s'y développe de nos jours rapidement, d'abord sous l'impulsion d'associations de passionnés d'œnologie au début des années 2000 (voire avant) dont celle au

nom évocateur d'Association pour la Reconnaissance des Vins Bretons (ARVB) ; mais surtout depuis 2016 et la nouvelle règlementation autorisant la plantation de vignes à des fins commerciales sans indication géographique (décret n°2015-1903) aboutissant à l'établissement de vignobles commerciaux pour diversifier les productions des exploitations agricoles. L'emploi des termes « renaissance » ou « renouveau » pour le vignoble breton est donc approprié (Charmont, 2019), même si les superficies sont marginales par rapport à l'échelle nationale. A ce jour l'ARVB recense environ 90 néo-viticulteurs (ARVB, 2019).

C'est donc dans ce contexte avec une demande accrue pour des études environnementales de la part des professionnels de la région s'interrogeant sur les possibilités de diversification que des recherches en climatologie appliquée à la viticulture sont menées en Bretagne. Elles s'inscrivent dans le cadre des projets de recherche ACCAF- LACCAVE 2 .21 de l'INRAE et IRP-VINADAPT du CNRS dans la continuité du projet LIFE-ADVICLIM. Elles ont pour but d'accroitre les connaissances sur les conditions climatiques actuelles et futures afin d'évaluer la faisabilité de la viticulture en Bretagne. Quelques résultats préliminaires sont livrés ici.

1. Site / Données / Méthode

Afin d'évaluer les potentialités climatiques de la région pour la viticulture, le traditionnel indice bioclimatique d'Huglin[1] pour la viticulture (Huglin, 1978) a été calculé en utilisant les données journalières de température des stations météorologiques de Dinard-Pleurtuit et Quimper-Pluguffan, proches de deux parcelles de vignes commerciales récemment plantées, respectivement en Val de Rance et en pays Bigouden proche du littoral, c'est-à-dire approximativement, le plus au nord et le plus à l'ouest de la Bretagne (Fig.1).

Les données de Nantes-Bouguenais et Angers-Beaucouzé ont été utilisées à titre de comparaison par rapport aux vignobles les plus proches au sud et à l'est, à savoir le vignoble nantais (historiquement breton) et le vignoble de l'Anjou.

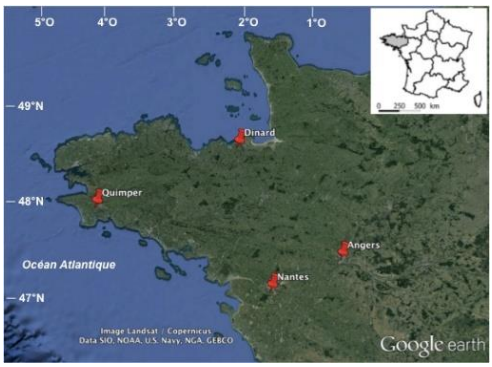


Figure 1. Localisation de la région d'étude (Bretagne, France) et des stations météorologiques utilisées : Dinard-Pleurtuit, Quimper-Pluguffan, Nantes-Bouguinais et Angers-Beaucouzé (Météo-France).

Les projections climatiques du modèle CNRM (jeu de simulation 2014 provenant du service climatique DRIAS) correspondant aux mailles de Dinard et Quimper sont analysées à moyen et long termes (2041-2070 et 2071-2100) par rapport à la période historique (1950-2005) pour évaluer le potentiel thermique futur de cette région en fonction des scénarios RCP4.5 & RCP8.5 d'évolution de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Pour compléter l'analyse, les indices plus récents nommés « GFV » - *Grapevine Flowering and Véraison* (Parker *et al.*, 2011) et « GSR » - *Grapevine Sugar Ripeness* (Parker *et al.*, 2020) ont été calculés pour quelques cépages les plus plantés en Bretagne à ce jour (Chenin, Chardonnay et Pinot noir) en utilisant les données de Dinard et Quimper sur la période 1950-2019 afin d'évaluer les conditions régionales de croissance de la vigne et de maturation du raisin. Ces indices, établis par cépage à partir du suivi d'un large échantillon de cépages à travers le monde et testés statistiquement sont des valeurs correspondant au cumul de degré-

[1] L'indice d'Huglin est un cumul de degré/jour calculé à partir des données journalières de température moyenne et maximale supérieures à 10°C durant la saison végétative théorique de la vigne (1er avril – 30 septembre) pondéré par un coefficient de longueur du jour en fonction de la latitude (Huglin, 1978).

jour (température moyenne supérieure à 0°C) nécessaire, à partir du 1er mars, à un cépage pour atteindre le stade floraison et véraison (GFV) ou à partir du 1er avril aux raisins pour atteindre un certain de taux de sucre dans les baies (GSR) (Tab.1).

Tableau 1. Valeurs des indices GFV et GSR pour les cépages étudiés dans cette étude.

Indice :	**GFV** (extrait de Parker *et al.*, 2011)		**GSR** (extrait de Parker *et al.*, 2020)	
Cépage :	**Floraison**	**Véraison**	**170g/l**	**200g/l**
Chenin	*Non renseigné*	*Non renseigné*	2798	3055
Chardonnay	1217	2541	2723	2892
Pinot noir	1219	2507	2695	2838

Ces 2 indices ont également été calculés pour la saison 2019 pour les cépages Chardonnay et Pinot noir en utilisant les données de température d'une station météorologique installée sur une parcelle de vigne nouvellement plantée en Val de Rance (proche de Dinard).

2. Résultats

2.1 Augmentation des températures et amélioration des conditions thermiques pour la viticulture

Avec un indice d'Huglin d'une valeur de 1200 pour Dinard sur la période 1950-1980, très semblable pour Quimper (Fig.2), les deux stations régionales appartiennent, selon la classification climatique géoviticole multicritères de Tonietto & Carbonneau (2004), au groupe climatique « très frais » pour la viticulture, ce qui constitue plutôt un challenge pour la maturité des raisins. Avec l'augmentation des températures, l'indice atteint une valeur moyenne approximative de 1400 sur la période 1981-2010, soit une augmentation de 200 unités entre les 2 périodes trentenaires. La moyenne sur les 9 dernières années (2011-2019) atteint une valeur de 1488, ce qui s'approche de la valeur de la limite inférieure de la classe du climat « frais » (fixée à 1500) et représente également environ 100 unités de moins que la valeur de l'indice moyen de Nantes (1582) calculé sur la période 1961-1980 (Fig.2).

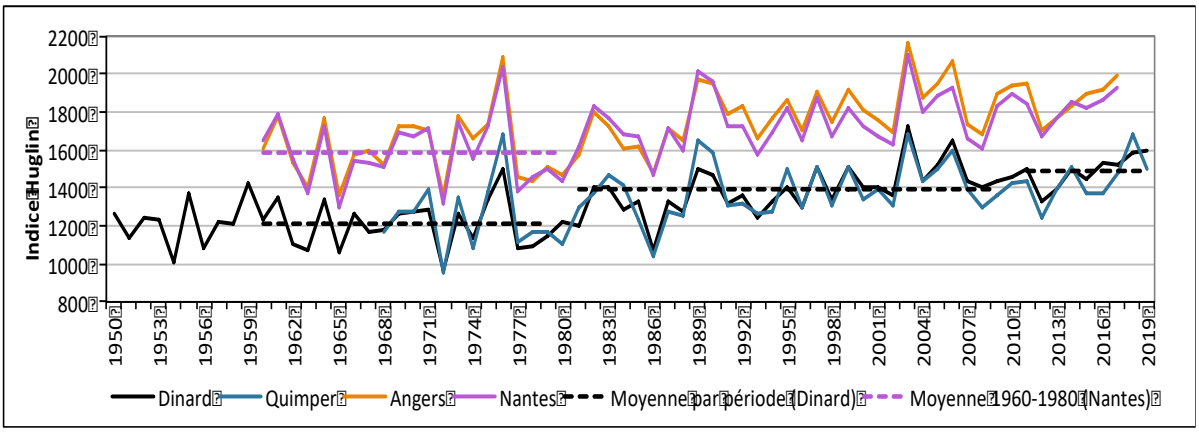


Figure 2. Indice bioclimatique d'Huglin pour les stations de Dinard, Quimper, Nantes et Angers sur la période 1950-2019. Sont surimposés en pointillé les indices moyens par période pour Dinard (1960-1979 ; 1980-2009 et 2010-2019) et Nantes (1961-1980).

En utilisant les projections climatiques, l'indice augmente différemment selon la période et le scénario considérés (Tab.2). Par rapport à l'indice moyen observé la période 2010-2019, on constate que les conditions régionales passeraient sur la période 2041-2070 à un « climat frais » selon le scénario RCP4.5 ou « tempéré » selon le scénario RCP8.5 et à l'horizon 2071-2100, elles passeraient à un climat « tempéré » selon le RCP4.5 et « tempéré chaud » avec le scénario RCP8.5. A titre comparatif, les valeurs de l'indice projeté à moyen terme (2041-2070) selon le

RCP8.5 ou à long terme (2071-2100) selon le RCP4.5, correspondent à celle observée sur la période 1991-2019 à Angers.

Tableau 2. Gain de l'indice d'Huglin à moyen et long termes (2041-2070 ; 2071-2100) pour Quimper et Dinard par rapport à l'indice modélisé sur la période de référence (1950-2005), en fonction des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de changement climatique (données modélisées CNRM).

Station	**Quimper**		**Dinard**	
Période / Scénario RCP	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
2041-2070	+ 261	+ 467	+ 213	+ 359
2071-2100	+ 458	+ 848	+ 348	+ 630

2.2 Dates théoriques des stades phénologiques (floraison et véraison)

Avec l'augmentation des températures, au nord comme à l'ouest de la région, le calcul de l'indice GFV permet d'estimer comme dates théoriques moyennes de floraison et véraison pour le Chardonnay sur la période 1990-2019, respectivement les 19 mai et 6 août (Fig.3).

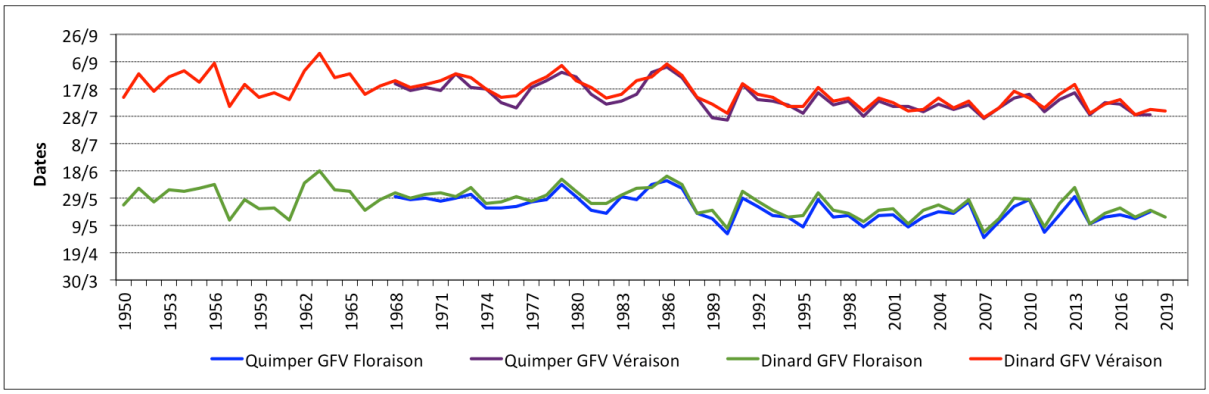


Figure 3. Dates théoriques de floraison et véraison (GFV) pour le cépage Chardonnay à Dinard et Quimper de 1950 à 2019.

2.3 Conditions thermiques pour la maturation et teneur en sucre dans les baies

De même, avec l'élévation des températures et le calcul de l'indice GSR, on constate que les cépages peuvent atteindre plus souvent le stade de maturité et des taux de sucre dans les baies plus élevés. En utilisant l'indice GSR ciblé à 170g/l pour le cépage Chenin (Fig.4), les dates théoriques moyennes sont le 16 octobre sur la période 1950-1990 et le 30 septembre sur la période 1990-2019 (environ 2 semaines plus tôt). Pour des vendanges effectuées à la même date (par exemple mi-octobre), on constate une amélioration de la teneur en sucre dans les baies, passant de 170g/l en moyenne avant 1990 à 200g/l en moyenne après 1990 (Fig.4).

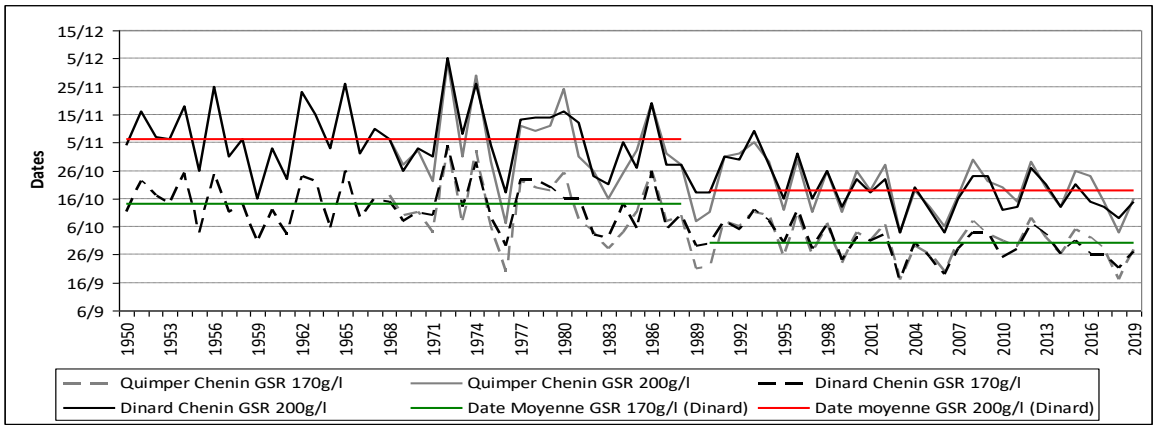


Figure 4. Dates théoriques pour un taux de sucre ciblé à 170g/l et 200g/l (GSR) pour le cépage Chenin à Dinard et Quimper de 1950 à 2019 et date moyenne pour les périodes 1950-1989 et 1990-2019 pour Dinard.

Sur la période 2010-2019, le calcul de l'indice GSR pour les cépages Chardonnay, Chenin et Pinot noir, pour des taux de sucre ciblés à 170g/l et à 200g/l, indique des dates théoriques correspondant respectivement à la dernière décade de septembre et aux 2 premières semaines d'octobre (Tableau 3).

Tableau 3. Dates moyennes, les plus précoces et les plus tardives, sur la période 2010-2019 à Dinard pour atteindre un indice GSR ciblé à 170g/l et à 200g/l pour les cépages Chardonnay, Chenin et Pinot noir.

Cépage	**Dates pour un GSR ciblé à 170 g/l**			**Dates pour un GSR ciblé à 200 g/l**		
	moyenne	la plus précoce	la plus tardive	moyenne	la plus précoce	la plus tardive
Chardonnay	23-sept.	17-sept.	3-oct.	4-oct.	27-sept.	14-oct.
Chenin	28-sept.	21-sept.	7-oct.	15-oct.	9-oct.	27-oct.
Pinot Noir	21-sept.	15-sept.	1-oct.	30-sept.	23-sept.	10-oct.

Selon les projections climatiques, ces taux de sucre seront atteints plus rapidement. Par exemple, avec le RCP 4.5 pour la période 2041-2070, les dates moyennes pour le cépage Pinot noir seraient avancées de 21 jours pour un taux de sucre ciblé à 200g/l (soit le 9 septembre) et de 29 jours pour atteindre 170g/l (soit le 23 août).

2.4 Indices bioclimatiques pour la saison 2019 sur une parcelle en Val de Rance

Les vagues de chaleur successives que la France et l'Europe ont subi au cours de l'été 2019 n'ont pas épargné les vignes de Bretagne. Avec l'analyse des données d'une station installée sur une parcelle en Val de Rance (proche de Dinard), on dénombre un total de 25 jours avec des températures supérieures à 25°C et de 5 jours supérieures à 30°C entre le 1[er] juin et le 30 septembre 2019. Le maximum enregistré a été 38°C, le 23 juillet 2019. L'indice d'Huglin pour 2019 a atteint une valeur de 1580, ce qui équivaut à la valeur moyenne de l'indice d'Huglin des stations de Nantes et d'Angers sur la période 1961-1980. Les indices GFV et GSR pour le Chardonnay et le Pinot noir indiquent une floraison à la mi-juin, une véraison sur la troisième décade d'août et des taux de sucre dans les raisins de 200g/l atteints avant la fin du mois de septembre (Tableau 4).

Tableau 4. Dates auxquelles les indices GFV et GSR ont été atteints pour les cépages Chardonnay et Pinot noir pour la saison 2019 sur une parcelle de vigne en Val de Rance.

Indice	**GFV**		**GSR**	
Cépage	Floraison	Véraison	ciblé à 170g/l	ciblé à 200g/l
Chardonnay	12 juin	23 août	20 septembre	30 septembre
Pinot noir	12 juin	21 août	18 septembre	26 septembre

Conclusion

Ces résultats se limitent à l'étude des températures sur la saison végétative et sur deux sites particuliers au sein du territoire régional très diversifié d'un point de vue climatique mais ils montrent qu'avec les données observées sur les 70 dernières années, l'augmentation des températures en Bretagne offre des conditions thermiques de plus en plus favorables à la maturité du raisin et donc à la viticulture, surtout sur la dernière décennie. Avec les données projetées de changement climatique, la migration vers la limite supérieure de la classe de climat viticole « très frais » selon l'indice d'Huglin ou le passage à des classes supérieures dépendent des différents scénarios et horizons sélectionnés, mais nul doute que les conditions thermiques pour la maturation du raisin contribueront à l'amélioration de la qualité de la production. D'un point de vue thermique, la viticulture en Bretagne passe donc du challenge avant les années 1990 à une opportunité de diversification agricole si les conditions socio-économiques le permettent.

Sous ce climat océanique, frais en été et doux en hiver, il est également nécessaire d'étudier les températures à d'autres saisons (un hiver trop doux par exemple peut poser un problème pour la levée de dormance des bourgeons latents) et d'élargir l'étude climatique à d'autres paramètres (pluie, humidité, vent) qui peuvent être limitant ou contraignant (pression phytosanitaire, embrun et salinité) en fonction des différents stades phénologiques de la plante (pour la croissance de la vigne et/ou la maturation des raisins). Il est également envisagé d'appliquer les indices GFV et GSR sur une plus large gamme de cépage et de spatialiser sur l'ensemble de la Bretagne pour explorer le potentiel climatique de l'ensemble du territoire à la topographie variée (intérieur, littoral, plaine et versant) afin de fournir des éléments de réflexion qui peuvent, à côté d'autres données environnementales (données pédologiques par exemple), faciliter le choix de cépages ou le mode de conduite de la vigne.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à Xavier Foissard et Vincent Dubreuil (LETG-Rennes) pour leur précieuse collaboration lors de l'installation des stations météorologiques et des relevés de données climatiques dans les vignes du Val de Rance.

Bibliographie

Aigrain P., Bois B., Brugiere F., Duchene E, de Cortazar-Atauri I.G., Gautier J., Giraud-Heraud E., Hammond R., Hannin H., Ollat N. & Touzard JM., 2019. Using foresight exercise to design adaptation policy to climate change: The case of the French wine industry. 41st World Congress of Vine and Wine. BIO Web Conf (12). Doi: https://doi.org/10.1051/bioconf/20191203020

ARVB, 2019. [en ligne]. URL : Vigneronsbretons.bzh/2020/06/13/cartes-des-vignes-bretonnes/

Charmont C., 2019. *Entre invention et réinvention, la renaissance du vignoble breton à travers le changement climatique et la tradition*. Mémoire de Master d'Histoire, Université Rennes 2, 340p.

Dubreuil V., Même K., Bonnardot V., Aubert J.F., Veger A.C. et Melec D., 2019. Changement climatique et dates de floraison des pommiers dans le Val de Rance (Bretagne). XXXIIème Colloque de l'AIC (Changement Climatique, variabilité et risques climatiques), Thessaloniki, Grèce, pp.83-88.

Hannah L., Roehrdanz P., Ikegami M., Shepard A., Shaw R., Tabor G., Zhi L., Marquet P. & Hijmans R., 2013. Climate change, wine and conservation. *PNAS*, 110 (17) 6907-6912.. Doi: https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110

Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C. R. Acad. Agric.* 1117–1126.

Malheiro A.C., Santos J.A., Fraga H, Pinto J.G., 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Clim Res* (43)163-177. Doi : https://doi.org/10.3354/cr009

Mérot P., Dubreuil V., Delahaye D. & Desnod P. (dir.), 2013. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions*. Rennes, PUR, coll « Espaces et Territoires », 464p.

Musset R., 1908. La limite de la culture de la vigne dans l'Ouest de la France. *Annales de géographie*, 268-270.

Parker *et al*., 2011. Grapevine flowering and veraison model. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 206-216.

Parker *et al*., 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of Vitis vinifera L. cultivars. *Agric and Forest Meteorology*. Doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902

Saindrenan G., 2011. *La vigne et le vin en Bretagne*. Coop Breizh, Spezet, 574p.

Tilly S., 2019. *Le programme ORACLE-Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE-valorisation des premiers résultats en région Bretagne*. Mémoire Master 2 GAED-ETA, Université Rennes 2, 81p.

Tonietto J. & Carbonneau A., 2004. A Multicriteria Climatic Classification System for Grape-Growing Regions Worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, (124) 81-97. Doi : http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001

IMPACTS DES PLUIES AUTOMNALES EXTREMES SUR LA VILLE D'AGADIR : CAS DES INONDATIONS DE NOVEMBRE 2014

BOUAICHE A. [1], KARROUK M-S. [1], LOTFI N. [1], TNOURJI H. [2], CHAIR M. [1]

1 Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagements Territoriale (LCEAT), Université Hassan II, Casablanca, Maroc (Bouaiche.aissam.uh2.lceat@gmail.com ; ClimDev.Maroc@gmail.com)
2 Laboratoire Géographie, Aménagement, Démographie, Développement (GEAMDD), Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc (Tnourjihasna@gmail.com)

Résumé : *Les précipitations d'automne présentent plusieurs attributs assez spécifiques : marquent le début de la période pluvieuse qui fait suite à la saison estivale sèche caractéristique du domaine méditerranéen et sont également annonciatrices de la reprise à nos altitudes de l'activité cyclonique des perturbations du front polaire, avec la mise en place progressive d'une circulation atmosphérique favorisant des flux trajectoires méridionales ou méridiennes. Cette contribution propose d'étudier l'impact des pluies automnales extrêmes à la ville d'Agadir durant l'année 2014. Ces précipitations, ayant occasionné des dégâts matériels et humains.*

Mots clés : *Pluies automnales ; extrêmes ; Agadir ; Maroc*

Summary: ***Impacts of extreme autumn rainfalls on the city of Agadir: case of the november 2014 floods.*** *The autumn precipitations show quite enough specific features, it occurs at the beginning of the rainy season just after the characteristic dry summer of the Mediterranean domain. It also coincides with the period of the year, when the atmospheric circulation allows meridional tracks of the frontal depressions to reach our latitude. This paper proposes to study the impacts of extreme autumn rains on the city of Agadir during the year 2014. This rainfall produced which caused human and material.*

Key words: *Rain; autumn; extreme; Agadir; Morocco*

Introduction

Les pluies d'automne au Maroc surviennent après une longue sécheresse estivale. De ce fait elles sont caractérisées par une grande intensité due au fort contraste thermique entre les masses d'air maritimes et continentales.

L'apparition progressive de l'air polaire dans la troposphère moyenne, dans le cadre d'une circulation méridienne (valles froides et des crêtes chaudes), conduit à la création des états de convection et d'instabilité atmosphérique. Cela se manifeste selon l'intensité de la descente froide par le voisinage atlantique ou méditerranéen du Maroc.

L'intensité pluviométrique et l'aspect orageux en septembre (démarrage de saison d'automne), en particulier des temps perturbés, sont à l'origine des quantités pluviométriques importantes atteindre parfois 100 à 150mm en quelques heures sur les montagnes d'où la montée rapide des eaux de crues. Ces eaux déferlent vers la plaine de Souss Massa qui est souvent occupée, exploitée et urbanisée.

La ville d'Agadir est considérée parmi les villes du Maroc les plus exposées aux effets du changement climatique. En effet, elle a subi cette dernière décennie plusieurs inondations importantes, ce fut le cas en novembre 2014, avec un pic de 255 mm de pluie, soit la pluie d'une demi-année, et cela revient principalement aux conditions climatiques ainsi que topographiques, géologiques, géomorphologiques. A cet effet, l'objectif de cet essai vise à analyser les pluies automnales extrêmes et leurs relations avec les inondations urbaines à la ville d'Agadir (Karrouk, 2012).

1. Données et méthodes employée

1.1. Présentation de la zone d'étude

La ville d'Agadir se situe au centre ouest du Maroc, sur la côte atlantique, à 550km au Sud de Casablanca et à 170km d'Essaouira. Limitée par les chaînes montagneuses du Haut-Atlas au Nord et à l'Est, par l'oued Souss au Sud et par l'océan Atlantique à l'Ouest (Fig.1). La ville d'Agadir est soumise à un climat semi-aride, caractérisé par un été chaud très sec et un hiver frais très humide. Les précipitations sont irrégulières dans l'espace et dans le temps, elles varient entre 45 et 530mm/an. Les températures moyennes annuelles varient entre 10 et 32°C.

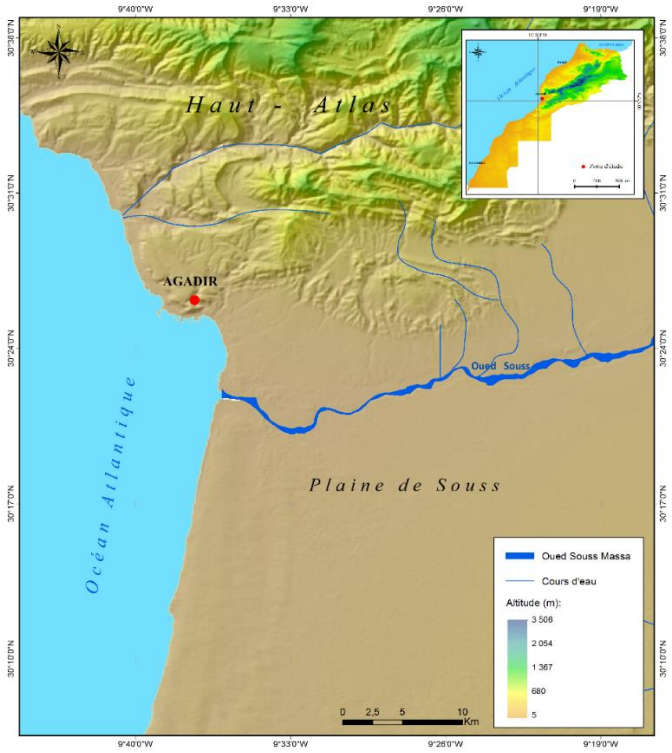


Figure 1. La situation géographique de la zone d'étude (Agadir)

1.2. Source des données

Dans cette étude, nous utilisons les données pluviométriques constituées des hauteurs de pluies journalières de l'année 2014, notamment de mois novembre, enregistrées dans la station synoptique d'Agadir (Direction Nationale de la Météorologie «DMN») (Tab.1). Pour l'étude de la circulation atmosphérique, notre étude est fondée sur une analyse des cartes météorologiques marocaines et européennes. Ces cartes sont disponibles sur plusieurs sites web notamment : www.wetterzentarale.de & www.wetter3.de

Tableau 1. Les données géographiques et pluviométriques de la station étudiée (Agadir, 2014) (données : Direction Nationale de la Météorologie (Agadir, 2014))

Région	Station	Long.	Lat.	Alt (m)	P. annuel 2014	P. de Novembre 2014
Atlantique	Agadir	-9.56	30.38	11 (m)	530.42 mm	255 mm

1.3. Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée, dans la présente étude, est pour l'objectif de caractériser les précipitations automnales extrêmes sur la ville d'Agadir durant l'année 2014 et notamment de novembre. Les approches proposées sont subdivisées en deux catégories :

- L'approche synthétique ou dynamique pour expliquer les situations synoptiques, type de temps et ambiances climatiques (Bouaiche *et al.,* 2016).
- L'approche analytique ou séparative pour analyser les séries pluviométriques de l'année 2014 (novembre) dans la station synoptique d'Agadir (Bouaiche *et al.,* 2016 & 2018).

2. Résultats et discussions

L'étude tente d'expliquer les conditions climatiques de l'année pluvieuse de 2014 et d'analyser les différentes situations atmosphériques responsables des pluies extrêmes automnales de novembre. Elle s'intéresse également aux risques qu'elles ont engendrés en termes de crues, d'inondations, de pertes humaines et de dégâts matériels (Bouaiche *et al.,* 2018). Les situations proposées dans cette étude sont subdivisées en deux épisodes ; les 20-25 novembre 2014 et le 27 novembre 2014.

2.1. Analyse de la situation Novembre 2014 à la ville d'Agadir

L´épisode 1- 20 au 25 novembre : une coulée froide méridienne s'est établie depuis le 20 novembre entre deux cellules anticycloniques d'où l'installation d'une zone dépressionnaire au sud-ouest du Maroc (Fig.2A, 3A). Le 21 et le 22, il est tombé plus de 176mm à Ighrem et de 177mm à Nougdal sur l'Anti-Atlas (Fig.2B, 3B). La descente de la goutte froide le 23 novembre sur les iles Canaries a créé un minimum barométrique à l'Est près des côtes marocaines (Fig.2C). La ville d'Agadir affectée des masses d'air ondulantes et régénérées sur l'Atlantique a reçu 80mm de précipitations (Janati, 2010). Le 20 novembre, les SST (Sea Surface Temperature) indiquent une hausse thermique notable, ce qui accroit les échanges de chaleur avec l'air par conductivité (Fig.3C).

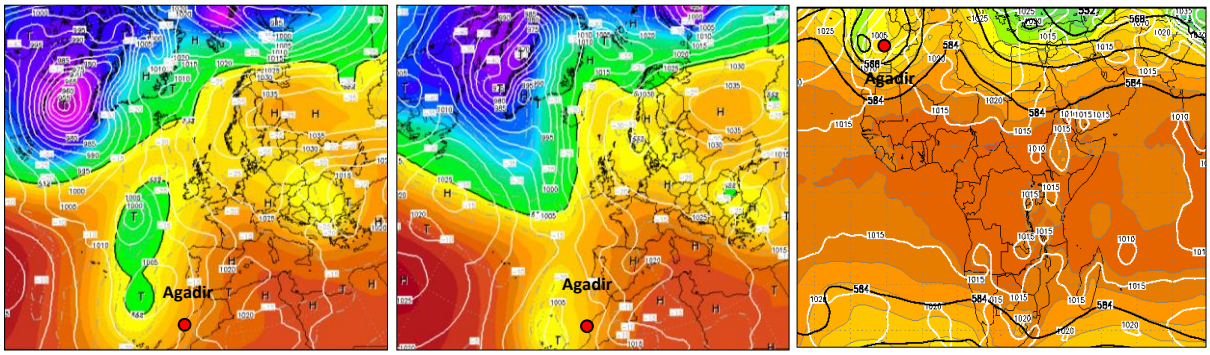


Figure 2. 2A et 2B. Situation synoptique à 500Hpa du 20 et 21 novembre 2014 à 0h TU (à gauche vers à droite), et 2C : situation isobarique au sol et en altitude du 23/11/2014 à 06h TU. (Source : www.wetterzentrale.de et www.wetter3.de)

Figure 3. 3A, 3B et 3C. Situation satellitaire du 20-22 novembre 2014 à 22:00 UTC (à gauche vers à droite), 3C : SST (Sea Surface Température) le 20/11/2014. (Source : www.wetterzentrale.de)

L´épisode 2 - 27 novembre : une importante décharge polaire s'est effectuée vers les côtes marocaines. D'où le creusement d'un fort minimum barométrique centré sur les iles madères supportés en altitude par une goutte froide (-20°C) au sein d'une ondulation méridienne vers le sud du jet subtropical. Cette 1ère dépression qui s'est maintenue plus au nord a arrosé plusieurs villes sur l'axe d'Agadir-Essaouira avec plus de 80mm (Fig.4,5). La 2ème dépression très creuse à 985hPa s'est déplacée plus au sud. Les pluies diluviennes issues du passage d'un front chaud et froid ont inondé le sud-ouest du Maroc (Fig.6,7). Les SST (Sea Surface temperature) montrent également une diminution légère de la température le 27-11-2014 par rapport au 20-11-2014, mais ils se sont maintenus dessus de 0°C.

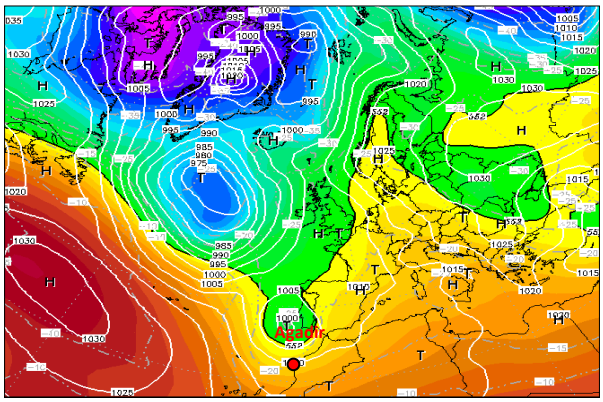


Figure 4. Situation synoptique à 500Hpa du 27/11/2014 à 0h TU. (Source : www.wetterzentrale.de)

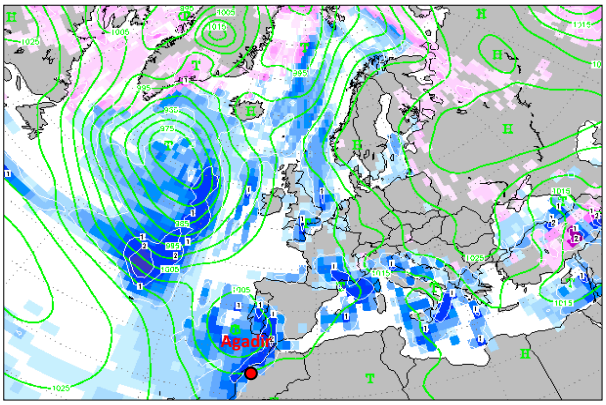


Figure 5. Situation isobarique au sol du 27/11/2014 à 0h TU. (Source : www.wetterzentrale.de)

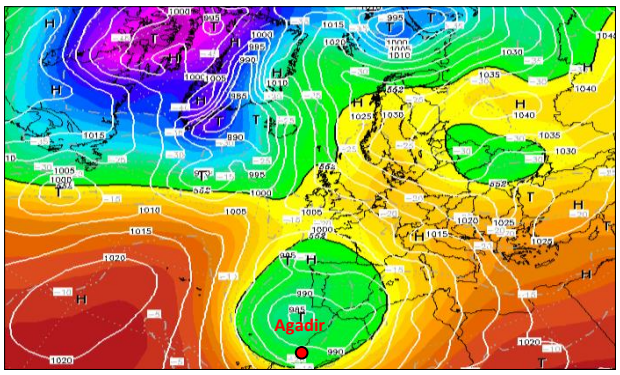


Figure 6. Situation synoptique à 500Hpa du 29/11/2014 à 0h TU. (Source : www.wetterzentrale.de)

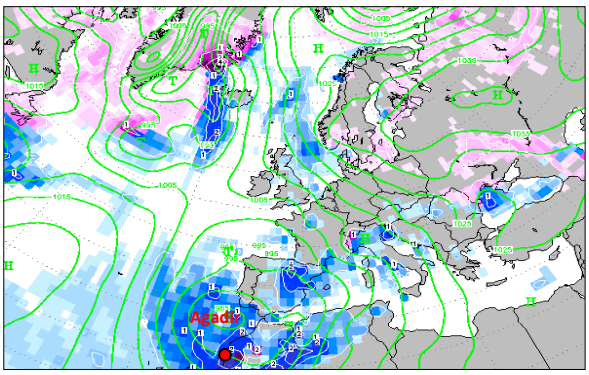


Figure 7. Situation isobarique au sol du 29/11/2014 à 0h TU. (Source : www.wetterzentrale.de)

2.2. Des pluies automnales extrêmes causant des inondations à la ville d'Agadir

Durant l'automne, la deuxième moitié de novembre 2014, se présente comme la phase où il y a eu les plus fortes menaces pour la population à cause de fortes chutes pluviométriques ayant frappé la ville d'Agadir. L'analyse statistique relative à cette période s'avère nécessaire pour comprendre l'origine de ces états pluviométriques extrêmes. Ainsi, de fortes précipitations ont arrosé plusieurs stations. Les pluies, les plus élevées, enregistrées entre midi 28 novembre à midi 29 novembre 2014 ont été relevées : 140mm à Ait Baha, 110mm à Massa et plus de 70mm à Agadir (Fig.8).

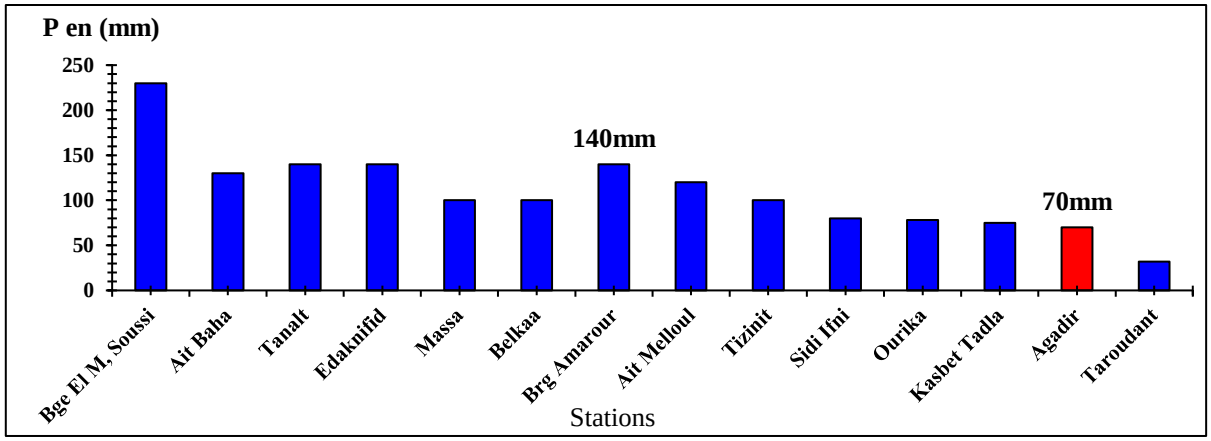


Figure 8. Pluies enregistrées entre midi 28 novembre à midi 29 novembre 2014 au Maroc.

Le régime pluviométrique de l'année hydro-agricole 2014-2015 (Tab.2) est un régime automnal par excellence. Rares sont les années qui présentent de telles caractéristiques. Le mois de novembre, de nature ayant un caractère hivernal (130mm), a reçu des précipitations journalières record, qui ont placé le total mensuel de ce mois au-dessus du mois de décembre, de janvier et de février (Tab. 2).

Tableau 2. Le maximum journalier enregistré pour le mois de novembre dans la ville d'Agadir (2014). (Source de données : Direction Nationale de la Météorologie (Agadir, 2014))

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout
P mm	20	01	130	12	65	06	24	46	03	00	01	00

En ce qui concerne le total des pluies enregistrées entre midi 27 et 29 novembre 2014 dans quelques stations, ces zones ont connu une abondance pluviométrique extrême. En effet, les chutes journalières de pluies considérées comme des records ont fortement soutenu l'apport mensuel qui a atteint des valeurs, jamais observées pendant cette période de l'année (2014). Ainsi le total mensuel du mois de novembre a dépassé les 255mm à la station d'Agadir (Tab.3).

Tableau 3. Pluies enregistrées entre midi 27 novembre à midi 29 novembre 2014 au Maroc. (Source de données : Direction Nationale de la Météorologie (2014))

Stations	P. en (mm)	Stations	P. en (mm)
Agadir	255	Ifrane	80
Taroudant	240	Kenitra	75
Béni Mellal	120	Larache	65
Essaouira	110	Ouerzazete	60
Marrakech	112	Casablanca	45
Khouribga	85	Taza	38

Les dégâts matériels engendrés sont énormes, des infrastructures de base et des réseaux de communication d'assainissement et d'électricité ont été endommagés. Et des pertes humaines importantes à Agadir et Guelmim ont eu lieu le 22 novembre, principalement liées à la traversée de l'oued en crue par des véhicules qui ont été emportés par le courant (photo.1). 47 personnes ont perdu la vie et un nombre incalculable d'autres personnes ont souffert de conséquences à long terme, tant matérielles que psychologiques, en raison des dommages causés à leurs habitations (Janati I. 2010) (Photo.1).

Photo 1. Effet des inondations du 22 novembre 2014 à la ville d'Agadir. (Source : http://ar.le360.ma)

Conclusions

Les pluies d'automne sont marquées par leur forte intensité journalière même horaire en particulier sur les régions montagneuses. Elles sont reflet du démarrage de l'activité cyclonique qui se met en place progressivement sur l'Atlantique Nord-Est au voisinage de l'Europe de l'Ouest. Elles sont dues à des temps perturbés supportés en altitude dans la plupart des cas par des gouttes d'air froid qui s'individualisent au voisinage du Maroc. Leur intensité semble s'accentuer en raison du réchauffement climatique. Les risques engendrés par les évènements pluvieux sont préjudiciables pour les zones urbanisées situées auprès des cours d'eau. Les dégâts matériels et humains présents lourdement sur le plan économique et psychologique puisqu'elles restent gravées dans les mémoires des populations sinistrées souvent défavorisées. La lutte contre les inondations causées par des pluies extrêmes comme celle de la période automnale nécessite une augmentation de la résilience des villes face à ces types de risque en améliorant la prévision, la diffusion de l'information, la gestion des bassins versants et les capacités de drainage des zones urbanisées.

Bibliographie

Bouaiche A., Karrouk M. S., 2016. Situations météorologiques extrêmes générant les inondations dans le bassin versant d'Inaouene (Maroc septentrional). *Actes du colloque organisé par l'Association Nationale des Géographes Marocains*, 29-30 mai 2015, Rabat, Maroc, Volume 31 n°1, 81-94.

Bouaiche A., Karrouk, M. S., Janati, I. D., 2018. Impact de la sécheresse climatique sur la ressource en eau dans le bassin versant d'Inaouene, Maroc septentrional (1989-2013). *Acte du colloque Climat, eau et société (CES'2015)*, Béni Mellal 18-19 mars 2015, Numéro 1, Septembre 2018, 10-16.

Bouaiche A., Karrouk M. S., Chair M., 2018. Précipitations extrêmes et inondations à la ville de Taza, cas des inondations du 29-30 novembre 2010. *Acte du colloque international sur les risques naturels et l'aménagement du territoire*. Publication de l'université Mohamed 1er, Oujda, Maroc. 204-210.

Janati I., 2010. Situation pluviométriques et impacts engendres au Maroc : cas de l'année 2008-2009. *Geomaghreb 2010*, n° 6, 105-119.

Karrouk M. S., 2012. New climate and predictions constraints in the Western Mediterranean. Global conference for oceans, climate and security (GC'2012). University of Massachusetts, Boston.

URBAN MORPHOLOGY AND AIR QUALITY IN CURITIBA, PARANÁ SOUTHERN BRAZIL

CASTELHANO F.J. , PINTO J.E.S.S.

Laboratório de Geoecologia e Planejamento Territorial, Federal University of Sergipe, Aracaju, Brazil (fjcastelhano@gmail.com)

Summary: *The purpose of this paper is to evaluate the relationship between the planning and production of urban space in the city of Curitiba, southern Brazil, with atmospheric pollution levels, in specific, the carbon monoxide. The methodology used, involves collecting pollutant data through mobile measurements using MQ-135 sensors. The transect was carried out using a bicycle, and a five-kilometer route was traveled along the city center roads, thought three days at the same time in the morning. The proposed route crosses high traffic lanes, vertical regions, urban parks and pedestrian-only traffic areas. In spatial terms, there were differences of up to 600% in the levels of carbon monoxide registered with the urban park compared to the road with the highest vehicle traffic. In addition, the stretches that passes through pedestrian-only areas, even with strong verticalization, revealed values closer to those of the park.*

Key words: *air pollution; Curitiba; mobile measurements; urban planning*

Résumé : ***Morphologie urbaine et qualité de l'air à Curitiba, Paraná, sud du Brésil.*** *L'objectif de cet article est d'évaluer la relation entre la planification et la production d'espace urbain dans la ville de Curitiba, dans le sud du Brésil, avec les niveaux de pollution atmosphérique, en particulier le monoxyde de carbone. La méthodologie utilisée consiste à collecter des données sur les polluants au moyen de mesures mobiles à l'aide de capteurs MQ-135 qui collectent des données sur le monoxyde de carbone. Le transect a été réalisé à l'aide d'une bicyclette et un itinéraire de sept kilomètres a été parcouru le long des routes du centre-ville, trois jours à la même heure du matin. Le tracé proposé traverse des voies très fréquentées, des régions verticales, des parcs urbains et des zones de circulation réservées aux piétons. Sur le plan spatial, il existait des différences allant jusqu'à 600% dans les niveaux de monoxyde de carbone enregistrés dans le parc urbain par rapport à la route présentant le plus grand trafic de véhicules. De plus, les tronçons traversant des zones réservées aux piétons, même très encaissés, révèlent des valeurs plus proches de celles du parc.*

Mots clés : *la pollution de l'air; Curitiba; mesures mobiles; aménagement urbain*

Introduction

Air pollution is one of the main environmental problems registered in urban environments. According to the WHO (2016) ambient air pollution is responsible for about 3 million deaths annually. The same report pointed that 90% of the world's population breathe air that does not comply with the WHO Air Quality Standards. Related to the industrial capitalist lifestyle, this problem has strong connections with the way cities are planned and produced and with the prevailing weather conditions in each city.

The present work will try to demonstrate the relationship between urban morphology and levels of air pollution. For this purpose, mobile carbon monoxide collections were carried out in the city of Curitiba, capital of the state of Paraná, in the southern region of Brazil. (Fig.1).

Curitiba is well known worldwide by its urban planning, considered to be a model to a developing country. Based on that, the purpose of this paper is to analyse the city in order to highlight the relationship between the urban air quality and the urban morphology of the city center.

It is known that the types of weather observed in a given site can be defined as a crucial piece in the understanding of the dispersion or concentration of atmospheric pollutants (Hufty, 2001; McCormac, 1971), however, the planning and production of the urban areas will be the main agents in the poor air quality of a city. The location of industries, the layout of buildings, the presence of green areas and vehicle traffic can be considered as fundamental in the understanding of the air quality dynamics.

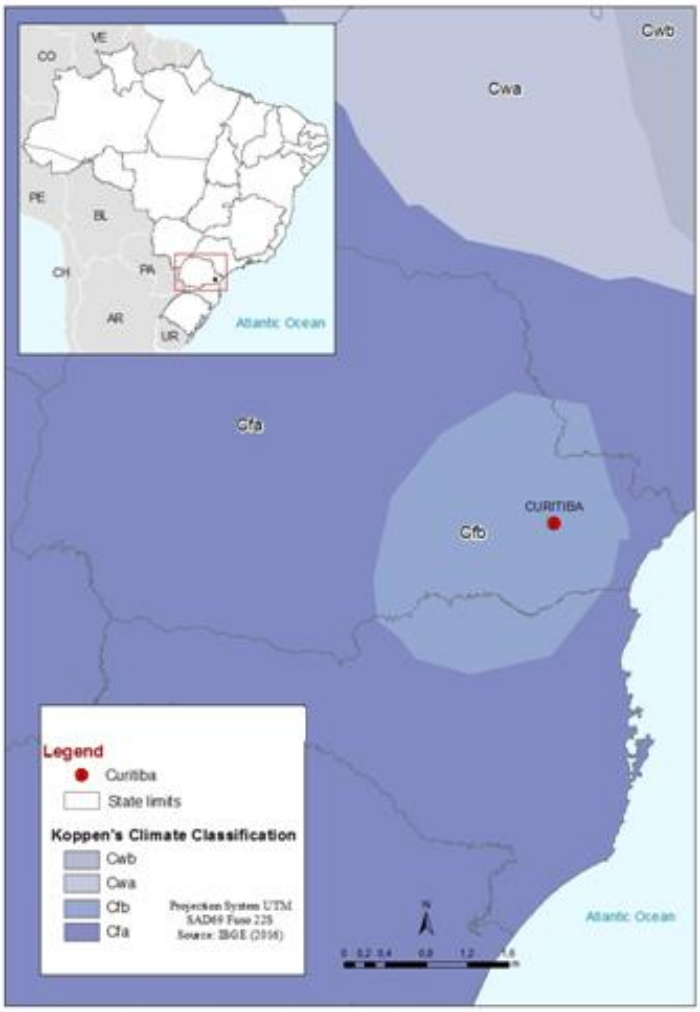


Figure 1. Location of Curitiba/ Paraná – Southern Brazil.

Curitiba is the largest city in the southern region of Brazil, with 1.9 million inhabitants (IBGE, 2019). The municipality's car fleet has increased significantly in recent years, from 808,070 vehicles registered in 2003 to 1,429,534 in 2013 and 1,514,424 in 2018. An increase of 87.4% in 10 years, thus composing one of the highest rates of cars per inhabitant in Brazil, which certainly implies directly and indirectly in the air quality of this city. In 2003, the ratio was 0.48 vehicles per inhabitant of Curitiba, in 2013 it jumped to 0.77 and in 2018 to 0.79 (DIRETRAN, 2019).

Reinforcing the role of the car in poor air quality in Curitiba, in a report released in 2016, it was reported that 72% of greenhouse gas emissions in the city came from motor vehicles, with fixed sources, which mainly come in activities only 13%, and the rest from waste management (Prefeitura de Curitiba, 2016).

1. Data and Method

To carry out the spatial data collect and analysis, it was decided to follow the method of mobile air pollution data measurements. Mobile data collection is a recurring methodology in climatology, due to its low cost and easy execution.

Due to the fact that we are collecting air pollution data, it was decided to carry out mobile measurements with sensors attached to a bicycle, about 1.20 m from the ground. The bicycle does not emit pollutants and for its ease to circulate on roads where other vehicles are prohibited

(Pedestrian paths and parks) make it highly recommended for this type of work (Cipoli, Targino and Toloto, 2017)

Thus, a four-kilometer route through the central region of Curitiba was devised, lasting about 30 minutes. The trip was carried out on three different days, always on weekdays, starting at 3 pm. Such schedule was chosen because they are between the two daily peaks of the city (Castelhano, 2017), so that the central streets were not taken by cars and making it possible to notice the influences of the central urban features and functions of the city in the levels of pollutants. Data were collected on January 21, 30 and 31, 2020.

On January 21^{th,} the National Meteorological Institute of Brazil, registered a predominant wind direction from East, and a average wind speed of 1,9m/s. The average temperature in this day was19.5°C and a precipitation of 12 mm was registered. On January 30th, the average temperature was 23.2 °C, the average wind speed was 1,1m/s and the predominant wind was northwest. During this day, 17.4 mm of rain were registered On the last day of collecting, the average temperature was 22.6°C. The predominant wind direction was west and the average wind speed was 2.2 m/s. During this day, no precipitation was registered.

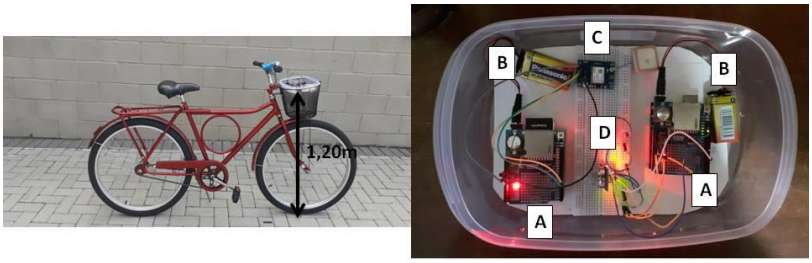
A route in which different urban characteristics of downtown Curitiba was chosen, in order to be analyzed and compared. Figure 2 shows the route taken and characterizes the areas covered. Thus, there were areas of medium vehicular movement, urban park areas, exclusive pedestrian paths and high movement urban canyons.

Figure 2. Path traveled and its spatial characteristics.

The data used in this study were collected with sensors programmed via ARDUINO processor. Thus, a GPS and a Carbon Monoxide Sensor MQ-135 were programmed to collect and record data every second (Fig.2).

The GPS used was the NEO6M model with an accuracy of 2.5m. The MQ-135 sensor, collects Carbon Monoxide data, among other pollutants by the method of conductivity

difference having been calibrated at an official air quality monitoring station. The use of this sensor for Monoxide Carbon measurements can be seen in Chaudry (2013) and Soares (2018).



A- ARDUINO UNO PROCESSOR
B- 5V BATTERY
C- GPS-NEO6M
D- MQ135 SENSOR

Figure 3. Sensors and Equipments used on the Data measurement

2. Results

The data measurements reveal an intimate relationship between the CO oscillation and the urban features of Curitiba. At the first day of measurements, on 21/01/2020, the average CO collected was 0.97 PPM, while the peak recorded was 7.1 PPM. According to data from the National Institute of Meteorology, this day recorded 12mm of rain in the early afternoon, moments before data collection. On 30/01/2020 the average CO collected was higher, reaching 6.2 PPM, with peaks of 25.5 PPM. As in the previous collection on January 21, the precipitation registered was 17.4 mm, with rain events in the morning.

On the last day of collections, the values were higher, registering an average of 13.8 PPM and a peak of 79.6 PPM. On this day, unlike the others, precipitation values were not registered.

Figure 4 compares the CO values measured with the spatial characteristics of the collection area on 21/01/2020. It is observed that the highest values of the day were collected along the urban canyon. The same pattern occurs in collections made on 30 and 31/01/2020, represented by figures 5 and 6 respectively.

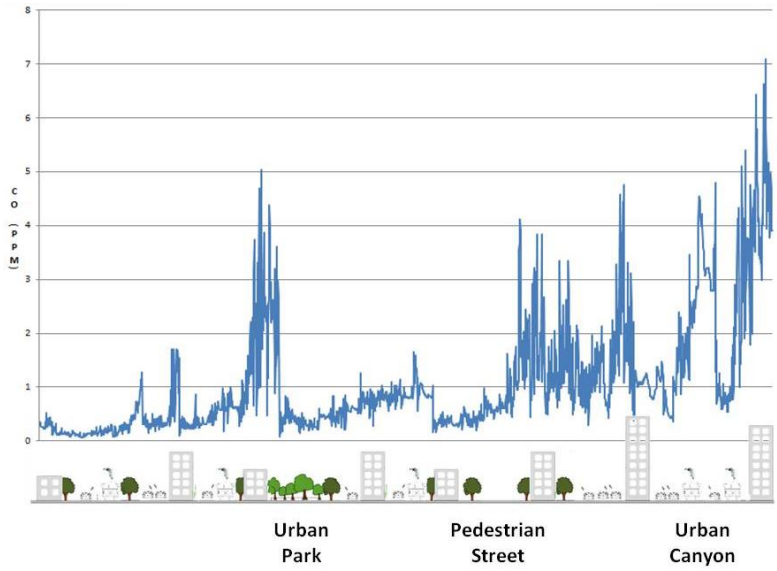


Figure 4. Urban Morphology and CO levels – 21/01/2020

It is possible to notice a sharp drop in the levels recorded in two moments, during the urban park, and during the crossing of the pedestrian street. It is noteworthy that, during this first day of data measurement, in no time, the values exceed the minimum limit established by Brazilian law of 9 PPM as a daily moving average. However, the values in the urban canyon are more than seven times higher than the values in the pedestrian street and in the park.

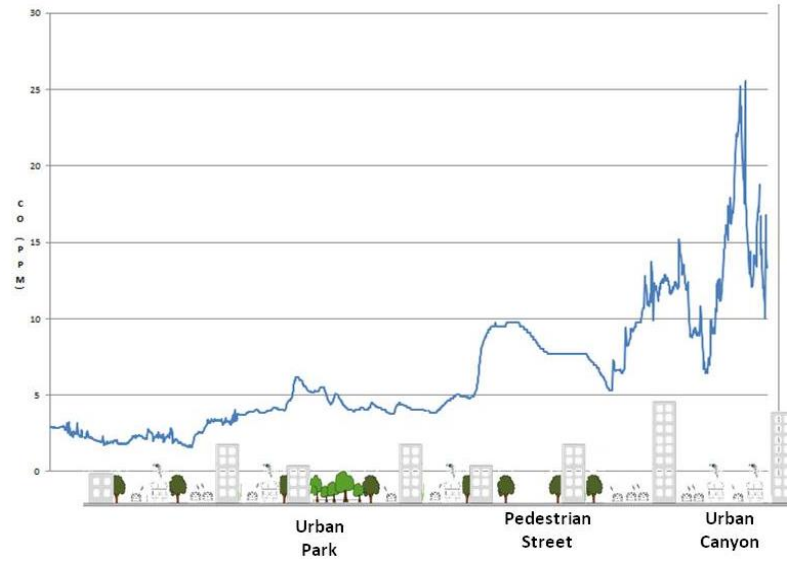


Figure 5. Urban Morphology and CO levels – 30/01/2020

The second day of collection revealed similar patterns but with different values. The occurrence of rainfall shortly before the measurement may be responsible for the more equalized aspect of the data. The values measured, however, were higher, with peaks reaching 25 PPM in the urban canyon. The difference in values between the urban canyon and the urban park reached five times.

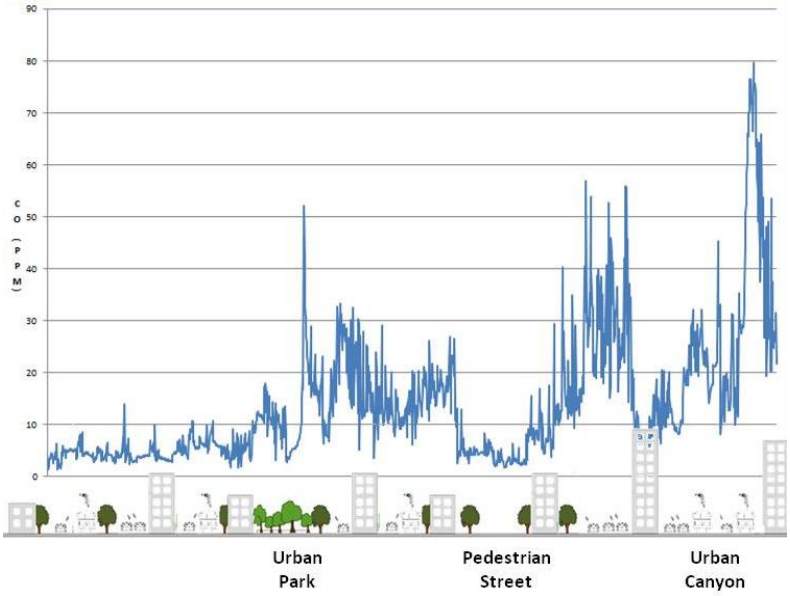


Figure 6. Urban Morphology and CO levels – 31/01/2020

The third day of measurements did not show precipitation registers, which may explain the higher values recorded on that day. Sharp peaks can be seen in the vicinity of the urban park and a significant reduction and maintenance of low values in the pedestrian street. The pedestrian street was the only place where values above the legal limits were not registered, a

fact that even includes the park area. The urban canyon registered up to ten times more CO than the pedestrian street.

Conclusions and Discussion

The present work tried to test a new methodology for collecting and analyzing air quality data. Mobile collection proved to be a dynamic methodology that allows the identification of hotspots and a quick relationship between urban features and air pollution. It is not recommended to use this technique to relate the types of weather and atmospheric circulation to the levels of pollution because of the short measurement time on each day.

The methodology, although exploratory, allowed us to detect points in the central region of Curitiba whose air quality exceeds the established minimum limits, and therefore modifications should be targeted, such as the urban canyon region.

The park, about one kilometer from the urban canyon, even registered concentrations of CO seven times lower. The pedestrian route, just 650 meters from the canyon, registered values up to ten times lower.

The lack of data, as well as the lack of research in this area, together with the low cost of the technique used, place it as a future possibility in exploring the relationship between urbanization, urban planning and air quality.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for funding this research.

Literature

Castelhano F.J., 2017. Considerações Acerca da Poluição do Ar e Circulação de Veículos na Região Central de Curitiba/PR. *Geografia* (Londrina), 26, p.116

Chaudhry V., 2013. Arduair: Air Quality Monitoring. *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 4, n.6, 639- 646.

Cipoli Y.A., Targino A.C.L., Toloto M.O., 2017. Distribuição espacial de poluentes atmosféricos no centro de Curitiba (PR), *XXII SICITE*, Londrina, 1-7.

DIRETRAN, 2019. Frota de Veículos Cadastrados no Estado do Paraná. URL: http://www.detran.pr.gov.br/arquivos/File/planejamento/2019. [Acesso em: 24 jan. 2020]

IBGE, 2019. Projeção da População Brasileira. URL: https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. [Acesso em: 24 jan. 2020]

Hufty A., 2001. *Introduction a lá Climatalogie – Le rayonnement et la temperature, L'atmosphere, L'eau, Le Climat et L'activité Humaine*. Presse de l'université de Laval, Laval, France.

McCormac B.M., 1971. *Introduction to the Scientific Study of Atmospheric Pollution*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Soares A.R., 2018. *Desenvolvimento e Teste de um protótipo móvel com sensores Low Coast*. Master's degree dissertation, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Worlds Health Organization, 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. URL: https://www.who.int/phe/publications/air-pollutionglobal-assessment/en/.

ÎLOT DE CHALEUR DANS UNE VILLE BRÉSILIENNE MOYENNE ET PERSPECTIVES D'ACTION PUBLIQUE

CAVICCHIOLI A., MELLO-THÉRY N.A.

Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brésil (andrecav@usp.br namello@usp.br)

Résumé : *Compte tenu de la préoccupation croissante concernant les effets de l'urbanisation dans la formation ou l'exacerbation d'îlots de chaleur dans les villes de taille moyenne, ainsi que l'efficacité des politiques et actions publiques dans l'atténuation de ce phénomène, ce travail présente l'étude de cas de Jacareí. Cette commune brésilienne situé sur l'axe São Paulo – Rio de Janeiro a une population d'environ 230 000 habitants, presque entièrement concentrés en zone urbaine. Un ensemble préliminaire de données de température (T) et d'humidité relative (RH) collectées en des points de surveillance urbains et ruraux, ainsi que dans un parc périurbain, montre l'existence de différences de températures moyennes de l'ordre de 1,5 à 2,5 º C entre le centre-ville et la zone rurale. Cette situation est atténuée au sein du parc où la réduction de HR en saison sèche est également nettement moins intense. L'analyse des documents publics disponibles indique que la végétation fait objet de politiques gouvernementales, même si, à ce jour, aucun signe non équivoque de mise en œuvre effective de tels plans (c'est-à-dire en termes d'allocations budgétaires spécifiques) n'a pu être détecté.*

Mots clés : *villes moyennes ; température ; humidité relative ; politiques publiques*

Summary: ***Heat island in a brazilan mid-sized city and perspectives of public action.*** *In the light of an increasing concern for the effects of urbanization in the formation or exacerbation of heat islands in mid-sized cities, as well for the effectivity of public policies and actions in the mitigation of such phenomenon, the present work presents the case study of the Brazilian city of Jacareí. Localized on the São Paulo–Rio de Janeiro axis, this municipality has a population of approximately 230.000 inhabitants, almost entirely concentrated in the urban area. A preliminary set of temperature (T) and relative humidity (RH) data collected in urban and rural stations, as well as in a peri-urban park, show the existence of average temperatures differences of the order of 1.5-2.5 ° C between the city centre and the rural area. This situation is attenuated within the park where episodes of low RH in the dry season are also clearly less intense. The analysis of the available public documents indicates that afforestation is indeed being taken into consideration, although to date no unequivocal signs of effective implementation of such plans (i.e. in terms of specific budget allocations) could be detected.*

Key words: *mid-sized cities; temperature; relative humidity; public policies*

Introduction

Aujourd'hui, près de 85% de la population brésilienne vit dans des espaces urbanisés (IBGE, 2017), territoires de haute densité et aux activités humaines souvent désordonnées et, par conséquent, soumis à de fortes altérations environnementales, parmi lesquelles la formation des îlots de chaleur. Ce phénomène est déjà le sujet de nombreuses études (Bryson & Ross, 1972 ; Monteiro, 1976 ; Landsberg, 1981 ; Lombardo, 1985) qui dès les années 1990 ont commencé à inclure les effets actuels et surtout futurs du changement climatique (Voogt, 2002 ; Ribeiro, 2008 ; Corburn, 2009 ; Revi *et al*., 2014). Pourtant, si les études sur les grandes métropoles sont fréquentes, il y a relativement peu de recherche sur les villes moyennes brésiliennes (100.000 à 500.000 habitants), malgré la croissance importante des contributions dans ce domaine au cours des dernières années (Mendonça, 1995 ; Amorim *et al*. 2009 ; Cardoso *et al.* 2017 ; Teixeira & Amorim, 2018). Ces études constatent que les villes petites et moyennes ne sont pas exemptes de dégradation de la qualité de l'environnement mise en évidence de manière très expressive dans les grandes métropoles et mégalopoles (Mendonça 2003) et que, notamment, dans les petites et moyennes villes se développent également des climats urbains spécifiques (Teixeira & Amorim 2018). D'un autre côté, les villes moyennes ont l'avantage de permettre une planification plus efficace et, par conséquent, le potentiel d'une intervention plus incisive pour atténuer les impacts résultant de la dégradation de l'environnement (Mendonça, 2003), ce qui encourage une analyse plus approfondie de l'action publique dans ce domaine.

Ce travail - partie d'un projet de coopération franco-brésilienne commencé en 2019 – analyse la commune de Jacareí, dans l'État de São Paulo (sud-est du pays). Située à 80 km de la capitale dans la région métropolitaine *Vale do Paraíba e litoral norte* qui est en train de se développer sur l'axe routier São Paulo-Rio (Fig.1), Jacareí a une population distribuée sur une surface de 464,2 km^2 dont presque la moitié dans la zone urbaine. La région métropolitaine est caractérisée par un climat subtropical humide (Köppen Cfa), avec une température annuelle moyenne située entre 19 et 21 ^{o}C qui, selon une étude récente (Ynoue, 2014) pourra s'élever de 3 ° C dans un scénario de stabilisation d'émission de gaz à effet de serre (A1B).

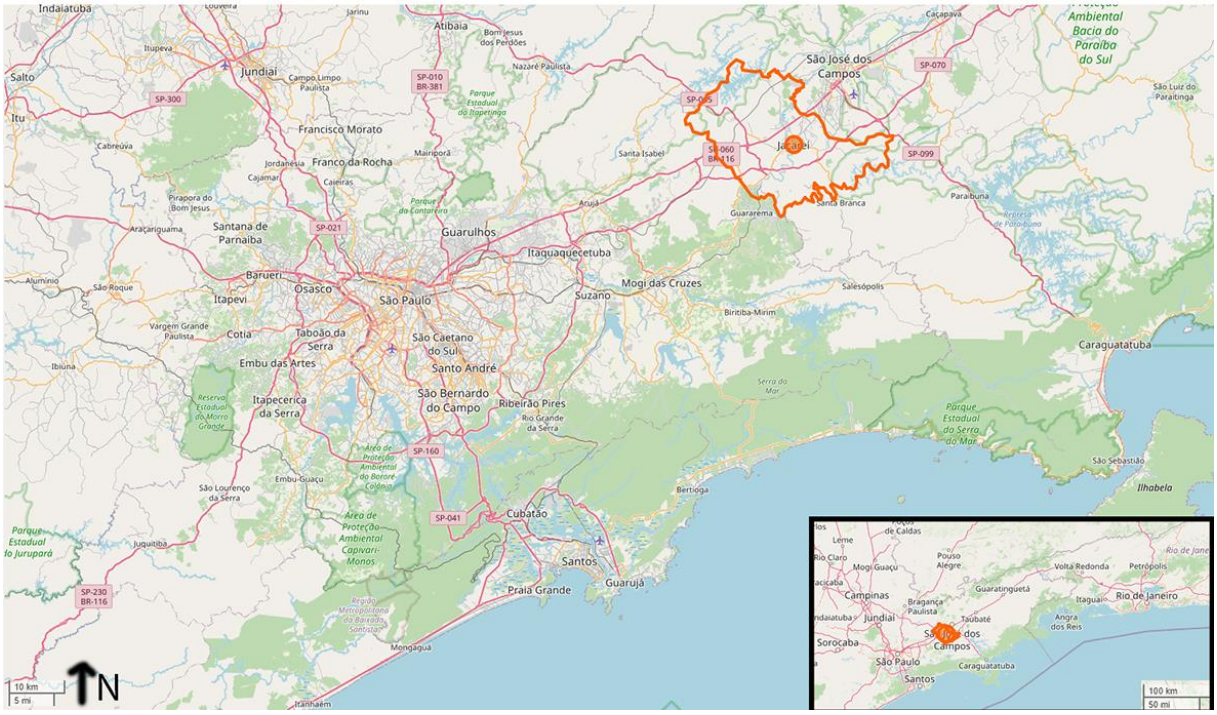


Figure 1. Carte qui montre la commune de Jacareí dans le contexte de l'état de São Paulo. (Fonte : OpenStreetMap.)

Dans ce contexte, les données de température de l'air à la surface ont été obtenues pendant la première étape d'un programme de surveillance réalisé sur le territoire de Jacareí de juin 2019 à février 2020 dans les zones urbaine, périurbaine et rurale de la commune (trois stations climatiques dotées de *dataloggers* de température et humidité relative) qui permettent de dessiner un cadre préliminaire de l'extension et de la variabilité temporelle de l'îlot de chaleur de cette ville.

À partir du scénario défini par ces données et des informations concernant la gestion urbaine, nous analyserons les actions publiques en exécution ou prévues pour savoir comment les données climatiques pourront servir à aménager la commune.

1. Données et Méthodes

1.1. La commune de Jacareí

Jacareí est situé aux coordonnées 23°18′01″S de latitude et 45°58′00″W de longitude. Son territoire est partagé entre la Serra da Mantiqueira (avec des altitudes allant jusqu'à 730 m) et les plaines inondables de la rivière Paraíba do Sul (environ 550-570 m), sur lesquelles se trouve la majeure partie de la zone la plus urbanisée de la commune.

La population actuelle, selon l'estimation de l'Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pour 2019, est de 233 662 personnes (211 214 personnes au recensement de

2010). Selon la même source, presque tous ses habitants (208 297 personnes, soit 98,6%) vivent dans la portion urbaine de la ville, bien que cela ne corresponde pas nécessairement à des logements situés dans des zones à forte densité de construction.

Étant une commune de taille moyenne, elle a une structure administrative qui comprend des services de l'environnement et de la planification, responsables des politiques publiques sectorielles. La présence d'une université sur son territoire et la proximité de São Paulo et Rio de Janeiro facilitent la participation de techniciens et chercheurs scientifiques à sa gestion.

1.2. Stations de surveillance du climat

Les stations de surveillance du climat (Tab.1) ont été installées en trois points fixes, choisis en milieu urbain (jardin du Museu de Antropologia do Vale do Paraíba), périurbain (parc du Viveiro Urbano, à 1090 m à vol d'oiseau du jardin du Museu) et rural (jardin de l'école EMEF Presbítero Mábito Shoji, à 6700 m de distance à vol d'oiseau du point central de surveillance urbaine).

Tableau 1. Attributs géographiques des stations de surveillance

Station de surveillance	Latitude	Longitude	Altitude
Jardin du Museu de Antropologia do Vale do Paraíba	23º18'22.81″ S	45º58'22.15″ W	570 m
Parc du Viveiro Urbano	23º18'52.74″ S	45º58'1.59″ W	600 m
Jardin de l'école EMEF Presbítero Mábito Shoji	23º18'25.90″ S	46º2'20.85″ W	640 m

Chaque station était équipée d'un capteur de température et d'humidité relative, modèle U10-003 (Onset, USA) avec une marge d'erreur de 0,5 ° C et 3,5%, respectivement. Le capteur était logé dans un abri météorologique qui, à son tour, était monté sur un support à une hauteur de 2 m. La précision de l'ensemble des capteurs utilisés a été vérifiée avant le début de la surveillance.

Les séries de températures, collectées à intervalles horaires entre le 14/06/2019 et le 20/02/2020, ont été traitées dans des tableaux Excel.

1.3. Documents officiels de politique et de l'action publique

L'analyse des politiques et actions publiques est basée sur des informations et des données officielles, présentent dans les plans et programmes existants ou en discussion au Conseil Municipal. L'accent a été mis sur l'approche des principales institutions gouvernementales locales, les secrétariats municipaux et autres organismes de gestion publique ainsi que dans la littérature thématique scientifique traitant des changements du climat et de l'environnement urbain.

2. Résultats

L'îlot de chaleur présent dans la région urbaine de la ville de Jacareí a été préalablement caractérisé, dans ce travail, par des mesures de température et d'humidité relative effectuées dans un intervalle de temps relativement restreint (252 jours) et en calculant les différences de température (ΔT) et humidité relative (ΔRH) entre le point central de surveillance urbaine et les points périurbain et rural. Les paramètres considérés étaient les valeurs moyennes obtenues sur toute la période de surveillance, ainsi que sur les périodes correspondant aux mois d'août (modérément plus froid) et janvier (modérément plus chaud). Cette évaluation, qui comprend

les moyennes des valeurs minimales et maximales quotidiennes sur les mêmes intervalles de temps, est représentée dans les graphiques de la Figure 2.

En ce qui concerne la température (Fig.2A, C), toutes les observations pointent vers un ΔT positif, donc avec des températures systématiquement plus élevées dans le centre urbain de la ville par rapport aux deux autres points, avec des différences moyennes de 1,1 ° C dans le cas de la zone rurale et 1,6 ° C dans le cas du parc de la région périurbaine. Dans tous les cas, les écarts dans les températures minimales sont plus marqués que dans les valeurs maximales, ce qui indique qu'en dehors du centre urbain la baisse nocturne de la température est toujours plus élevée qu'au cœur de la ville. Cet effet est plus significatif à l'intérieur du parc périurbain (ΔT = 3,6 ° C), peut-être en raison du refroidissement associé au processus endothermique de transpiration et d'évaporation de l'eau dans un lieu riche en végétation qui agit donc comme un îlot de fraîcheur la nuit.

D'un autre côté, dans le cas des températures maximales, la plus forte augmentation de la température urbaine se produit par rapport au point rural, avec une ΔT moyenne de 2,1 ° C qui monte à 2,3 ° C au mois de janvier. Le parc périurbain, bien qu'il ait un degré d'échauffement réduit (ΔT = 1,5 ° C, avec ΔT = 1,4 ° C en janvier), présente des différences moins expressives par rapport à la zone rurale, peut-être en raison de l'effet de la proximité du centre-ville urbanisé. Il est à noter, cependant, que des épisodes de ΔT instantanées allant jusqu'à 8,2 ° C ont été observés et que des différences instantanées plus importantes ont tendance à se produire le matin en raison d'une augmentation plus rapide de la température urbaine dans cette phase, une observation qui nécessite encore une investigation, mais qui peut dépendre de la circulation intense des véhicules.

Au sujet des valeurs d'humidité relative enregistrées au cours de la période considérée (Fig.2D, F), toutes les observations pointent vers des ΔRH négatif, donc, avec une humidité relative systématiquement plus faible dans le centre urbain de la ville par rapport aux deux autres points, avec des différences des moyennes de -5% par rapport à l'environnement rural et de -9% par rapport au parc dans la région périurbaine. Cependant, le contexte climatique général de la région est caractérisé par une humidité relative moyenne relativement élevée (par exemple, la station météorologique INMET la plus proche indique une RH moyenne d'environ 75% pour la même période couverte par cette enquête) et, pour cette raison, il est plus pertinent de se concentrer sur la RH minimale, lorsque cette quantité atteint des valeurs allant jusqu'à 15%, comme ce fut le cas dans l'après-midi du 18/09/2019.

En particulier, les barres bleues de la Figure 2E (différences moyennes entre la RH minimale en août 2019) indiquent une exacerbation moyenne de la sécheresse atmosphérique d'environ 7% dans le centre de la région urbaine, par rapport à l'environnement rural. Cet effet est neutralisé à l'intérieur du parc périurbain où les valeurs moyennes minimales de RH sont proches de celles des zones rurales. Il faut noter que cet effet sur la zone boisée résulte à la fois de la contribution thermique (températures plus basses) et de la variation de la teneur absolue en vapeur d'eau dans l'air : par exemple, sur la base des données horaires d'août et septembre, il a été calculé qu'un excédent moyen de 10% de la quantité de vapeur d'eau dans l'air (g/kg) du parc périurbain par rapport au centre de Jacareí (excédent qui reste si la moyenne se limite aux cas d'épisode de HR <40%).

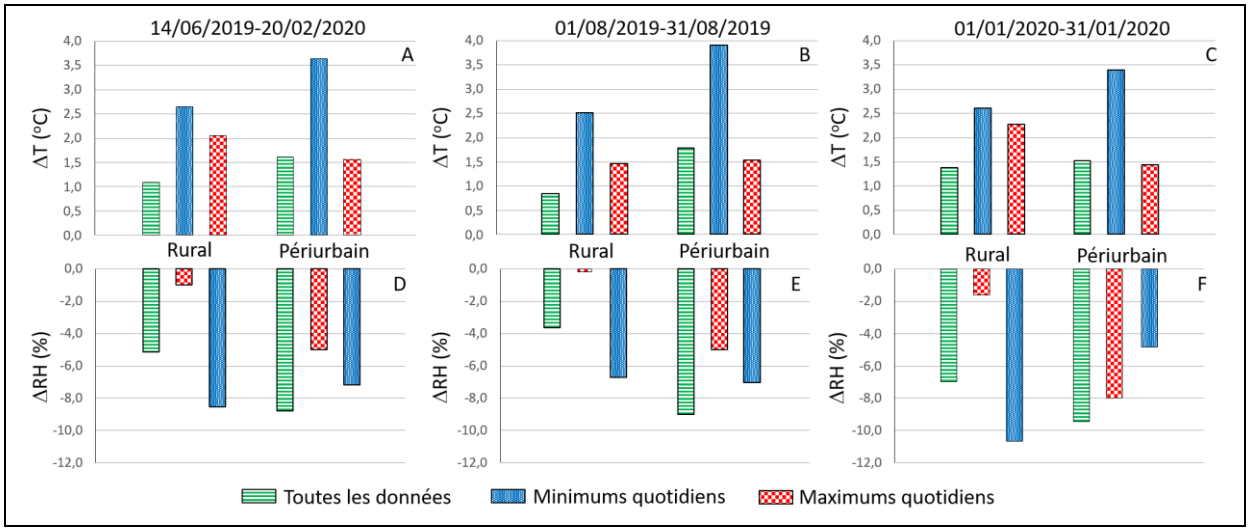


Figure 2. Différences entre les températures (ΔT, A-C) et l'humidité relative (ΔRH, D-F) mesurées dans le centre urbain de Jacareí par rapport au point rural et au parc périurbain, pendant différentes périodes.

À partir du scénario défini par des données et des informations concernant la gestion urbaine, on peut examiner les actions publiques en cours d'exécution et leurs relations avec l'existence de données climatiques. Il est important de se rappeler que la politique de l'État de São Paulo sur le changement climatique n'a été approuvée qu'en 2009 et la politique nationale qu'en 2010. Étant donné que les politiques aux différentes échelles administratives reproduisent la politique nationale, avant ces dates la prise en compte des changements climatiques ne figurait toujours pas dans de nombreuses politiques locales. Néanmoins certains décideurs commencent à réaliser l'urgence de la situation et à établir de nouvelles stratégies pour en réduire les effets (ou s'y adapter).

Jacareí a approuvé son plan directeur d'aménagement du territoire en 2003. Depuis 2013, il est en cours de réexamen et plusieurs tentatives de négociation pour le conclure ont été bloquées au Conseil Municipal. Depuis le début de 2020, le sujet est revenu à l'ordre du jour. Le plan directeur établit le plan de d'arborisation des rues, un programme municipal d'espaces verts et sa qualification par la plantation d'espèces indigènes, le reboisement et le jardinage.

En 2005, la loi sur l'utilisation, l'occupation et l'urbanisation a introduit des paramètres urbains dont, entre autres, le taux de perméabilité, qui vise clairement à améliorer l'environnement naturel et bâti, ainsi que la température et l'humidité de l'air.

Faria *et al.* (2007) ont utilisé le manuel technique pour l'arborisation urbaine de la ville de São Paulo (2006) - faute de cet outil dans la commune - pour l'analyse du boisement de six avenues de la commune de Jacareí, concluant qu'une petite majorité est en bon état, indiquant le besoin de remplacer les arbres et les nouvelles plantations dans la ville. Cependant, il n'analyse pas si la quantité de végétation est suffisante pour l'amélioration du climat.

Conclusions et Discussion

On peut résumer en disant que l'îlot de chaleur existe, bien qu'il soit limité à des changements moyens de l'ordre de 1,5 à 2,5 ° C (selon la période et la série de données considérées), étant toujours plus évident dans la différence entre les températures minimales dans le centre urbain de Jacareí et celles des zones rurales. Le parc situé dans la région périurbaine de la ville adoucit l'effet de l'îlot de chaleur à son intérieur, soit avec une baisse des températures minimales en dessous du niveau rural, en raison d'une augmentation (en moyenne de 7%) des valeurs d'humidité relative dans les épisodes de sécheresse de l'air élevée en hiver.

En ce qui concerne l'écologisation urbaine, les actions publiques en exécution ou prévues à Jacareí incluent déjà la végétation, considérant qu'elle peut avoir une influence sur le microclimat local. Il faut cependant vérifier si (et comment) ces priorités se reflètent dans le budget municipal.

Remerciements

Remerciements à la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior du Brésil (CAPES) et au Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil (COFECUB) pour l'appui financier via projet – Villes, climat e végétation : modelage et politiques publiques environnementales – CAPES (AUXPE: 88881.191765/2018-01).

Bibliographie

Amorim M.C.C.T., Dubreuil V., Quenol H., & Sant'Anna Neto J.L., 2009. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio : exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Confins*, 7, 1-16

Bryson R.A., & Ross J.E., 1972. *The climate of the city. Urbanization and environment*, Belmont, Duxbury Press.

Câmara Municipal de Jacareí. Lei nº 4847, de 07 de janeiro de 2005. Dispõe sobre uso, ° Cupação e urbanização do solo do município de Jacareí.

Cardoso R.S., Dorigon L.P., Teixeira D.C.F., & Amorim M.C.C.T., 2017. Assessment of urban heat islands in small-and mid-sized cities in Brazil. *Climate*, 5, 4-26.

Corburn J., 2009. Cities, Climate Change and Urban Heat Island Mitigation: Localising Global Environment Science. *Urban Studies*, 46(2), 413-427.

Faria J.L.G., Monteiro E.A., & Fisch S.T.V., 2007. Arborização de vias públicas do município de Jacareí – SP. *Revista SBAU*, 2(4), 20-33.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Perfil dos municípios brasileiros. IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro.

Landsberg M.E., 1981. *The urban climate*, New York, Academia Press.

Lombardo M., 1985. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo.* São Paulo, Hucitec.

Mendonça F.A., 1995. *O clima e o planejamento urbano decidades de porte médio e pequeno. Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR*. Thèse de doctorat, Universidade de São Paulo, Brésil.

Mendonça F., 2003. Clima e planejamento urbano em Londrina-Preposição metodológica e de intervenção urbana a partir do estudo do campo térmico. *Clima Urbano*, Monteiro, C.A.F., & Mendonça F. (eds.), São Paulo, Editora Contexto, 93-120.

Monteiro, C.A.F., 1976. *Teoria e Clima Urbano*. São Paulo, IGEOG/USP.

Revi A. *et al.*, 2014. Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field C.B. *et al.* (eds.), New York, Cambridge University Press, Cambridge, 535-612.

Ribeiro W.C., 2008. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. *Parcerias Estratégicas*, 13(27), 297-321.

Teixeira D.C.F., & Amorim M.C.C.T., 2018. O estudo da ilha de calor em cidade de pequeno porte: algumas contribuições. *Sociedade & Natureza*, 30(2), 186-209.

Voogt J.A., 2002. Urban Heat Islands: Causes and consequences of global environmental change. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 3, 660-666.

Ynoue R.Y., 2014. Rapport final du Project FAPESP-CONDEPHAAT "Patrimônio cultural do Vale Histórico Paulista: análise da vulnerabilidade às mudanças climáticas", communication personelle.

ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET MICROCLIMATIQUE D'UN REVETEMENT INNOVANT

CHANIAL M.[1,2], PARISON S.[2], HENDEL M.[2,3], ROYON L.[2]

1 Mairie de Paris, Direction de la Propreté et de l'Eau & de la Voirie et des Déplacements, Paris, France (mailys.chanial@gmail.com)
2 Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, Paris, France
3 Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEN, Noisy-le-Grand, France

Résumé : *L'arrosage comme méthode de rafraîchissement est aujourd'hui perçu comme une solution intéressante d'adaptation des villes au changement climatique. C'est pourquoi la Ville de Paris expérimente depuis 2013 cette méthode rue du Louvre et depuis 2017 sur trois rues au travers du projet LIFE Cool & Low Noise Asphalt. Il vise à tester l'efficacité d'un revêtement innovant sur lequel est expérimenté l'arrosage dans le but de réduire à la fois la température de l'air et le stress thermique subit par les piétons. Les résultats microclimatique et thermique montrent des écarts statistiquement significatifs lorsque le matériau innovant est arrosé. Un impact maximal sur la température de l'air à 1.5m de -0,8°C est observé et de-0,4°C en moyenne. L'impact maximal sur l'UTCI à 1.5m est de -1.9°C et de -0.4°C en moyenne. Nous observons grâce au thermo-fluxmètre placé à 5cm dans la chaussée que le matériau innovant stocke moins de chaleur et sèche plus lentement qu'un matériau de référence permettant ainsi d'optimiser l'effet évaporatif.*

Mots clés : *îlot de chaleur ; revêtement frais ; rafraîchissement évaporatif ; comportement thermique*

Summary: ***Study of the thermal and microclimatic behaviour of an innovative coating.*** *Watering as a cooling method is now seen as an interesting solution for cities to adapt to climate change. This is why the City of Paris has been experimenting this method since 2013 in the rue du Louvre and since 2017 on three streets through the Cool & Low Noise Asphalt LIFE project. It aims to test the impact of watering as an innovative pavement on both air temperature and the pedestrian heat stress. The microclimatic and thermal results show statistically significant events when the innovative material is watered. A maximum 1.5m air temperature reduction of 0.8°C is observed and 0.4°C on average. The maximum impact on 1.5m UTCI is -1.9°C and -0.4°C on average. A thermo-fluxmeter placed at 5cm deep in the pavement demonstrates that the innovative material stores less heat and dries slower than a reference material, thus optimizing the evaporative effect.*

Key words: *heat island; cool pavement; evaporative cooling; thermal behavior*

Introduction

D'ici la fin du 21e siècle, en raison du changement climatique, les vagues de chaleur sont vouées à augmenter en fréquence, en durée et en intensité (Lemonsu *et al.* 2013). De ce fait, les villes doivent trouver des solutions d'adaptation afin de limiter leurs impacts sanitaires sur la population (Akbari *et al.* 2001; Bowler *et al.* 2010; Santamouris 2013).

A cet égard, la Ville de Paris, disposant d'un double réseau d'eau potable et non potable sur son territoire, réalise depuis 2013 des campagnes expérimentales d'arrosage à l'eau non-potable de l'espace public dans le but de limiter le stress thermique des piétons (Hendel *et al.* 2016).

Plus récemment, le projet *Cool & Low Noise Asphalt*, cofinancé par le programme *Life* de l'Union européenne et lancé en 2017, vise à tester l'efficacité de trois revêtements de voirie innovants par rapport aux traditionnels enrobés noirs. Ces revêtements ont été élaborés de sorte à améliorer les effets de l'arrosage urbain grâce à une texture de surface favorisant la rétention d'eau. Ils présentent également des granulats légèrement plus clairs que les structures standards.

Afin d'évaluer les impacts microclimatiques de ces matériaux, trois sites ont été équipés de stations météorologiques munies de capteurs permettant ainsi la quantification des effets de l'arrosage. Ces impacts sont évalués à l'aide de deux indicateurs, la température de l'air et l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), à hauteur de piéton (1,5 m). L'UTCI est un indicateur de stress thermique. Son calcul résulte d'un bilan thermique du corps humain moyennant certaines hypothèses physiques liées à l'environnement (température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et température moyenne radiative calculée selon la méthode

ASHRAE (Ashrae Standard 2001 ; Błazejczyk *et al.* 2013).

Nous présenterons tout d'abord la méthode d'évaluation des impacts microclimatique et thermique de l'arrosage puis nous introduirons les résultats obtenus pour la rue Lecourbe à Paris pendant l'été 2019 et enfin nous terminerons par une conclusion générale et par les perspectives du projet.

1. Matériels et Méthodes

1.1. Instrumentation et protocole d'arrosage

L'expérimentation est menée rue Lecourbe (orientation nord-est/sud-ouest) située dans le 15^{e} Arrondissement de Paris. Ce site est découpé en trois portions dont deux arrosées. La portion innovante est équipée du revêtement innovant de type asphalte, la portion de référence d'un revêtement classique neuf également de type asphalte et enfin une portion témoin constitué du revêtement d'origine qui n'a subi aucune intervention au cours du projet (Fig.1). Cette dernière est située à une extrémité afin d'éviter que l'arrosage influence les mesures comme cela aurait pu être le cas si elle était située au centre. Chacune de ces portions font 200 m de longueur et environ 20 m de largeur. Le schéma de droite sur la figure 1 illustre les stations météorologiques utilisées et leurs instruments. Ceux-ci permettent de réaliser, à une fréquence d'une mesure par minute, les mesures de la température de globe noir, de l'humidité relative et de la température de l'air (T_{air}) à 1,5 m. A 4 m, ces deux derniers sont aussi mesurés ainsi que la vitesse du vent et le rayonnement net. Également, des thermo-fluxmètres mesurant la température et le flux de chaleur ont été disposés dans la chaussée à 5cm de profondeur.

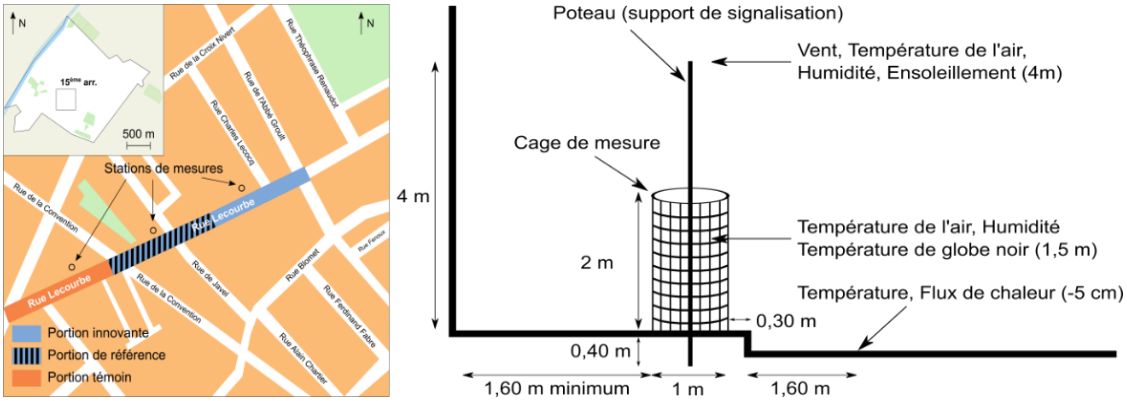


Figure 1. Schéma du site Lecourbe (gauche) et des stations météorologiques (droite).

Les campagnes d'arrosage ont lieu pendant l'été, entre début juin et mi-septembre. Elles sont déclenchées seulement sous certaines conditions météorologiques, correspondant au dépassement des moyennes de température estivale pour Paris, soit des critères assouplis par rapport à une alerte canicule parisienne (Tableau). Enfin, l'arrosage se déroule de 7h à 11h30 (UTC+2) toutes les 1h30 et de 14h à 18h30 toutes les 30 min (Hendel *et al.* 2015).

Tableau 1. Critères de déclenchement de l'arrosage.

Température min. moyenne sur 3 jours	*Température max. moyenne sur 3 jours*	*Vent*	*Couverture nuageuse le jour J*
16°C	25°C	< 10 km/h	Ensoleillé (< 3 octas)

1.2. Analyse microclimatique

L'analyse des données microclimatiques de l'impact de l'arrosage est réalisée selon la méthode décrite par Parison *et al.* (en révision) qui nécessite de s'intéresser aux différences

préexistantes entre les zones d'étude (portion innovante ou de référence et témoin sans arrosage) puis d'étudier leur évolution lors d'une journée arrosée.

On choisit comme notation M, le paramètre météorologique mesuré par la station d'étude. La différence entre la station d'étude et la station témoin (non arrosée) est exprimée par l'équation 1 pour un jour de référence (sans arrosage), et par l'équation 2 pour un jour arrosé.

$$\Delta M^{ref} = M^{ref}_{étude} - M^{ref}_{tém} \quad (1)$$

$$\Delta M^{arr} = M^{arr}_{étude} - M^{arr}_{tém} \quad (2)$$

Pour les jours arrosés, contrairement à la zone témoin qui reste inchangée, l'effet rafraichissant de l'arrosage sur la zone d'étude, noté $Arr_{étude}$, s'ajoute à la mesure de la station d'étude par rapport aux jours de référence.

L'équation 3 permet d'isoler les effets de l'arrosage en s'affranchissant des différences préexistantes entre stations.

$$\Delta M^{arr} - \Delta M^{ref} = Arr_{étude} \quad (3)$$

Un test statistique de signal sur les écarts obtenus est nécessaire afin d'évaluer leur significativité statistique, avec un niveau de confiance de 95%. Le test utilisé est un modèle linéaire à effets fixes, qui suppose une relation linéaire entre les profils moyens de référence et les profils moyens arrosés pour un temps donné (Parison *et al.*, en révision).

1.3. Analyse thermique

Un thermo-fluxmètre disposé à 5 cm de profondeur dans les chaussées des zones innovante et de référence permet la mesure de la température et du flux de chaleur. Ces indicateurs ont pour but de caractériser le comportement thermique de ces matériaux.

L'amplitude de la température dans la chaussée donne une information sur l'impact de l'arrosage. De plus, l'arrosage peut se visualiser directement sur la courbe de flux de chaleur, ce qui permet d'évaluer le temps de séchage approximatif des revêtements.

2. Résultats

2.1. Effets microclimatiques de l'arrosage

Le Tableau 2 présente les effets moyens et maximum de l'arrosage sur les paramètres T_{air} et UTCI durant l'été 2019obtenues grâce à l'analyse statistique sur le site Lecourbe.

Tableau 2. Effet de l'arrosage à 1,5 m sur les voiries d'étude (innovante ou de référence) par rapport à la voirie témoin.

	Voirie innovante		*Voirie de référence*	
	T_{air} à 1,5m	UTCI à 1,5m	T_{air} à 1,5m	UTCI à 1,5m
Effet maximum	-0,8°C	-1,9°C	-1,0°C	-2,0°C
Effet moyen	-0,4°C	-0,4°C	-0,4°C	-0,5°C

Ces premiers résultats permettent de rendre compte de l'impact positif de l'arrosage sur la température de l'air et le stress thermique d'un piéton rue Lecourbe. En effet, une baisse statistiquement significative de ces paramètres est observée sur plusieurs heures par jour. La température de l'air baisse en moyenne de 0,4°C pour les voiries innovante et de référence (classique neuve). L'UTCI est lui, respectivement réduit en moyenne de 0,4°C et de 0,5°C.

La figure 2 représente ces effets sur une journée moyenne de l'été. La courbe bleue représente les effets moyens, l'intervalle de confiance à 95% est illustré par les courbes vertes

et enfin les points rouges représentent les écartsstatistiquement significatifs, c'est-à-dire les effets attribuables à l'arrosage. Pour la suite, nous conserverons le même code couleur.

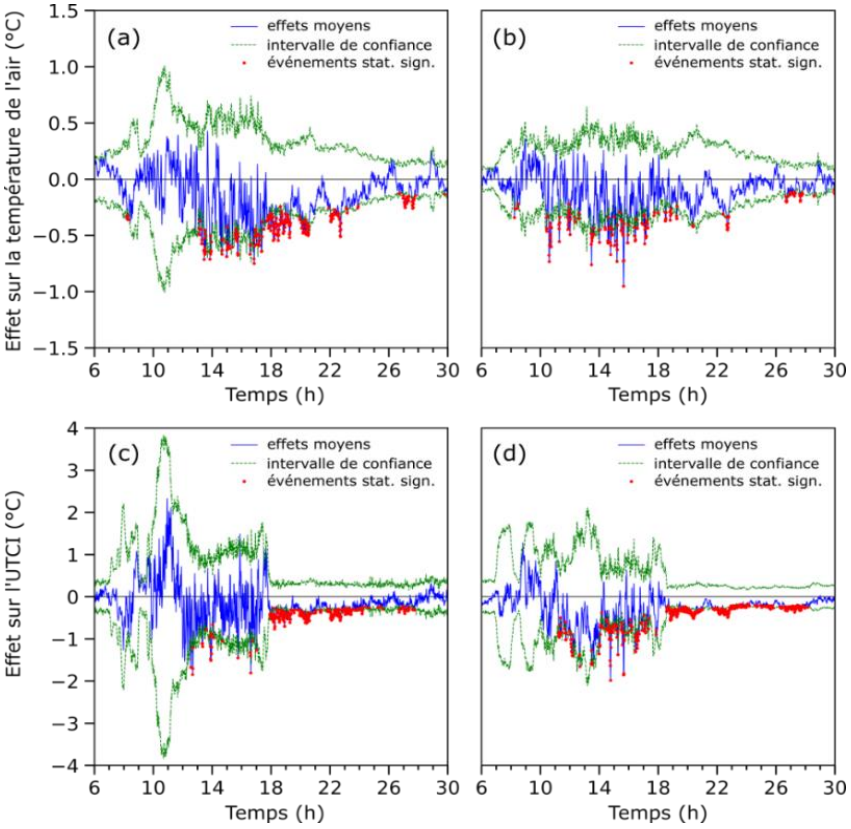


Figure 2. Effet moyen de l'arrosage sur une journée de 6h à 6h. (a) et (c) représentent l'effet de l'arrosage sur la voirie innovante par rapport à la voirie témoin, et (b) et (d) illustrent les effets sur la voirie de référence par rapport à la voirie témoin. En bleu, les effets moyens, en vert l'intervalle de confiance et en rouge les écarts (événements) statistiquement significatifs.

2.2. Effet thermique de l'arrosage

L'arrosage de l'été 2019 a été découpé en plusieurs campagnes, quatre au total. Par souci de lisibilité, nous avons seulement représenté la première campagne d'arrosage (du 26/06/2019 au 28/06/2019) mais les résultats réunis dans le Tableau 3 concernent la totalité des campagnes. Les figures 3(a) et 3(b) présentent l'évolution de la température dans la chaussée pour la première campagne d'arrosage. Les jours de référence (22/6 et 29/6), représentés en rouge, illustrent le fait que l'amplitude de la température des jours non arrosés est plus grande. De plus, sans que cela n'impacte l'amplitude, on constate que les températures atteintes en fin de journée sont plus faibles en raison de l'arrosage.

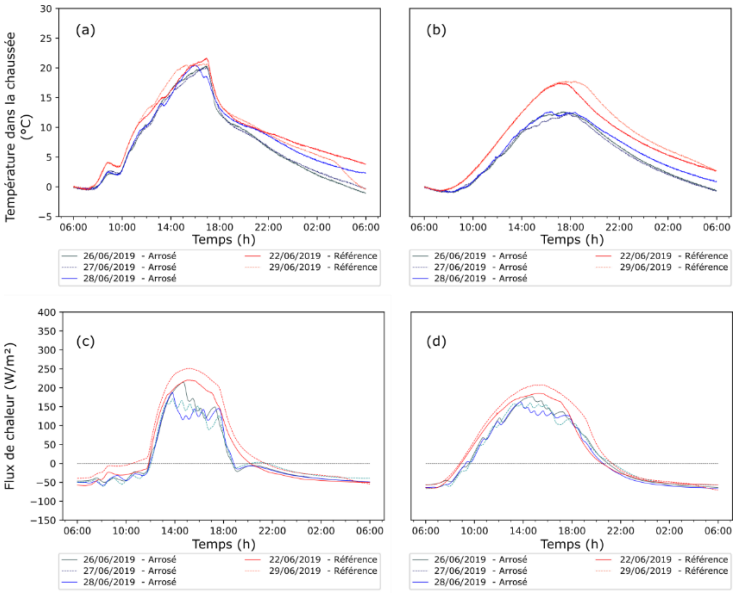


Figure 3. Températures et flux de chaleur à -5 cm dans la chaussée. (a) et (b), respectivement voirie innovante et voirie de référence, illustrent l'évolution de la température dans la chaussée sur une journée de 6h à 6h pour la première campagne (26/06/2019 au 28/06/2019). (c) et (d) illustrent l'évolution de la densité de flux de chaleur sur la même période et pour les mêmes revêtements.

En étudiant les flux de chaleur des figures 3 (c) et (d), nous pouvons repérer distinctement l'effet des périodes d'arrosage. En effet, chaque pic représente le moment où le revêtement est arrosé. A contrario, lorsque le flux augmente à nouveau, cela indique que le matériau est sec et recommence à chauffer. Ainsi, nous pouvons en déduire le temps de séchage des différents revêtements, dont la valeur moyenne sur la période de 13h30 à 17h est résumée dans le Tableau 3. Dans notre cas, la voirie innovante semble sécher moins vite que celle de référence avec respectivement 22 min et 19 min, l'écart restant tout de même peu significatif. Le Tableau 3 regroupe les amplitudes moyennes de température dans la chaussée de la rue Lecourbe. Ces dernières tendent à être plus grandes lorsque la chaussée n'est pas arrosée. L'arrosage permet, en effet, de limiter l'emmagasinement de la chaleur en journée dans la chaussée.

Tableau 3. Amplitudes moyennes des températures à -5 cm et temps de séchage entre 13h30 et 17h pour 11 jours d'arrosage et 16 jours sans.

	Voirie innovante	*Voirie de référence*
Amplitude moyenne avec arrosage	20.2°C	13.6°C
Amplitude moyenne sans arrosage	21.4°C	16.3°C
Temps de séchage	22 min	19 min

Conclusions et perspectives

Cette analyse avait pour but l'étude comparative de l'impact de l'arrosage sur des revêtements innovant et d'origine remis à neuf, dit revêtement de référence.

L'analyse microclimatique vise à évaluer les impacts de l'arrosage sur la température de l'air et sur l'UTCI, nécessitant un traitement spécifique des données. Celui-ci commence par l'identification des jours de référence (sans arrosage) et arrosés servant à l'élaboration des profils de différence entre les voiries d'étude (soit la portion innovante ou de référence) et témoin. Un test statistique sur ces deux profils permet d'isoler l'impact de l'arrosage avec un seuil de significativité fixé à 95%.

Les campagnes d'arrosage conduites durant l'été 2019 montrent qu'elles tendent à réduire la température de l'air et le stress thermique subit par les piétons durant quelques heures. En

effet, rue Lecourbe à Paris, nous observons une réduction moyenne de la température de l'air de 0.4°C pour les voiries innovante et de référence par rapport à la voirie témoin. Les réductions maximales enregistrées sont respectivement de 0,8°C et 1,0°C. Concernant l'UTCI, nous obtenons une réduction moyenne de 0,4°C et de 0,5°C avec des réductions maximales respectivement de 1,9°C et de 2°C.

Concernant la partie thermique, la comparaison entre les journées arrosées et les journées non arrosées montre que l'arrosage tend à diminuer l'amplitude des températures dans la chaussée. Grâce à l'arrosage, les revêtements emmagasinent moins de chaleur que lors d'un jour sans arrosage.

Du fait que l'arrosage de la chaussée se visualise nettement sur les courbes de flux de chaleur à -5 cm de profondeur par une réduction soudaine, qui se manifeste par un pic, nous avons pu déterminer la durée de séchage des revêtements. Les résultats montrent que les revêtements innovants sèchent plus lentement que des revêtements classiques (22 min contre 19 min), ce qui nous laisse penser qu'ils retiennent mieux l'eau. L'évaporation de l'eau est donc prolongée par rapport à un revêtement traditionnel pour une même quantité d'eau aspergée. Malgré tout, l'écart observé reste peu significatif mais l'usure en surface du revêtement devrait permettre l'accès à la structure poreuse du matériau qui lui permettra de mieux retenir l'eau et ainsi de prolonger davantage la période d'évaporation. Pour compléter cette étude, les différents revêtements du projet seront testés dans une enceinte climatique dans laquelle ils seront soumis à des conditions caniculaires et où l'impact de l'arrosage pourra également être étudié (Parison *et al.*, 2020).

Enfin, afin de renforcer le test statistique et ainsi de mieux quantifier les effets de l'arrosage sur la température de l'air et sur l'UTCI, les campagnes de mesure se poursuivront lors des prochains étés. Elles permettront par ailleurs d'étudier l'effet du vieillissement des matériaux sur ces paramètres.

Bibliographie

Akbari H., Pomerantz M. and Taha H.. 2001. Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas. *Solar Energy*. Vol. 70, No. 3, 295–310.

Ashrae Standard. 2001. *ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals*.

Błazejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., and Kampmann B., 2013. An Introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica* 86(1), 5–10.

Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., and Pullin A.S., 2010. Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning*, volume 97, issue 3, 147-155.

Hendel M., Colombert M, Diab Y., and Royon L., 2015. An Analysis of Pavement Heat Flux to Optimize the Water Efficiency of a Pavement-Watering Method. *Applied Thermal Engineering*, volume 78, 658-669.

Hendel M, Gutierrez P., Colombert M., Diab Y., and Royon L., 2016. Measuring the Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris. *Urban Climate*, volume 16, 43-58.

Lemonsu A., Kounkou-Arnaud R., Desplat J., Salagnac J.-L., and Masson V., 2013. Evolution of the Parisian Urban Climate under a Global Changing Climate. *Climatic Change*, 116(3-4).

Parison S., Hendel M., Grados A., Jurski K., and Royon L., 2020. A Lab Experiment for Optimizing the Cooling Efficiency and the Watering Rate of Pavement-Watering. *Urban Climate*.

Parison S., Hendel M., and Royon L., n.d. An Updated Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques. (en révision)

Santamouris M. 2013. Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island - A Review of the Actual Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 26, 224-240.

LES EPISODES SECS PENDANT LA SAISON PLUVIEUSE AU NORD DE LA TUNISIE : VARIABILITE TEMPORELLE ET IMPACT SUR LA CEREALICULTURE

CHARFI S., FEKI M., BOUAZIZ R.

Laboratoire «SYFACTE», Université de Sfax, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Sfax, Tunisie (charfisami_geo@yahoo.fr)

Résumé : *La détection des durées uniques d'épisodes secs à partir des centiles, montre au nord de la Tunisie, une prédominance des très durées courtes inférieures à 9 jours consécutifs, et une très faible occurrence des celles très longues supérieures à 33 jours consécutifs sur la période 1970-71 et 2014-15. Cependant, les très longs épisodes secs au cœur de la saison pluvieuse (de décembre à avril) affectent considérablement la production et les rendements du blé dure, avec un coefficient de corrélation négative significative de -0.52 entre les rendements et les séquences sèches.*

Mots clés : *sécheresse ; durée unique ; céréaliculture ; Tunisie*

Summary: ***Dry episodes during the rainy season in northern Tunisia: temporal variability and impact on cereal farming.*** *Drought during the rainy season in Northern Tunisia: temporal variability and impact on cereal production: The detection of dry episodes unique durations from the percentils in the north of Tunisia showed a predominance of very short periods less than 9 consecutive days and a very low occurrence of much longer ones that exceed 33 consecutive days during 1970-1971 and 2014-2015. However, the very long dry episodes during the rainy season, from December to April, considerably affect both production and yield of durum wheat with a significant negative correlation of about 0.52 between theyields and dry seqences.*

Key words: *drought ; unique-duration ; cereals ; Tunisia*

Introduction

La majorité des simulations CORDEX suggère un réchauffement général d'ici la fin du siècle : entre +1 et +5 ° C par rapport à la période de référence 1986-2005, avec un assèchement général de 10% à 40% pour la majeure partie de la Méditerranée (Suraj *et al.* 2017). Cependant, le signal lié au changement de précipitations est moins significatif et robustes. La partie méridionale y devrait être davantage touchée puisque l'ensemble des scénarios (RCP4.5 et RCP 8.5) suggère un réchauffement et un assèchement combinés plus forts pour la Tunisie, où la variabilité des précipitations représente un sérieux problème pour la vie quotidienne de la population (IPCC, 2014), l'agriculture et les ressources en eau (Henia, 2003). Les longues séquences sèches que subit l'année agricole, entrainent une porosité des céréalicultures pratiquées principalement en mode pluvial (70% des emblavures). De ce fait, une baisse et/ou une mauvaise répartition des quantités de pluies pendant la saison agricole, affecte les phases phénologiques de la production végétale et entraine des conséquences dramatiques sur la production céréalière et les rendements (Henia, 2003).

Au nord de la Tunisie, le climat méditerranéen est de types humide, sub-humide et semi-humide, avec des pluies moyennes annuelles qui varient entre 400mm et 1500mm (Fig.1). Il est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides (Henia, 2008). La saison des pluies est concentrée sur l'hiver (43%), suivie par l'automne et le printemps (28% et 24%, respectivement). Toutefois, cette saison connait une très grande variabilité des pluies qui se transforme en périodes de sécheresse au cœur de la saison pluvieuse, marquées par une absence totale et prolongée des précipitations. La déficience des pluies y réduit considérablement l'humidité des sols et mettent en danger la céréaliculture pluviale tributaire des pluies hivernale et printanière.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la sécheresse à partir de la distribution temporelle des pluies pendant l'année agricole (de septembre à mai), en se focalisant sur les

épisodes sans pluie. Il s'agit en effet de mettre en relief les durées des jours secs successifs pendant la saison pluvieuse, puis en période de culture du blé (de décembre à mai), et d'évaluer leurs impacts sur la production céréalière dans la Tunisie septentrionale, en l'occurrence la vallée de Medjerda et la plaine de Mateur-Bizerte: grenier de la Tunisie (Fig.1).

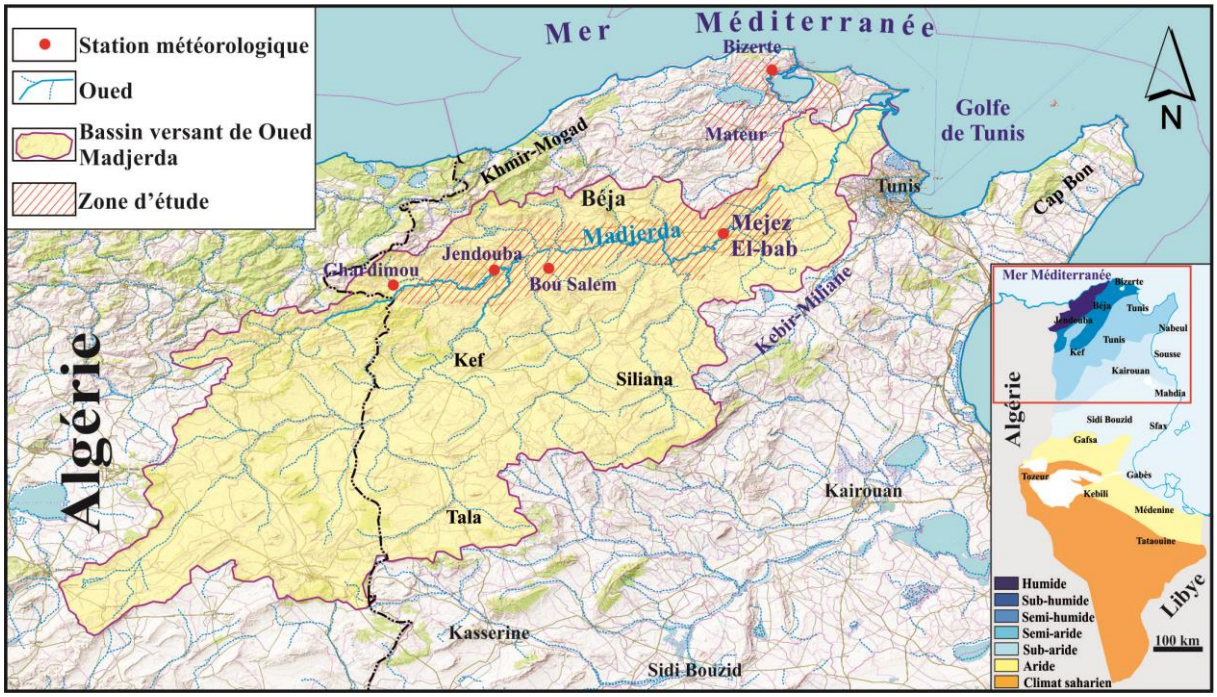


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

1. Données et méthodes

Les données utilisées dans cette étude proviennent de la Direction Générale des Ressources en Eaux (Ministère de l'Agriculture), principale gestionnaire du réseau pluviométrique en Tunisie. Il s'agit des pluies quotidiennes de cinq stations recueillies sur plus de 40 années agricoles : entre septembre et mai de 1970-1971 à 2014-2015. La production (qx) et les rendements du blé dur (qx/ha) ont été récupérés auprès du ministère de l'agriculture sur la période 1980-2015.

La démarche de détection des différentes catégories d'épisodes secs se compose de plusieurs étapes : La première consiste à détecter les jours secs dont le cumul quotidien des précipitations est inférieur au seuil de 1 mm. Ce seuil, régulièrement utilisé dans la littérature scientifique comme étant le seuil qui différencie les jours secs des jours avec précipitations (Saaroni *et al.*, 2015), est moins exposé aux erreurs de mesure sur les faibles pluies par les pluviomètres (Frei *et al.*, 2003), il sert souvent de référence pour dissocier les jours pluvieux des jours secs (Raymond, 2017). La deuxième étape consiste à retenir, pour chaque station, les valeurs des durées uniques des épisodes secs détectés entre les années agricoles 1970-1971 et 2014-2015, c'est-à-dire les longueurs uniques des séquences sèches quelles que soient leurs fréquences (1, 2,3 etc.). Des centiles sont ensuite calculés pour créer une typologie des différents épisodes secs comme le montre le Tableau suivant :

Tableau 1. Typologie des différents épisodes secs en Tunisie

Centile	Inférieur à < 20	Entre 20 et 40	Entre 40 et 60	Entre 60 et 80	Supérieur à >80
Épisodes secs	Très courts	Courts	Moyens	Longs	Très longs

Ces centiles sont calculés à partir des durées uniques des épisodes secs, et non à partir de la distribution des durées de tous les épisodes secs détectés. Cela permet réellement de déterminer les durées exactes des épisodes secs et d'éviter un biais statistique de la typologie où les épisodes secs les plus courts représentent la grande majorité de l'effectif total des épisodes secs détectés (Fig.2). Le centile 60 est ensuite calculé à partir de ces valeurs pour définir les épisodes secs les plus longs sur toute la période d'étude. Enfin, nous avons procédé à une série de corrélation aux différents pas de temps entre les rendements et les pluies et/ou les longs épisodes secs.

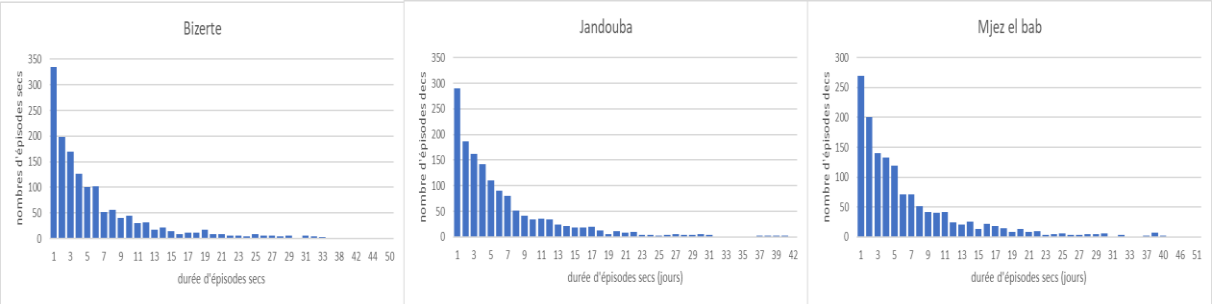


Figure 2. Durée des épisodes secs dans le grenier de la Tunisie (plaine de Bizerte ; moyenne vallée de Mejerda(Jandouba et Mjez el bab) de 1970-71 à 2014-15.

2. Résultats

2.1. Concentration des pluies pendant la saison pluvieuse

La figure 3 montre une certaine homogénéité de la distribution des cumuls des pluies décadaires dans la principale région céréalière de la Tunisie, avec une prédominance des totaux inférieurs à 11mm qui s'intercalent entre les saisons. Ces faibles totaux s'observent principalement au début et à la fin de la saison pluvieuse (septembre- octobre et avril-mai, respectivement). Les cumuls supérieurs à 12mm sont toujours dispersés et interrompus par les faibles pluies (> 11mm) entre septembre et mai. La répartition des ratios de pluies par décade (totaux/nombre de jours) met l'accent sur l'hégémonie des faibles quantités de pluies (< 20mm) durant l'année agricole, notamment entre novembre et mars, et que les quantités les plus importantes (> 20mm) sont marginales et ne se succèdent pas. Ce qui représente une véritable menace pour la céréaliculture pluviale. La comparaison des ratios pluviométriques avec les cumuls décadaires montre une légère hausse des épisodes de pluies forts et courts dans le temps, et donc d'autres plus secs, lié probablement à la surchauffe de la méditerranée et l'étalement de la saison chaude.

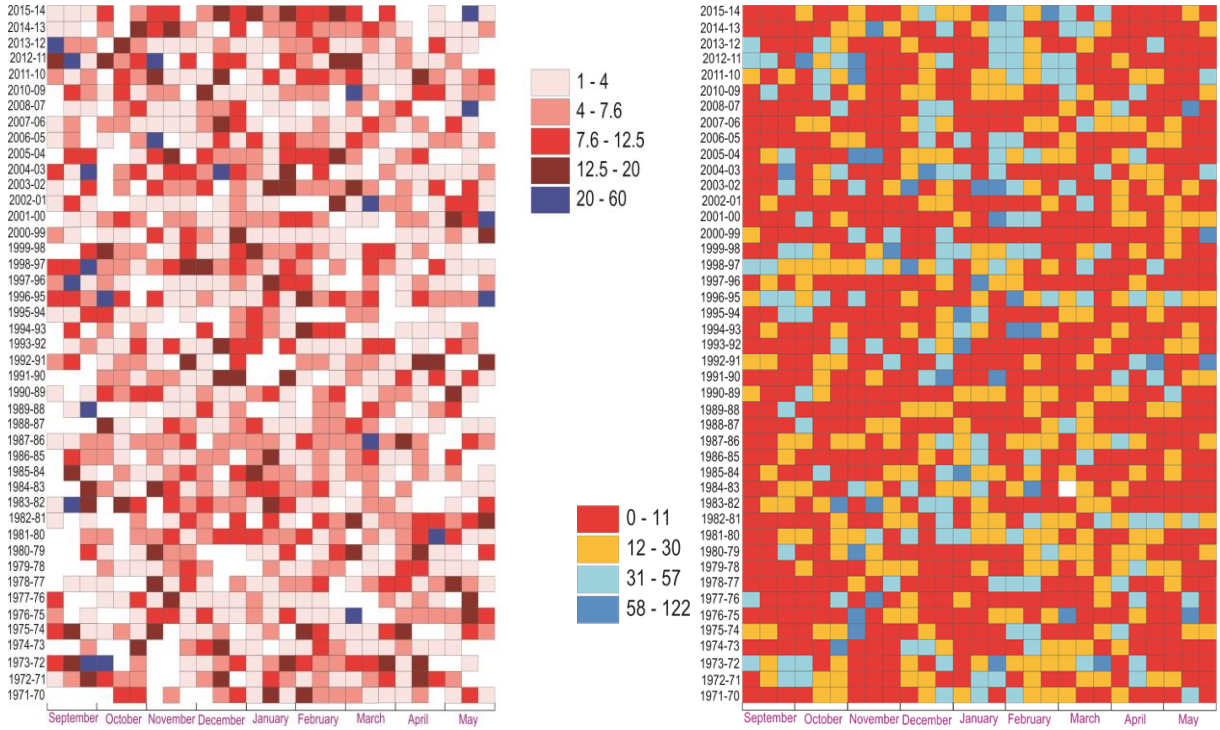


Figure 3. Ratios pluviométriques de la station de Jendouba (totaux/ nombres de jours de pluies par décade ; (à gauche) et cumuls pluviométriques décadaires (à droite) entre 1970-71 et 2014-15 (réalisée par Salem Dahech)

2.2. Typologie des épisodes secs

Les valeurs des quatre centiles calculés sur les durées uniques des épisodes secs au cours de la période 1970-71/2014-2015, ont servi pour la détection des différents types d'épisodes secs. Elles reflètent une typologie homogène de la sécheresse dans la zone d'étude, avec une durée de 1 à 9 jours consécutifs pour les très courts épisodes secs, de 10 à 17 jours pour les courts épisodes et entre 18 et 25 jours pour ceux moyens ; les longs épisodes secs durent entre 26et 33 jours consécutifs et les très longs sont supérieurs à 33 jours consécutifs. Ces derniers atteignent et/ou dépassent 50 jours consécutifs dans toutes les stations sauf celle de Jendouba.

Ainsi, les centiles montrent que les très courts épisodes secs représentent la grande majorité des épisodes secs détectés (78% en moyenne). Ils sont les plus nombreux en termes de récurrence, mais les moins affectants, car lorsqu'ils se produisent, ne dépassent pas 9 jours secs consécutifs. Les courts épisodes secs y sont les deuxièmes types d'épisodes les plus fréquents (14% en moyenne), et ceux moyens sont le troisième type (5% en moyenne). Les autres épisodes (longs et très longs) sont les moins récurrents (2% et 1%, respectivement). D'une durée minimale de 35 jours consécutifs (en moyenne), les très longs épisodes secs, lorsqu'ils se produisent, augmentent la pression sur les ressources en eau et affectent la production céréalière. Cependant, les longs et très longs épisodes secs ne présentent aucune tendance (Fig.4).

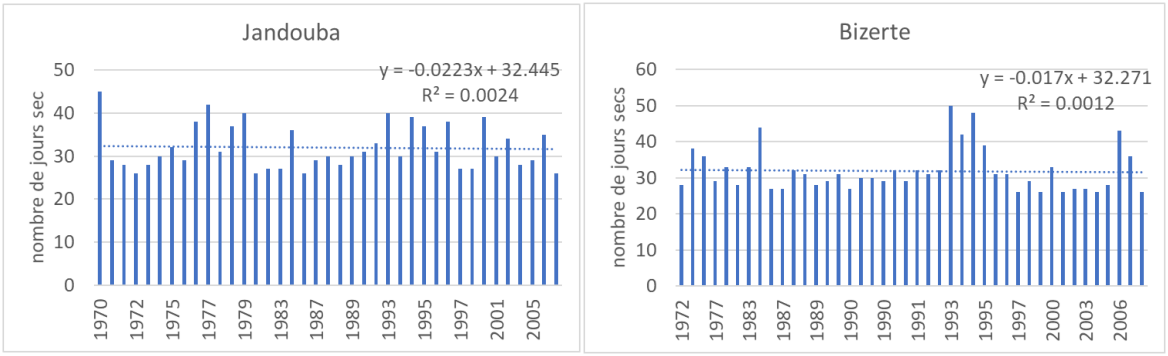


Figure 4. Tendance des longs et très longs épisodes secs dans les stations de Jendouba et Bizerte

2.3. Impact des épisodes secs sur la céréaliculture

La figure 5 montre une évolution parallèle entre les pluies annuelles (de septembre à mai) et la production du blé dur à Jendouba sur la période1980-2015, avec des quantités importantes durant les années humides et une baisse de la production pendant les années sèches. Le rendement du blé dur est fortement corrélé aux quantités de pluie (r 0.76). En conséquence, la variabilité des pluies explique plus de 50% de la variation de la production et des rendements céréaliers. Les longs épisodes secs (supérieur au centile 60), moins récurrents (3%), s'accompagnent d'une baisse considérable des rendements. Ceci est confirmé par un coefficient de corrélation négative et significative de -0.51.

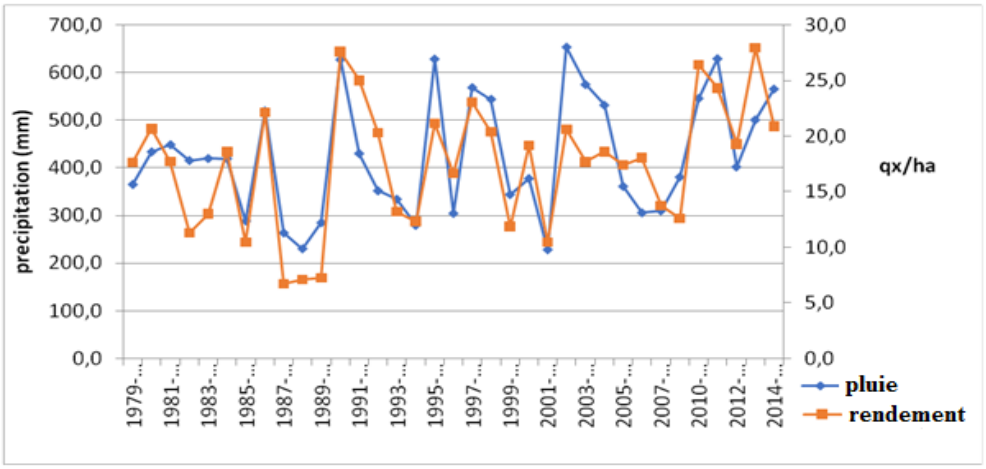


Figure 5. Evolution des rendements du blé dure en fonction des pluies (de septembre à mai) entre 1970-75 et 2014-15 dans le gouvernorat de Jandouba

Pour mieux cerner l'impact des longues épisodes sèches sur les rendements de blé dur, nous avons procédé à une série de corrélations entre les séquences sèches par saison et les rendements, de 1980 à 2015. Le résultat montre des coefficients de corrélation négatifs et statistiquement significatifs (-0.52) uniquement en hiver (de décembre à février), c'est-à-dire, au cœur de la saison pluvieuse. De ce fait, l'étalement des séquences sèches pendant cette période s'accompagne d'une baisse considérable des rendements. Ceci est confirmée par une régression multiple pas à pas appliquée entre les pluies décadaires (de novembre à mai) et les rendements du blé dur (R 0.8), qui montre que 65% des rendements dépondent essentiellement des cumuls pluviométriques tombés pendant quatre décades synchronisées avec des phases clés dans la phénologie des céréales : 3[ème] décade de décembre et de janvier c'est-à-dire la phase de semis-levée-tallage, 2[ème] décade de mars ou phase de montaison et la 2[ème] décade d'avril qui coïncident avec la phase d'épiaison et de remplissage des grains.

Conclusion

Les centiles calculés sur les durées uniques des épisodes secs détectés pour la période1970-2015, a permis de dissocier les épisodes secs les plus longs, qui sont les plus rares, des autres épisodes secs, moins rares, moins longs et donc moins affectants. Les longs épisodes secs ont un impact incontestable sur la production céréalière en Tunisie septentrionale. Bien que ces épisodes ne montrent aucune tendance significative, leurs accentuations pourraient affecter considérablement la production céréalière dont les rendements sont tributaires des totaux de pluie tombés fin décembre, fin janvier, mi-mars et mi-avril. Des accidents pluviométriques durant ces décades pourraient affectés la production.

Bibliographie

Frei C., Christensen J.H., Déqué M., Jacob D., Jones R.G., Vidale P.L., 2003. Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps. *J. Geophy. Res.*, 108(D3), 24-41.

Hénia L., 2003. Les grandes sécheresses en Tunisie au cours de la dernière période séculaire. In : *Eau et environnement : Tunisie et milieux méditerranéens* [en ligne]. Lyon, ENS Éditions, 25-36. URL : http://books.openedition.org/enseditions/863> ; Doi: https://doi.org/10.4000/books.enseditions.863.

Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., 2018. Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage. URL: http://journals.openedition.org/cybergeo/29156 ; Doi: https://doi.org/10.4000/cybergeo.29156.

Saaroni H., Ziv B., Lempert J., Gazit Y., Morin E., 2015. Prolonged dry spells in the Levant region: climatologic-synoptic analysis. *Int. J. Climatol.*, n°35, 2223-2236.

Polade S.-D., Gershunov A., Cayan D.-R, Dettinger M.-D, Piercel D.-W., 2017. Precipitation in a warming world: Assessing projected hydro-climate changes in California and other Mediterranean climate regions. *Scientific repport*, (1):10783, 10p. Doi: 10.1038/s41598-017-11285-y.

Webographie

www.ipcc.ch, 2014, consulté le 01 mars 2020.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VITICULTURE EN BRETAGNE : ÉMERGENCE OU RENAISSANCE D'UN VIGNOBLE ? UNE ANALYSE HISTORIQUE

CHARMONT C[1]., BONNARDOT V.[2], CAPDEVILA L.[3]

1 Département d'Histoire, Université Rennes 2, Rennes, France (clem-c56@hotmail.fr)
2 LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, Rennes, France (valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr)
3 ARENES, UMR 6051, Université Rennes 2, Rennes, France (luc.capdevila@univ-rennes2.fr)

Résumé *: Le vignoble breton a disparu au XXème siècle des conséquences de la crise phylloxérique pour réapparaître au début XXIème siècle sous l'impulsion de particuliers et d'associations passionnés d'œnologie. Depuis peu, des professionnels s'installent en Bretagne dans le but de commercialiser des vins bretons. Le processus de renaissance dans lequel ce vignoble grandit est étudié à travers le discours de quelques acteurs de la culture de la vigne en Bretagne et la méthode d'histoire régressive. Si l'histoire viticole de cet espace de marge de la viticulture française est majoritairement mise en avant par les acteurs interrogés pour expliquer le processus de renaissance, celui-ci s'inscrit dans un contexte de changement climatique avec des acteurs conscients que la hausse des températures permet d'améliorer la qualité de leur production. Cet article cible particulièrement le vignoble en Val de Rance en support d'une excursion lors de ce colloque.*

Mots clés *: renaissance ; vignoble ; Bretagne ; histoire régressive ; tradition ; changement climatique*

Summary*: **Climate change and viticulture in Brittany: emergence or renaissance of a vineyard? An historical analysis.** Vineyards in Brittany disappeared in the 20th century as a result of the phylloxera crisis and reappeared at the beginning of the 21st century under the impulse of individuals and associations of wine-lovers. Recently, professionals have been settling in Brittany with the aim of marketing wines. The process of renaissance in which this vineyard is extending is studied through the discourse of viticultural-related actors in Brittany and the regressive history method. If these actors mainly evoke the viticultural history to justify the process of rebirth in this marginal area of French viticulture, they also admit that climate change, and more specifically temperature increase, is beneficial for improving the quality of their production. This article particularly targets the vineyards in the Rance Valley in support of an excursion during this conference.*

Key words*: renaissance; vineyard; Brittany; regressive history; tradition; climate change*

Introduction

Des études réalisées avec les projections climatiques montrent que la Bretagne figure parmi les nouvelles régions potentielles pour la viticulture (Malheiro *et al.*, 2010 ; Hannah *et al.*, 2013). Si cela entraîne le plus souvent des interrogations sur la capacité et les besoins de la région à développer cette nouvelle culture, certains locaux aiment à rappeler que des vignes étaient cultivées en Bretagne avant la crise phylloxérique ; essentiellement en Ille-et-Vilaine et dans le Morbihan et à des fins de production vivrière (Saindrenan, 2011).

En effet, l'apparition du phylloxéra au début du XXème siècle dans cette région « extrême » (Dion, 1959) de viticulture en France a entraîné la disparition du vignoble breton. Celui-ci réapparaît depuis la fin du XXème siècle et le début du XXIème siècle sous l'impulsion d'acteurs non professionnels de la viticulture passionnés d'œnologie et, depuis l'assouplissement de la loi européenne en 2016 (Ministère de l'Agriculture, 2016), avec l'installation de vignobles commerciaux. Les acteurs admettent par ailleurs que le contexte de changement climatique et particulièrement la hausse des températures depuis les années 1990 sera bénéfique à l'amélioration de leur production (Bonnardot & Quénol, 2020).

L'enjeu ici est de voir si ce vignoble « de marge » peut ancrer une/son identité historique pour prouver l'utilisation du terme « renaissance » (Chapuis, 2016). Cet article cible particulièrement le vignoble en Val de Rance en support d'une excursion lors du colloque de l'Association Internationale de Climatologie qui se tiendra à Rennes en juillet 2020.

1. Données et Méthodes

Des données issues d'enquêtes de terrain et la méthode d'histoire régressive ont été utilisées pour étudier le processus de renaissance de la vigne en Bretagne.

1.1. Enquête de terrain auprès des acteurs de la viticulture bretonne

Cette étude repose sur un échantillon de neuf acteurs, découverts dans la presse locale (*Le Télégramme* et *Ouest-France*), internet (mots clés : « vigne Bretagne », « vignoble breton ») et le bouche-à-oreille. Les entretiens ont été réalisés sur une période d'un an, entre décembre 2017 et novembre 2018 dans le cadre d'un master de recherche en histoire (Charmont, 2019). Ils portaient sur l'histoire des parcelles, les motivations des acteurs et leurs visions de la viticulture ancienne, les pratiques viticoles, les perspectives d'avenir, le rapport à l'environnement et au réchauffement climatique. L'échantillon d'acteurs qui sert de base à l'analyse se compose de 4 associations, 3 professionnels et 2 privés. Certes faible en nombre et peu représentatif de la dynamique actuelle du vignoble breton, il permet d'avoir une idée d'ensemble à un moment précis (2018), de repérer les grandes tendances du processus actuel qui ne cesse d'évoluer et de mettre en place une méthodologie d'enquête de terrain vouée à se développer et s'affiner.

1.2. Méthode de l'histoire régressive appliquée à la Bretagne

L'histoire régressive est une méthode de recherche impliquant de partir du présent pour remonter dans le passé à l'aide de sources diverses permettant la comparaison d'époques différentes (Wachtel, 1971). Appliqué au cas du vignoble breton, elle permet de comparer plusieurs états d'un objet (parcelle de vigne) à différentes périodes, en partant de la plus récente (enquêtes de terrain) vers la plus ancienne (sources diverses), et en repérant un point de rupture dans l'histoire viticole régionale (la crise phylloxérique). Le postulat tient au fait qu'une situation tardive (la culture actuelle de la vigne en Bretagne) conserve des traces interpénétrables des dynamiques passées. Cette utilisation volontairement anachronique des sources d'époques différentes suppose une filiation : ici c'est l'évocation de l'histoire viticole bretonne par les acteurs interrogés et la présence de culture de la vigne avant et après la crise phylloxérique dans cet espace de marge.

Les sources utilisées dans l'application de cette méthode sont diverses et nécessitent un croisement pour être pertinentes. Les traces anciennes de vignes en Bretagne sont plus évidentes dans les départements historiquement viticoles : Morbihan, Ille-et-Vilaine et Loire-Atlantique (qui n'a pas fait partie du périmètre de l'étude) que dans le Finistère et les Côtes d'Armor. Ainsi, il est possible de hiérarchiser les sources.

Le fonds principal est le cadastre napoléonien. Outil de l'utilisation des sols à une époque donnée, c'est un cadastre parcellaire instauré en 1807. Il permet de fournir des indications sur la toponymie et les cultures présentes sur le territoire national au XIX^{ème} siècle. Cependant, la Bretagne est aussi une terre à culture de pommiers et les vergers y sont nombreux. Or verger et vigne commencent par la lettre « *v* ». Parfois, le géomètre n'ayant pas distingué les deux types de culture (« *Ver* », « *V^{er}* », « *ver* » pour les vergers), il est nécessaire de croiser les sources. Parfois, également, le cadastre napoléonien ne mentionne pas les types de cultures, les cartes de Cassini permettent alors de combler ce manque. Levées entre 1750 et 1791, elles représentent la première grande entreprise de cartographie couvrant l'ensemble du territoire français. Sur ces cartes sont mentionnées les cultures de vigne au XVIII^{ème} siècle ; elles se présentent donc comme une alternative aux cadastres napoléoniens.

Ensuite, les toponymes dans les communes des acteurs enquêtés ont été étudiés afin de répertorier les mentions viticoles et d'émettre des hypothèses sur d'anciennes présences de

vignes. La presse ancienne locale fait parfois également mention de présences de vigne. Enfin, on repère plusieurs pieds de vigne à l'état sauvage en Bretagne.

2. Résultats

Les quelques acteurs du vignoble breton interrogés ont permis une première récolte d'informations sur les motivations qui ont poussé à la renaissance du vignoble. C'est l'histoire et le passé viticole de la région qui ont accompagné ce renouveau, avec d'autres facteurs propres à chacun.

2.1. Les acteurs et les motivations dans le processus de renaissance

2.1.1. Les acteurs du vignoble breton, une renaissance par étapes ?

Il y a trois types d'acteurs au sein du vignoble breton : les particuliers (vignes privées), les associations (vignes associatives) et les professionnels (vignes commerciales). Les privés et les associations ont joué un rôle crucial au début du processus de renaissance du vignoble breton en impulsant les premières (re)plantations et productions, dans un cadre de loisir. Tous ces projets viticoles, de petites superficies et donnant lieu à de petites productions vitivinicoles, fructifiaient dans un cadre non légal. Ce n'est que depuis le 1er janvier 2016, avec la nouvelle législation européenne sur l'assouplissement des droits de plantation des vignes françaises (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016), que ces projets viticoles ont pu se développer dans la légalité.

En France, un vignoble est considéré comme tel à partir du moment où il y a une commercialisation des vins produits. Le fait que la renaissance du vignoble breton soit liée à des privés/associations peut faire débat. Il y aurait alors, pour faire consensus, une renaissance par étapes. Elle commencerait par l'apparition de vignes privées/associatives (lesquelles, pour la plupart, sont fédérées par l'Association pour la Reconnaissance - ex Renaissance- du Vin Breton), signe qu'il est possible de produire du vin en Bretagne (mais avec quelle qualité cependant ?). Ensuite, l'ouverture de la législation rend légal les nouvelles installations de vignes commerciales et les productions associées. À partir de ce moment-là, des agriculteurs professionnels commencent l'exploitation du terroir viticole breton pour vivre, entre autres, de la viticulture. Ainsi, l'aboutissement de ce processus de renaissance dépend maintenant des vignes commerciales. C'est par la commercialisation du premier vin breton (mise à part celui du pays nantais déjà commercialisé en Bretagne historique) que le vignoble pourrait gagner en visibilité/légitimité et prétendre être/devenir un vignoble incorporé au vignoble national.

Les néo-viticulteurs bretons s'appuient sur l'expertise et les conseils de professionnels de la vigne et du vin des régions voisines. Par ailleurs, si les études environnementales (climatiques et pédologiques) se multiplient aux échelles locales à la demande de professionnels en vue de l'installation de vignobles commerciaux, les recherches sur l'histoire viticole du terroir breton sont également indispensables pour les ancrer dans l'identité régionale.

2.1.2. Les motivations à la renaissance de la culture de la vigne en Bretagne : une histoire viticole mise en avant ?

L'analyse du discours des acteurs permet de constater une cohérence des réflexions et actions autour de l'histoire viticole bretonne et française : en premier lieu les motivations à la renaissance de la culture de la vigne dans un espace de marge viticole et deuxièmement les différentes représentations de la viticulture ancienne.

Demander les motivations de plantation des vignes bretonnes aux acteurs concernés permet d'observer quel(s) a/ont été le/les premier(s) facteur(s) de la renaissance contemporaine de la culture de la vigne en Bretagne. À la question « *quelles sont les motivations liées à la création*

de votre vigne ? », six types de raisons ont été formulées (traditionnelle, économique, personnelle, environnementale, sociale, législative) selon les trois types d'acteurs (professionnel, associatif et privé) : la thématique du renouveau de la tradition viticole arrive en tête ; suivie de celle d'un désir de vivre de la viticulture ou d'une agriculture variée incluant une part de viticulture (concernant seulement les vignes commerciales) ; et enfin l'amour du vin.

La motivation la plus mentionnée dans les entretiens et qui peut être interprétée comme le moteur de la renaissance actuelle est donc celle de la « tradition », du maintien du patrimoine. Elle est un des ressorts du développement des activités viticoles. Elle se traduit par la prise en compte du passé viticole de la commune. Sa mise en avant dépend :
de recherches dans les archives sur l'histoire viticole de la commune où se trouve la parcelle cultivée aujourd'hui ;
de la connaissance de la toponymie viticole de la commune avec la renaissance viticole actuelle ;
du repérage, de l'entretien et de l'analyse d'anciens cépages sur les parcelles viticoles actuelles.
Mettre ainsi la tradition au cœur du renouveau viticole permet de donner une assise historique aux projets en leur offrant une légitimité historique.

Par ailleurs, lorsque la question « *quelle est votre représentation de la viticulture ancienne ?* » est posée, les acteurs interrogés font souvent un lien avec ce qu'ils imaginent être l'ancienne agriculture/viticulture et leurs pratiques culturales actuelles. Ce rapport au passé dépend essentiellement de :
la vision de la paysannerie par les acteurs interrogés, ce qui rejoint l'idée actuelle de polyculture chez les professionnels ;
l'agriculture biodynamique qui est utilisée chez plusieurs enquêtés pour construire ce lien passé/présent des pratiques culturales viticoles ;
la production vivrière, répondre à ses besoins par ses propres moyens (produire son vin).

Ainsi l'histoire a une place importante pour les acteurs non professionnels. D'ailleurs, une phrase est récurrente dans leur discours : « *avant il y avait de la vigne ici/en Bretagne* ». Interroger le passé viticole d'un lieu c'est lui donner une assise historique via les sources archivistiques. Les anciens et les nouveaux emplacements viticoles en Bretagne sont ainsi comparés afin de vérifier s'il existe des emplacements historiques de vigne.

2.2. Sur les traces historiques du vignoble : exemple en Val de Rance

En mettant en relation les vignes renaissantes et les traces de vignes anciennes, le but est de comprendre s'il y a ou non correspondance entre des parcelles viticoles selon les époques dans le Val de Rance. La démarche consiste à rechercher sur les 2 communes viticoles actuelles du Val de Rance (Saint-Suliac et Saint-Jouan-des-Guérets) ou dans les communes limitrophes des traces anciennes de vignes et à analyser si les emplacements actuels coïncident à un moment pré-phylloxérique (Fig.1). Ainsi à Saint-Suliac, la présence ancienne de vigne est repérée non loin de la localisation actuelle des parcelles viticoles entretenues par une association depuis 2003 (Fig.1). Les plans cadastraux permettent d'observer que les anciennes cultures de vignes au XIX^{ème} siècle se localisaient vers le Bourg de Saint-Suliac (Fig.2) ; « *v* » indiquant un emplacement viticole et « *V^{er}* » un verger (Fig.2a). Les vignes actuelles donnent sur les bords de la Rance, en raison de la disponibilité foncière pour la replantation, mais les deux localisations sont assez proches (Fig.1). À Saint-Jouan-des-Guérets, le vignoble commercial de 2 ha planté en 2019 n'est pas très éloigné des emplacements viticoles anciens du Val de Rance si l'on part de l'hypothèse que les « *v* » présents sur le cadastre napoléonien sont bien représentatifs d'anciennes cultures de vignes (Fig.3). Dans ce cas, ces dernières sont situées aux limites extérieures de la commune (Fig.3) ou dans les communes limitrophes (Fig.1).

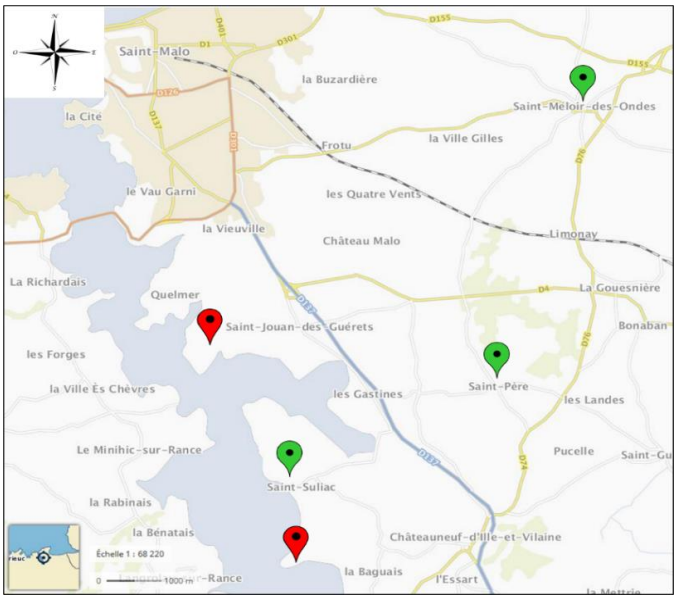


Figure 1. Localisation des emplacements actuels (en rouge) et anciens (en vert) de vignes sur les communes de Saint-Suliac et Saint-Jouan-des-Guérets ou à proximité (Source : Géoportail, Plan IGN, 2020)

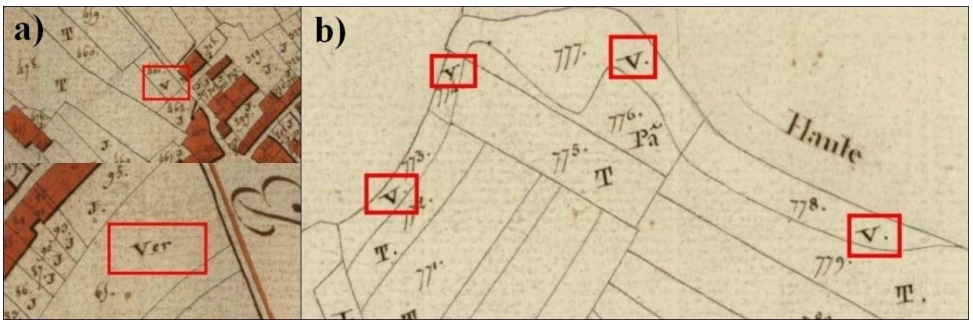


Figure 2. Extraits de cadastres napoléoniens (Source : Archives départementales du Morbihan et d'Ille-et-Vilaine). a) identification d'une vigne « *V* » et d'un verger « *Ver* », extrait G section A1 du Bourg de Saint-Suliac (1808, échelle 1/2500) ; b) identification de vignes « *V* », extrait G section A2 du Bourg de Saint-Suliac (1808, échelle 1/2500)

Figure 3. Identification de vignes « *V* » sur un extrait du cadastre napoléonien de Saint-Jouan-des-Guérets (source : Archives Départementales d'Ille-et-Vilaine), 3P5509 Section B2 de Launay Guinard, parcelles 456 à 761 (1834, échelle 1/2500)

Par ailleurs, de nombreux toponymes rappelant la présence de la vigne existent en Val de Rance (Saindrenan, 2011). Ainsi, pour les seules communes de Saint-Jouan-des-Guérets et de Saint-Suliac, on répertorie un total de 90 parcelles représentant une superficie de 22 ha avec des noms évoquant la vigne : 5 parcelles (9 ha) à Saint-Jouan-des-Guérets (« *la Vigne* », « *le Champ de la Vigne* »…) et 85 parcelles (13 ha) à Saint-Suliac (« *la Petite Vigne* », « *les Vignes Blanches* »….). On ne sait pas cependant si les parcelles étaient entièrement ou partiellement occupées par des vignes.

Enfin, sur ces deux communes poussent également des pieds de vigne sauvage : un aux

limites de la parcelle actuelle de vigne à Saint-Jouan-des-Guérets et un autre proche des vignes associatives du Mont Garo à Saint-Suliac, laissant envisager l'existence d'une culture ancienne de vigne sur les mêmes emplacements. Il y a encore quelques dizaines d'années, le cépage retrouvé à Saint-Suliac était inconnu. Il correspond à un cépage retrouvé également en Saintonge dans les Charentes, appelé depuis la « *Madeleine Noire des Charentes* ». Sa présence en Ille-et-Vilaine est inexpliquée à ce jour (Saindrenan, 2011).

Conclusion

Si l'émergence d'un « nouveau » vignoble en Bretagne est d'actualité dans le contexte du changement climatique, la méthode d'histoire régressive et l'analyse des sources anciennes sur les quelques points d'étude présentés s'avèrent être d'une grande valeur pour étudier la dynamique du « renouveau » du vignoble breton. Ce travail de géographie historique et l'application de la méthode d'histoire régressive sont envisagés pour toute la région Bretagne pour tenter d'évaluer la dynamique du vignoble breton. Se posera alors la question du périmètre d'étude, le vignoble historique breton étant composé en plus du département de la Loire-Atlantique. L'obtention d'une appellation viticole qui incorporerait pleinement le vignoble breton dans le vignoble français impliquerait de dépasser les tracés administratifs actuels.

Bibliographie

Bonnardot V. et Quenol H., 2020. Changement climatique et viticulture en Bretagne : la vigne sous observation climatique. *Actes du 33ème colloque de l'AIC*, Rennes, Juillet 2020.

Chapuis R., 2016. *La renaissance d'anciens vignobles français disparus*. l'Harmattan, Paris, 300p.

Charmont C., 2019. *Entre invention et réinvention, la renaissance du vignoble breton à travers le changement climatique et la tradition*. Mémoire de Master d'Histoire sous la direction de Capdevila L. et Bonnardot V., Université Rennes 2, 340p.

Dion R., 1959. *Histoire de la vigne et du vin en France. Des origines au XIXème siècle*. Flammarion, Paris, 768p.

Hannah L., Roehrdanz P., Ikegami M., Shepard A., Shaw R., Tabor G., Zhi L., Marquet P. & Hijmans R., 2013. Climate change, wine and conservation. *PNAS*, 110 (17), 6907-6912.

Malheiro A.C., Santos J.A., Fraga H, Pinto J.G., 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Clim Res* (43), 163-177.

Merot P., Dubreuil V., Delahaye D. & Desnos P. (dir.), 2013. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions*. PUR, coll « Espaces et Territoires », Rennes, 464p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016. Autorisations de plantation de vignes – le nouveau dispositif européen. *gouv.fr*. [en ligne], consulté le 16 janvier 2019. URL : http://mesdemarches.agriculture.gouv.fr/demarches/exploitation-agricole/obtenir-un-droit-une-autorisation/article/autorisations-de-plantation-de

Saindrenan G., 2011. *La vigne et le vin en Bretagne*. Coop Breizh, Spezet, 574p.

Wachtel N., 1971. *La vision des vaincus. Les indiens du Pérou devant la Conquête espagnole (1530-1570)*, Gallimard, Paris, 400p.

CARACTERISATION DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN AU MOYEN DE MESURES FIXES ET MOBILES DANS L'AGGLOMERATION DE KAIROUAN (TUNISIE)

CHEBLI M.[1,2], CHARFI S.[1], DAHECH S.[2]

1 *Laboratoire SYFACTE, Université de Sfax Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Sfax, Tunisie (cheblimohamed3@yahoo.fr)*
2 UMR PRODIG, Université de Paris Diderot, Paris, France

Résumé : *Le climat de Kairouan, une ville de la rive sud de la Méditerranée, est marqué par l'étalement de la saison chaude et une forte chaleur estivale. Sa position géographique semi-continentale accentue les paroxysmes thermiques, aggravés par le phénomène de l'Îlot de chaleur urbain (ICU) dont un record de 9,9°C a été enregistré pendant l'été 2019. Les cinq campagnes de mesures itinérantes, réalisées pendant l'été 2019, montrent que le centre-ville correspond au noyau le plus chaud. Les températures sont plus ou moins homogènes en milieu urbain avec des écarts maximaux de 2°C. La température baisse sensiblement au niveau des périmètres irrigués et des oueds qui canalisent l'air froid, permettant d'observer 2°C à 3°C de moins par rapport à leur environnement immédiat.*

Mots clés *: Kairouan ; îlot de chaleur ; mesures fixes ; mesures itinérantes*

Summary*: **Characterization of the urban heat island through fixed and mobile measurements in the agglomeration of Kairouan (Tunisia).** The climate of Kairouan, a city on the southern shore of the Mediterranean, is marked by the length of the hot season and a strong summer heat. Its semi-continental geographical position accentuates the thermal paroxysms, which is aggravated by the phenomenon of urban heat island. In this respect, a record of 9.9 ° C was registered during the summer of 2019. The five measurement surveys show that the city center is the hottest nucleis. Temperatures are more or less homogeneous in urban areas with maximum deviations of 2 ° C. Yet, temperature drop significantly in the irrigated areas and the wadis, since the latter channel cold air and bring about a loss of 2 ° C to 3 ° C compared to the immediate environment.*

Key words*: Kairouan; urban heat island; fixed measures; car survey*

Introduction

Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale (55%) se concentre dans les villes, et ce pourcentage devrait atteindre 68% en 2050 (*ONU, 2018*). Le processus d'urbanisation rapide a un effet direct sur le confort thermique urbain, surtout pendant la saison chaude. En effet, la température nocturne de l'air est plus élevée dans les espaces urbanisés par rapport au milieu environnant. Il s'agit du phénomène de l'ICU (îlot de chaleur urbain), dont les répercussions sont nocives sur la qualité de vie et entraîne une forte demande de climatisation (Dahech et Ghribi, 2017), d'eau potable et une surmortalité accrue durant les vagues de chaleur (Hendel *et al.*, 2017). Cependant, les conditions locales peuvent affecter l'intensité de l'ICU (Dubreuil *et al.,* 2008; Makido *et al.,* 2016)qui varie d'une ville à une autre en fonction de plusieurs paramètres tels que la taille et la géométrie de la ville, le site, la latitude, l'éloignement de la mer et la situation météorologique (Wonga *et al.,* 2011; Dahech, 2014).

En Tunisie, la dominance des situations radiatives en été est favorable au développement de l'ICU. Les études antérieures concernant ce phénomène s'intéressent uniquement à des villes littorales telles que Bizerte (Dahech et Charfi, 2017), Tunis (Charfi, 2012) et Sfax (Dahech, 2007). Cependant, cette étude s'intéresse à Kairouan, une ville de l'intérieur du pays, où l'effet urbain sur la température n'a jamais été vérifié. Donc, l'objectif du présent travail est de déterminer les caractéristiques de l'ilot de chaleur urbain dans l'agglomération de Kairouan en utilisant plusieurs paramètres météorologiques tels que : la température, la vitesse et la direction du vent et l'humidité relative.

1. Cadre spatial, méthodes et données

1.1. Cadre spatial

Kairouan est située à 50 km du littoral. L'emprise urbaine s'étale sur 23km^2 environ, avec une topographie plane et peu d'espaces verts. Cette ville compte plus de 200.000 habitants (INS, 2014). L'agglomération prend la forme d'un cercle de 5 km de rayon, caractérisée par un tissu urbain relativement dense dans sa partie centrale (Fig.1). La densité urbaine dépasse en moyenne 7990 hab/km^2 et frôle le double dans les secteurs populaires denses comme « EL Menchia » à l'ouest de l'agglomération.

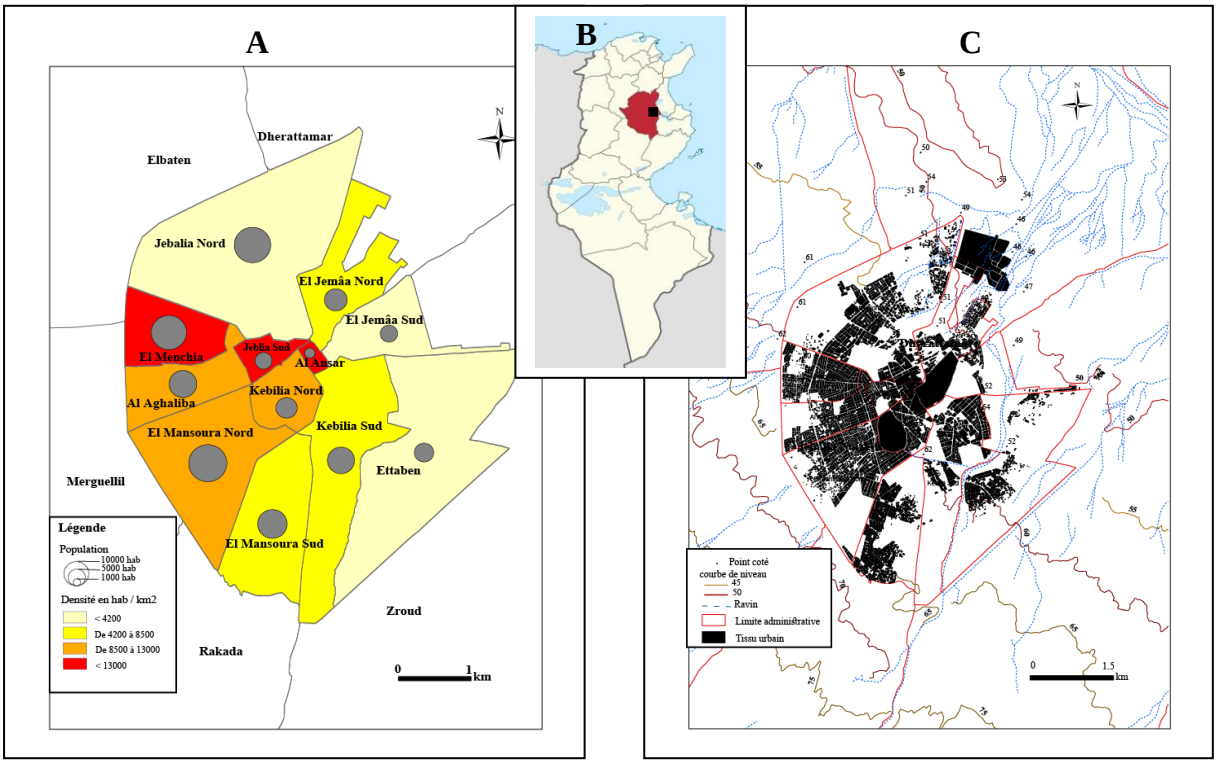


Figure 1. Population (A), localisation (B) et urbanisation (C) à Kairouan en 2014 (Source : INS 2014)

La ville de Kairouan occupe une plaine assez vaste qui appartient à la zone nord de la région naturelle des basses steppes. Cette plaine est entourée par des collines ne dépassant pas 200 m d'altitude. Elle est disséquée par un réseau hydrographique assez dense (Fig.1). Le climat est de type méditerranéen semi-aride, caractérisé par une importante variabilité pluviométrique et une forte chaleur estivale (Fig.2). Durant la période 1973-2019, la station météorologique de Kairouan a enregistré une température maximale moyenne de 26,6°C et minimale de 14,3°C. L'analyse de la tendance thermique met en évidence une augmentation significative des maxima et des minima avec des valeurs respectives de +0,5°C et +0,7°C par décennie. La moyenne de la température estivale (Juin, juillet, août) varie entre 26,7°C et 30°C, et les vents dominants soufflent des secteurs Nord, Est et Sud avec une vitesse moyenne qui varie entre 2 et 4 m/s.

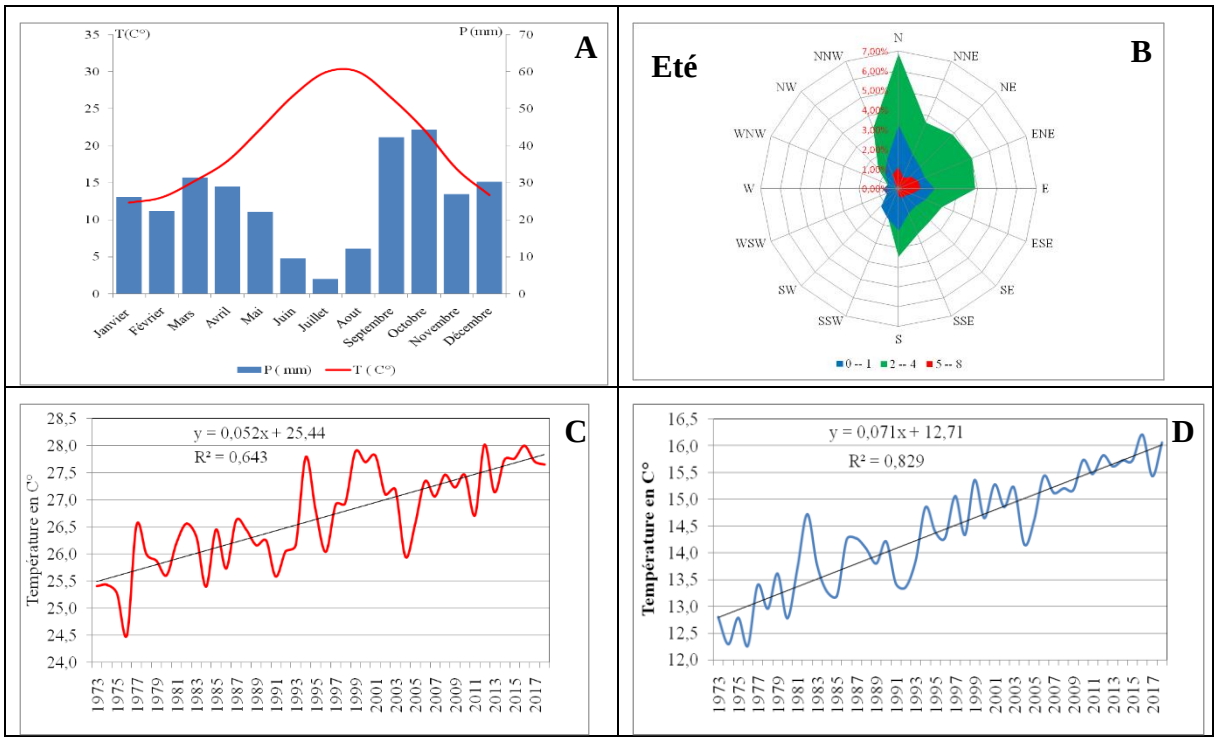


Figure 2. Diagramme ombrothermique (A), rose moyenne annuelle du vent (B), et tendance des maxima (C) et des minima moyen (D) de température à Kairouan sur la période 1973-2019 (Source : INM)

1.2. Méthodes et données

Pour aborder la question de l'ICU et sa variation spatio-temporelle dans l'agglomération de Kairouan pendant la saison estivale, une série de mesures fixes et mobiles des températures, de la vitesse et la direction de vent, de l'humidité relative et du point de rosée ont été effectuées pendant l'été 2019. Trois stations automatiques de type Davis et Campbell ont été installées dans des sites urbain, périurbain et rural (Fig.3).

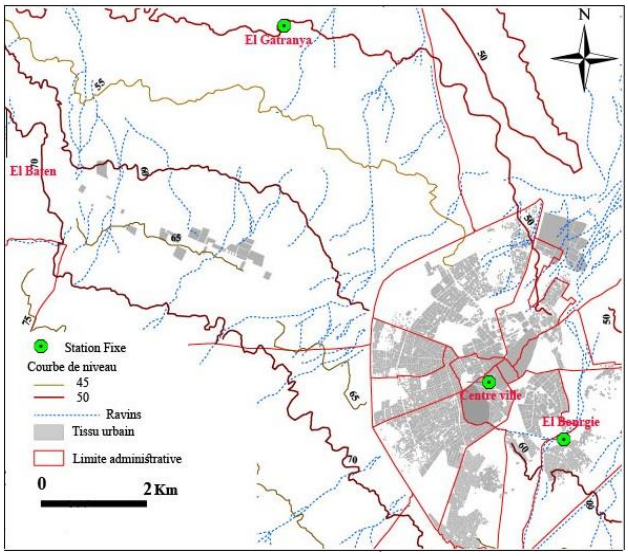


Figure 3. Localisation des stations météorologiques automatiques à Kairouan

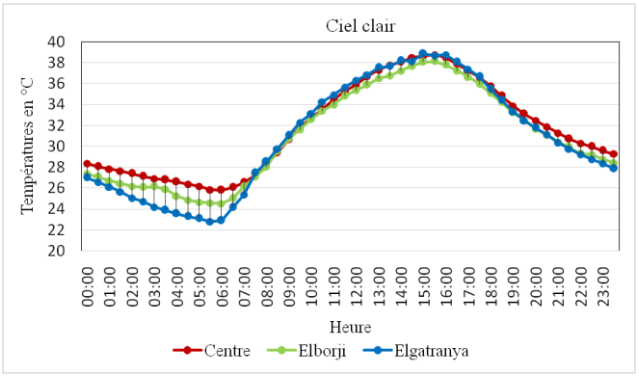
Pour augmenter la résolution spatio-temporelle des mesures, nous avons réalisé trois campagnes de mesures itinérantes nocturnes : le 10/6/2019, le 24/06/2019 et le 28/08/2019, entre 23h30 et 00h30. Le but est de mieux cerner l'organisation spatiale de l'ICU d'une part, et de mettre en évidence les facteurs responsables des variations du champ thermique nocturne d'autre part (Charabi. Y, 1997). Ces mesures mobiles ont été assurées par deux équipes avec des voitures roulant à une vitesse inférieure à 40km/heure. Les capteurs thermo-hygrométriques utilisés sont de type « Testo ».

2. Variabilité spatio-temporelle de l'ilot de chaleur urbain à Kairouan

2.1. Evolution des températures horaires en été : cas de la période du 03 au 27 août 2019

La figure 4 montre un ICU d'une faible intensité soit 2.5°C seulement toutes situations confondues. Par temps radiatifs (vent faible et nébulosité nulle), on dépasse 3,1°C en moyenne. Le surcroit thermique urbain résulte vraisemblablement de l'importance du rayonnement tellurique tout autour de la station urbaine exercé par les bâtiments pendant la nuit (Nunez et Oke, 1976). C'est pour cette raison que la station urbaine du centre-ville reste plus chaude toute la nuit. Cependant, les températures baissent davantage dans les zones rurales par refroidissement radiatif. L'intensité relativement modeste de l'ICU nocturne pourrait s'expliquer entre autres par l'emplacement des capteurs au-dessus des toits, d'où l'altération de l'effet de site qui explique en grande partie ce phénomène.

A



B

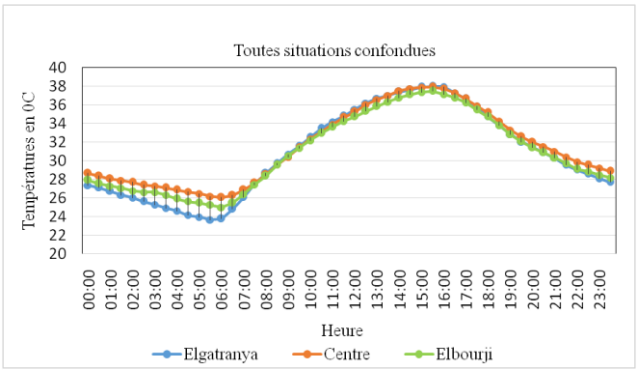


Figure 4. Evolution des températures estivales dans les stations automatiques du Centre-ville (urbaine), El bourgie (péri-urbaine) et Gatranya (rurales) du 03 au 27 août 2019 par temps radiatif (A) et toute situations confondues (B)

Le jour, l'écart est très faible ou négatif varie entre 0,3C° et -0,6°C. La ville se transforme parfois en Îlot de fraicheur : l'absence d'un surcroît thermique urbain diurne pourrait s'expliquer par la couleur blanche des toitures d'une part, et le réchauffement plus rapide en zones rurales, dominée par des sols rendzines de couleur brun rougeâtre (Barbery et Mohdi, 1987), d'autre part. L'ICU s'amenuise ou disparait par temps perturbé. En effet, le vent exerce le brassage de l'air et amenuise donc les écarts thermiques.

A l'échelle de la journée, le site de la station du centre-ville est en moyenne plus chaud que celui de la station rurale d'Elgatranya, de 0,7°C. Au début du jour, une à deux heures après le lever du soleil, les températures sont comparables dans les deux stations jusqu'au coucher du soleil. L'installation des capteurs au-dessus des toits évite l'effet d'ombre qui pourrait être exercé par les parois dans le centre-ville densément urbanisé.

Au début de la nuit, le refroidissement nocturne est plus rapide à la station rurale d'Elgatranya et moins marqué pour la station du centre-ville. Une ambiance chaude continue à régner dans le site de mesure du centre-ville expliquée par la restitution de la chaleur stockée par les bâtiments pendant le jour. En outre, la consommation de la chaleur sous forme latente est plus marquée à Elgatranya, malgré la sécheresse estivale, grâce à l'arrosage régulier, au début de la nuit, des cultures maraichères, très abondantes dans le site de mesure. Les écarts se confirment davantage en fin de nuit par refroidissement radiatif plus marqué en zone rurale. D'où, l'écart thermique qui atteint 3,5°C.

2.2. Champs thermique urbain à Kairouan : cas du 24/06/2019 à 23h30mn

La campagne de mesure nocturne du 24 juin 2019 a permis de cerner la variabilité spatiale des températures à l'échelle de l'agglomération en fonction de la morphologie urbaine et des types d'occupation du sol. Un îlot de chaleur intense a été mis en évidence avec un maximum de 9,9°C (Fig.5). Le noyau le plus chaud occupe la zone centrale densément urbanisée, avec des prolongements au nord, à l'ouest et au sud, vers les axes routiers plus denses. Jusqu'à un rayon d'environ 3 km du centre-ville, les écarts restent inférieurs à 2°C, ce qui s'explique vraisemblablement par l'homogénéité du tissu urbain dominé par les structures horizontales.

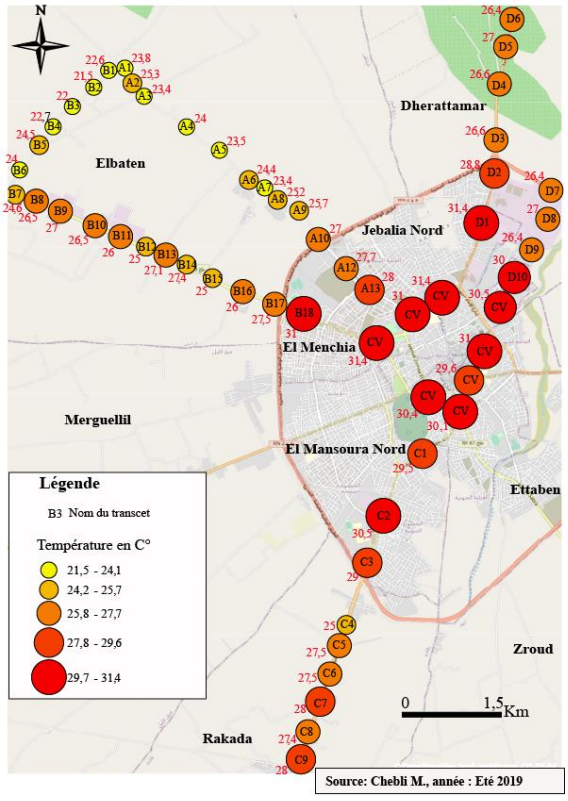


Figure. 5. Spatialisation des températures de l'air à Kairouan le 24/06/2019 à 23h30mn

Dès qu'on s'éloigne du centre-ville, le tissu urbain devient lâche et les températures baissent d'une manière parfois brutale. Vers le Nord-ouest par exemple, la température baisse de 3,5°C entre les points B17 et B18 distants de quelques centaines de mètres. Vers le nord, une baisse de 2,2°C a été observée dès qu'on s'éloigne de la zone urbaine (entre D2 et D3).

A l'extérieur de la zone urbaine, l'occupation du sol et la topographie deviennent déterminants. En effet, le passage par les périmètres irrigués d'El Gatranya à A7, A5, A3 au Nord-ouest s'accompagne par une baisse de 1,8°C par rapport à la zone peu urbanisée A8. De même, une baisse de 2,1°C a été enregistrée aux zones irriguées d'El Baten (B12, B15) par rapport à la zone industrielle B13. Cet écart atteint 2,5°C au sud entre C4 et C5. Le même effet a été exercé par le couloir d'air froid canalisé par l'oued Marguellil sur la route de Rakada au sud (C7, C8). Il s'agit des coulées froides (brise de vallée) provenant de l'intérieur du continent à une vitesse avoisinant 4 m/s.

Conclusion

Pendant les nuits estivales, l'ICU est très marqué dans l'agglomération de Kairouan : le gradient thermique ville-campagne peut atteindre dans certains cas extrêmes 7°C. Le champ thermique urbain est peu variable à cause de l'homogénéité du tissu urbain. Ici, comme partout dans le monde, les écarts thermiques ville-campagne s'expliquent par un décalage dans le régime journalier de la température, creusant davantage les écarts thermiques instantanés. A Kairouan, des différences s'accentuent par le phénomène de la brise de vallée, très fréquente

dans la région ainsi que l'étalement des périmètres irrigués, en périphérie. Ces derniers se transforment la nuit en îlots de fraicheur, et permettent de creuser davantage l'écart thermique d'au moins 2°C par rapport au centre-ville. De ce fait, l'irrigation dans les villes non côtières à été chaud pourrait être une solution pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain. La combinaison entre les facteurs indiqués ultérieurement pourrait donner naissance à des situations très inconfortables à l'échelle de l'agglomération, et amplifier, par conséquence, le besoin en énergie électrique pour la climatisation. Il est également probable que les cas de morbidité respiratoire et cardiovasculaire augmentent par temps caniculaire surtout dans les quartiers densément peuplés.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs vifs remerciements à Mohamed Fekiet et Marwen Ghribi qui ont participé aux mesures itinérantes.

Les travaux de terrains ont été financé, en partie, par le projet PHC Maghreb "Îlots de chaleur urbains dans les villes du sud de la Méditerranée : diagnostic et résilience" 39361WA.

Bibliographie

Barbery J. & Mohdi M., 1987. Carte des ressources en sols de la Tunisie. Feuille de Kairouan. Ministère de l'Agriculture, Direction des sols, Tunisie, 49p.

Charabi Y., 1997. *Etude de l'ilot de chaleur urbain de l'agglomération lilloise : mesures itinérantes de la température de l'air, analyse de la température de surface à partir des données satellitales NOAA-AVHRR*. D.E.A, Université des sciences et Technologies de Lille, 90p.

Charfi S., 2012. *Le comportement spatio-temporel de la température dans l'agglomération de Tunis.* Thèse de doctorat, Université de Tunis et Université de Nice (en cotutelle), 308p.

Dahech S. & Charfi S., 2017. Aspects topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie): Ilot de chaleur et brises thermiques. *Les Impromptus*, 138-158.

Dahech S., 2014. Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. *Cybergeo, European Journal of Geography Environnement, Nature, Paysage*, 30p.

Dahech S., 2007. *Le vent à Sfax (Tunisie), Impact sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat, Université Paris VII.

Dahech S. & Ghribi M., 2017. Réchauffement climatique en ville et ses répercussions énergétiques. *Méditerranée*, 128, 29-38.

Dubreuil V. *et al.*, 2008. Variabilité quotidienne et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain à Rennes : premiers résultats du programme ECORURB. XXIéme colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Montpellier, France, 221-227.

Hendel M. *et al.*, 2017. Behavioral adaptation to heat-related health risks in cities. *Energy and Buildings*, Vol.152, 823-829.

Makido Y. *et al.*, 2016. Daytime Variation of Urban Heat Islands: The Case Study of Doha, Qatar. *Climate*, 4, 32, 2-14.

Nunez M. et Oke T.R., 1976. The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of applied meteorology*, Vol. 16, 11-19.

ONU, 2018. *World Urbanization Prospect*. Dossier de presse.

Wonga N., Jusuf S.K. et Tan Ch.L., 2011. Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool. *Journal Landscape and Urban Planning*, 100, 386-389.

DROUGHT TRENDS AND THEIR SPATIAL VARIABILITY IN SOUTH-EASTERN ROMANIA BASED ON SPI AND SPEI ANALYSIS

CHELU A.[1,2], ZAHARIA L.[1], DUBREUIL V.[2], IOANA-TOROIMAC G.[1]

1 Faculty of Geography, University of Bucharest, Bucharest, Romania (maria.alexandra.chelu@geo.unibuc.ro)
2 LETG-COSTEL, UMR 6554 CNRS, University of Rennes 2, Rennes, France

Summary: *This study investigates the drought trends and their spatial variability over a 69-year period (1950-2018) in south-eastern Romania by using the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (for 3, 6 and 12 months). The indices are based on the E-OBS climatic datasets at 0.1º spatial resolution, and trends are calculated using the Mann-Kendall nonparametric test with the Theil-Sen method for slope estimation. The results show that there are larger areas with negative trends expressed by SPEI compared to SPI. Significant drying trends mostly appear in the Danube Delta (SPI) and at high altitudes (SPI and SPEI). Both indicators show increasing wetness trends in autumn.*

Keywords: *drought; south-eastern Romania; SPEI; SPI*

Résumé : ***Tendances et variabilité spatiale de la sécheresse au sud-est de la Roumanie sur la base de l'analyse SPI et SPEI.*** *Cette étude examine les tendances de la sécheresse et leur variabilité spatiale sur une période de 69 ans (1950-2018) dans le sud-est de la Roumanie en utilisant l'indice standardisé de précipitation (SPI) et l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI) pour des périodes de 3, 6 et 12 mois. Les indices sont basés sur les données climatiques E-OBS à une résolution spatiale de 0,1 degré et les tendances sont calculées en utilisant le test non paramétrique de Mann-Kendall avec la méthode Theil-Sen pour l'estimation de la pente. Les résultats montrent qu'il existe de plus grandes régions avec des tendances négatives exprimées par le SPEI par rapport à SPI. Les tendances significatives de sécheresse apparaissent principalement dans le delta du Danube (SPI) et à haute altitude (SPI et SPEI). Les deux indicateurs montrent des tendances à l'augmentation de l'humidité en automne.*

Mots clés : *sècheresse ; sud-est de la Roumanie, SPI ; SPEI*

Introduction

Drought poses a major threat to cropland yield and harvested areas worldwide (Lesk *et al.*, 2016). There is a large spatial variation in drought trends globally (IPCC, 2014), however increasing frequencies and intensities have been noticed in southern Europe, including the Mediterranean region and the Balkans (Spinoni, 2015). An amplification of drought event intensity is possible due to increased drying generated by higher temperatures (Trenberth, 2014), even in regions with no significant decreases of precipitation. Because trends in precipitation greatly vary in some regions, such as in Romania (Dumitrescu *et al.*, 2015), it is of interest to investigate what are the main driving factors in regions exposed to higher drought intensities. A divergence in drought likelihood and area as shown by the Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee *et al.*, 1993) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) has been noticed at European scale, with reference evapotranspiration (ET_0)-related increases in drought area, mainly caused by temperature rise (Stagge *et al.*, 2017). In Romania, drought trends have been investigated in several studies whose results showed spatial heterogeneity due to the variability of meteorological variables involved in the occurrence of this phenomenon (e.g. Cheval *et al.*, 2014; Ioniță *et al.*, 2016).

The purpose of this paper is to assess drought trends in southeastern Romania during the period 1950-2018, based on the SPI and the SPEI, for 3, 6 and 12 months. A comparison between drought trends as shown by the two indices is performed for different accumulation periods, in order to explore whether droughts are driven mainly by precipitation or by water balance deficit. In addition, SPI-12 and SPEI-12 are explored in each Köppen climate type, to identify regional differences in drought trends. The study area is one of the most important

agricultural areas in Romania and the assessment of the drought trends is of crucial interest for planning and implementing appropriate measures aiming at drought risk mitigation.

1. Study area, data and methods

1.1. Study area

The study is focalized on the southeastern part of Romania, an area extended on about 58,500 km^2 with altitudes between 0 m a.s.l. and over 2,000 m a.s.l (Fig.1). It encloses several landforms: the Carpathian Mountains (in the north-western part), the Subcarpathian and piedmont hills, and the Romanian Plain. The eastern part of the study region (bordered by the Danube River to the west and Black Sea to the east) overlaps the historical region of Dobrogea, which includes the Dobrogea Plateau and Danube Delta. Multiannual means of precipitation drop from over 1200 mm in the mountainous area to about 400 mm in Dobrogea Region. Average multiannual air temperature is less than 0^o at highest altitudes and 11-12^o C in the plain area and the Dobrogea Plateau (NMA, 2008). According to the Köppen classification, based on the climatic parameters calculated for the 1986-2010 period (Kottek *et al.*, 2006, Rubel *et al.*, 2017), there are five climate types in southeastern Romania: boreal (Dfc), humid continental, with warm summers (Dfb), warm temperate, moist, warm summers (Cfb), warm temperate, moist, hot summers (Cfa) and semi-arid (Bsk) (Fig.1).

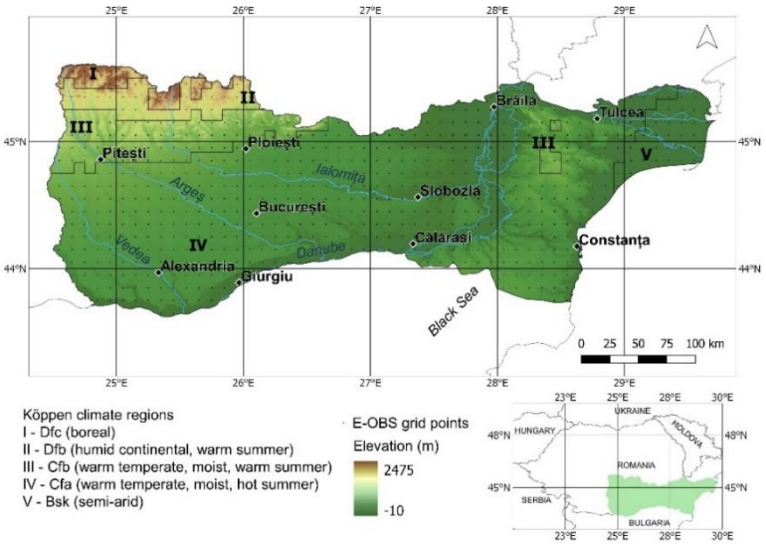


Figure 1. Study area: location and climate types according to Köppen classification

1.2. Data and methodology

The climatic data used in this study are daily precipitation, minimum and maximum temperatures from the E-OBS gridded dataset (version 20.0e), at the spatial resolution of 0.1^o. The calculation of SPI requires a time series of monthly precipitation, accumulated at 3, 6 and 12 months scales. The series at each time scale are fitted to the recommended gamma probability density function (McKee *et al.*, 1993). The cumulative probability distribution is found for each month and time scale which is then transformed to the standard normal distribution (mean of zero and standard deviation of one). The SPI value is a departure from the mean, reflecting dry or wet conditions during a particular period. The SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) uses the difference between precipitation and ET_0. It follows the same calculation procedure as the SPI, but uses the log-Logistic distribution. The SPI and SPEI have been calculated using the 'spei' package in R, in 660 grid points. ET_0 was calculated using the Hargreaves method. Trends were computed on the SPI and SPEI time series, using the Mann-

Kendall non-parametric test (Mann, 1945, Kendall, 1975), considering the significance level of 0.05. The slope of the trend was calculated using the Theil-Sen estimator (Sen, 1968). Both statistical tests were performed with the R package 'trend'. The area in moderate to extreme drought at each time step was calculated as the ratio between the number of grid cells with SPI, respectively SPEI < -1 and the total number of grid cells. To compare the extent of drought as shown by each index, the percentage difference between the drought areas as indicated by SPEI and SPI was calculated. SPI-12 and SPEI-12 values were averaged over each Köppen climate type (based on Kottek *et al.*, 2006 and Rubel *et al.*, 2017) in order to identify regional differences in drought trends.

2. Results

The results for seasonal trends of SPI-3 and SPEI-3 show that, generally, SPI has more spatially extensive upward (wetness) trends (Fig.3). In winter (December-February), there are significant dryness trends at higher altitudes (Carpathian Mountains and the Subcarpathians) and in the Danube Delta, with SPI showing larger areas of decreasing values in the Danube Delta, while SPEI shows larger decreasing areas at higher altitudes. In spring (March-May), there are only two grid points in the Danube Delta with SPI of significant decrease, and an important area with positive trend (in the eastern half of the studied region), but not statistically significant, while for SPEI there are only negative trends, but not significant. During summer (June – August), only SPI shows areas of significant trends (decreasing), in the Danube Delta. For SPI there are large areas with increasing trends, but not statistically significant, while for SPEI, in most of the region the trends are negative (except for the south-east extremity), not statistically significant. In autumn (September – November), both indices show an increase throughout the study area, with large areas of significant trends in SPI in the lowlands. SPEI shows significant upward trends mostly in Southern Dobrogea (Fig.3).

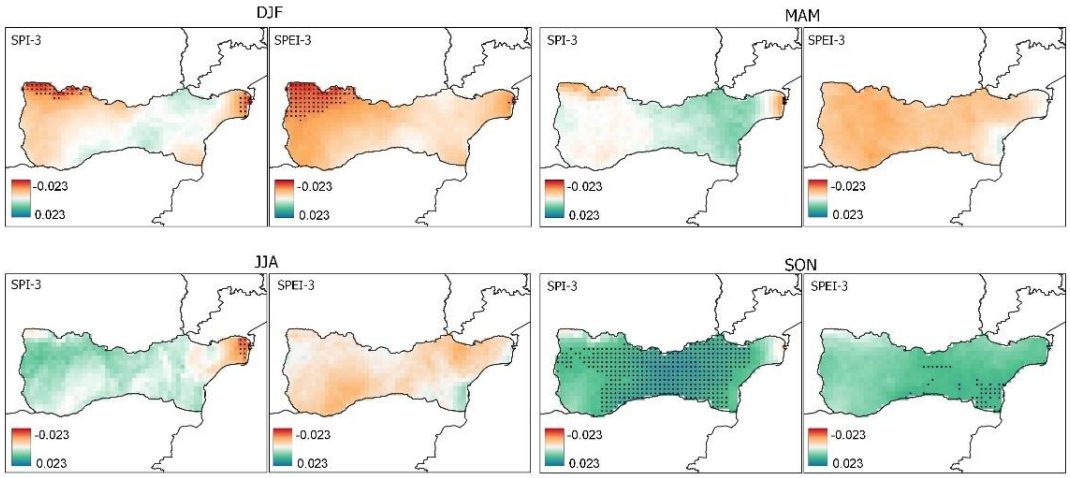


Figure 2. Seasonal Sen's slope values for trends in variability of SPI-3 and SPEI-3 in southeastern Romania: December-January-February (DJF), March-April-May (MAM), June-July-August (JJA) and September-October-November (SON). Increasing wetness trends are shown by green shades, and decreasing wetness trends by orange shades. Black dots represent statistically significant trends.

In the warm season (April to September), only SPI-6 shows significant downward trends in the Danube Delta, but for most of the study region the trends are positive, not significant, while for SPEI -6, the trends are negative, but not significant (Fig.4). In the cold season (October to March), there are significant downward trends for both SPI-6 and SPEI-6 at the highest altitudes. In the eastern part of the region, the two indices show upward trends, but only for SPI they are statistically significant, in the western part of Dobrogea and along the Danube River (Fig.4). Annual trends (SPI/SPEI-12 calculated between January-December) also show

discrepancies between the two drought indices, with SPI exposing mostly upward trends, and SPEI mostly downward trends. Significant decreasing trends are common for both indices at the highest altitudes. Significant SPI decreasing trends show up in the Danube Delta and increasing trends in southern Dobrogea and along the Danube River valley.

SPI-12 and SPEI-12 results averaged for each Köppen climate region and for southeastern Romania (Fig.4) highlight the main long-term drought episodes, with severe and extreme events happening in 1951-1952, 1959, 1974 and 1983 (mostly SPI), 1986-1987, 2001, 2004 (mostly SPI), 2007-2008, 2012 (mostly SPEI). SPI-12 averaged values for southeastern Romania show slight increasing trends, while SPEI-12 shows decreasing trends, suggesting the role of increasing temperatures; however, these trends are not statistically significant. Differences between climate regions are also emphasized: SPI-12 shows slight linear decreasing trends in Dfb, Dfc, and Bsk, and increasing in Cfa and Cfb, while SPEI-12 shows decreasing trends for all regions, but are statistically insignificant.

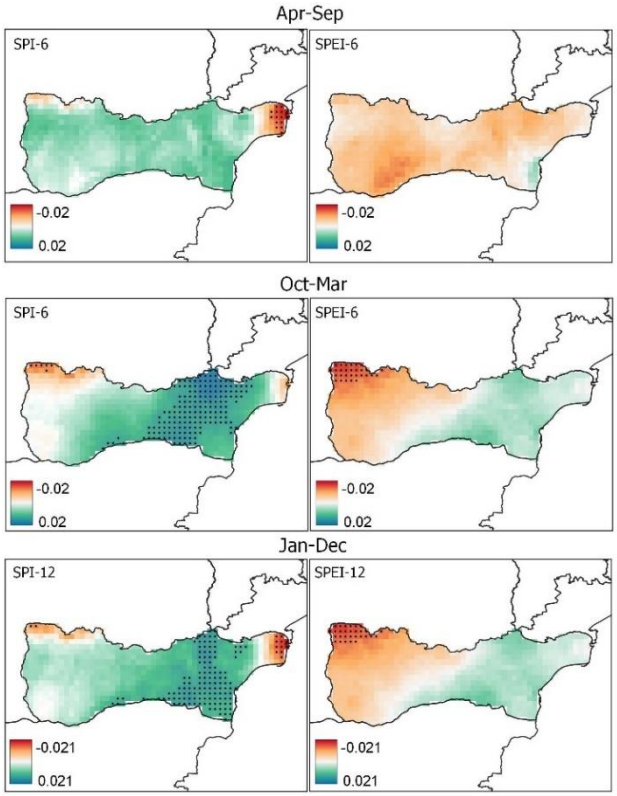


Figure 3. Sen's slope values for trends in the variability of SPI and SPEI for 6 and 12 months time scales in southeastern Romania. Increasing wetness trends are shown by green shades, and decreasing wetness trends by orange shades. Black dots represent statistically significant trends.

The differences between the areas with drought (moderate to extreme), as indicated by SPEI and by SPI shows generally negative differences before 1988 (except 1950-1952), meaning that there were larger drought areas indicated by SPI compared to SPEI. In the last three decades, the difference becomes positive, showing an increase in drought area indicated by SPEI (Fig.5).

The observed downward trends in the Danube Delta and upward trends in southern Dobrogea are explained by the decreasing precipitation trends in winter and spring and increasing trends in autumn, respectively (Dumitrescu *et al.*, 2015). Downward trends observed in the higher altitude areas and western part of the study region could be explained mostly by rising mean temperatures and sunshine duration in winter, spring and summer, and annual growth in the frequency of warm spells (Dumitrescu *et al.*, 2015). An increase in the frequency of very warm days has also been observed by Busuioc *et al.* (2015). The general diverging trends between SPI and SPEI could be explained by the rising temperatures over the whole region (Marin *et al.*, 2014) and increasing ET_0 trends (Croitoru *et al.*, 2013). These trends suggest that a warming climate could have a growing importance in explaining drought occurrence.

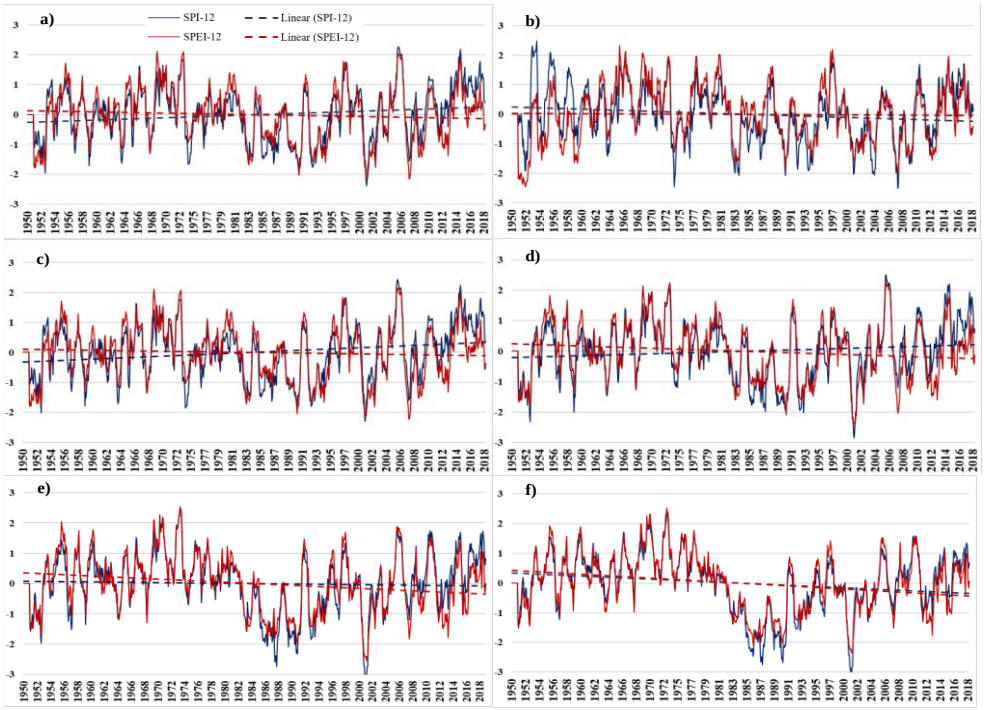


Figure 4. SPI-12 and SPEI-12 variability for: a) southeastern Romania average, and b) Bsk, c) Cfa, d) Cfb, e) Dfb, f) Dfc Köppen climate types.

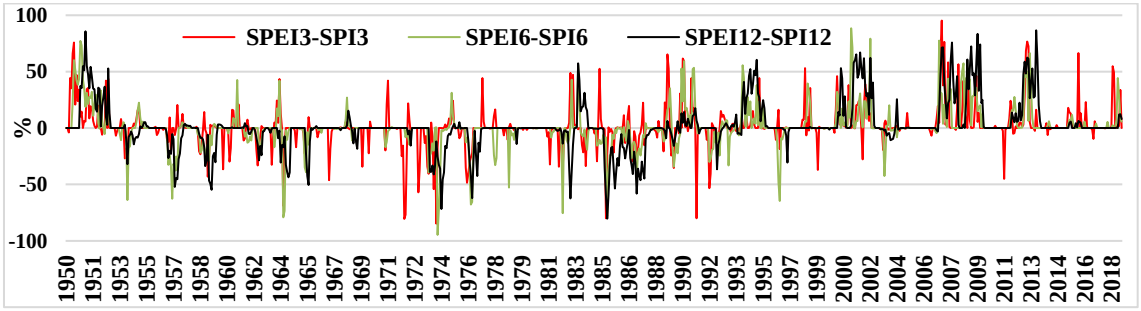


Figure 5. Difference between the percentages of areas in drought (moderate to severe) indicated by SPEI and SPI

Conclusions and discussion

The analysis of drought trends as showed by SPI and SPEI in southeastern Romania between 1950-2018 highlighted spatial differences in trend direction, revealing the predominant role of precipitation deficit or water balance in drought occurrence. Similar trends have been identified regionally, such as increasing aridity noticed in the Danube Delta and at higher altitudes (Carpathians and Subcarpathians). The downward trends identified in the Danube Delta can be mostly driven by precipitation deficit, which is consistent with other studies showing decreasing precipitation (Marin, 2014) and trends in SPI (Ioniță *et al.*, 2016). The results of both indicators agree on increasing wetness trends in autumn, with SPI showing most areas with significant trends. Regions at high altitudes seem to be more exposed to increasing drought severities associated to water balance deficit. Concerning the five climate types, SPEI-12 shows slight decreases, while SPI-12 trend direction varies between regions. The findings of this research suggest that both precipitation and temperature must be analyzed to understand regional drought patterns and underlines the usefulness of using multiple indicators. Trend analysis provides an important tool to identify regional drought risk and to understand the impact of climate change.

Acknowledgements

We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project UERRA (http://www.uerra.eu) and the Copernicus Climate Change Service, and the data providers in the ECA&D project (https://www.ecad.eu).

Literature

Busuioc A., Dobrinescu A., Birsan M. V., Dumitrescu A., & Orzan A., 2015. Spatial and temporal variability of climate extremes in Romania and associated large-scale mechanisms. *International Journal of Climatology*, *35*(7), 1278–1300.

Cheval S., Busuioc A., Dumitrescu A., & Birsan M. V, 2014. Spatiotemporal variability of meteorological drought in Romania using the standardized precipitation index (SPI). *Climate Research*, 60(3), 235–248.

Croitoru A.-E., Piticar A., Dragota C. S., & Burada D. C., 2013. Recent changes in reference evapotranspiration in Romania. *Global and Planetary Change*, 111, 127-136.

Dumitrescu A., Bojariu R., Birsan M. V., Marin L., & Manea A., 2015. Recent climatic changes in Romania from observational data (1961–2013). *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1–2), 111–119.

Ioniță M., Scholz P., & Chelcea S., 2016. Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index. *Natural Hazards*, 81(3), 1483–1498.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132p.

Kendall M. G., 1975. *Rank correlation methods*. 4th Edition, Charles Griffin, London.

Kottek M., J. Grieser C. Beck B. Rudolf and Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263.

Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), pp.84–87.

Mann H. B., 1945. Non-Parametric Test Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.

Marin L., Birsan M. V., Bojariu R., Dumitrescu A., Micu D. M., & Manea A., 2014. An overview of annual climatic changes in Romania: Trends in air temperature, precipitation, sunshine hours, cloud cover, relative humidity and wind speed during the 1961-2013 period. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(4), 253–258.

McKee T. B., Doesken N. J., & Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 179–184.

NMA, 2008. *Clima României* (Editura Academiei Române). București.

Rubel F., Brugger K., Haslinger K., & Auer I., 2017. The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, *26*(2), 115-125.

Sen P. K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.

Spinoni J., Naumann G., Vogt J., & Barbosa P., 2015. European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50–57.

Stagge J. H., Kingston D. G., Tallaksen L. M., & Hannah D. M., 2017. Observed drought indices show increasing divergence across Europe. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.

Trenberth K. E., Dai A., Van der Schrier G., Jones, P. D., Barichivich J., Briffa K. R., & Sheffield J., 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22.

Vicente-Serrano S. M., Beguería S., & López-Moreno J. I, 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718

THE PERCEPTION OF THE URBAN HEAT ISLAND. CASE STUDY: BUCHAREST (ROMANIA)

CONSTANTIN (OPREA) D.M., GRIGORE E., ZAHARIA L., IOANA-TOROIMAC G., TIȘCOVSCHI A.A., BOGAN E.

University of Bucharest, Faculty of Geography, Bucharest, Romania (oprea.constantin@geo.unibuc.ro ; elazigzag@gmail.com ; zaharialili@hotmail.com ; gabriela.toroimac@geo.unibuc.ro ; atiscovschi@gmail.com ; elena.bogan@yahoo.com)

Summary: *This paper aims to investigate the perception of the population of Bucharest (the capital of Romania) on the Urban Heat Island (UHI), in order to estimate the level of knowledge and understanding of this phenomenon. The analysis relies on a questionnaire, with closed questions with and without the Likert scale, and semi-open questions with multiple possible answers, applied individually and directly. The questionnaire was applied to Bucharest residents in ten representative locations of the pedestrian traffic in the city. It was found that 41.4% of respondents do not know the meaning of the 'Urban Heat Island' term while 29.1% know about it. 66.2% of the subjects consider that UHI exists in Bucharest. Based on the relatively low level of knowledge and understanding of the UHI identified in our study, we recommend the need to enhance the meteorological education of citizens in order to further implement socially accepted measures aiming to diminish the UHI in Bucharest.*

Key words: *urban heat island; questionnaire; perception; awareness; Bucharest*

Résumé : ***La perception de l'îlot de chaleur urbain. Etude de cas : Bucarest (Roumanie).*** *L'étude porte sur la perception de l'Ilot de Chaleur Urbain (ICU) par les habitants de Bucarest, capitale de la Roumanie, afin d'estimer le niveau de connaissance et de compréhension de ce phénomène par la population. L'analyse repose sur une enquête englobant des questions fermées, avec et sans l'échelle de Likert, et des questions semi-ouvertes avec des réponses multiples appliquées individuellement et directement. Les questionnaires ont été appliqués aux habitants de Bucarest dans dix lieux représentatifs de la circulation piétonne de la ville. Nous avons constaté que 41,4% des répondants ne connaissaient pas le terme « îlot de chaleur urbain » et sa signification, tandis que 29,1% estimaient comprendre le sens de l'expression. 66,2% des répondants considèrent que l'ICU existe à Bucarest. Étant donné le niveau relativement faible de connaissance et de compréhension de l'ICU, il apparaît nécessaire d'améliorer l'éducation météorologique de la population afin de mettre en place des mesures socialement acceptées pour diminuer l'ICU à Bucarest.*

Mots clés : *ilot de Chaleur Urbain ; questionnaire ; perception ; sensibilisation ; Bucarest*

Introduction

The urbanization process will increase globally from 55% in 2018 to 68% by 2050 and from 74% to 83.7% in 2050 at European level (European Commission, 2020). This will lead to the alteration of the characteristics of the land surface and the cities will change both the local atmospheric conditions and those in surrounding areas (IPCC, 2019). It has been found that, urbanization has increased the annual average temperature with a rate of 0.2 to 2.6°C in the cities comparing to the rural areas (Torres-Valcárcel *et al.*, 2015). This heating of the urban area constitutes one of the most studied phenomena of the urban climate, namely the Urban Heat Island (UHI). The UHI has a diurnal size and amplitude that varies from one city to another and its existence is perceived by people who have information on weather, geography or physics.

In Bucharest area live about 9% of the urban population in Romania (2,104,967 inhabitants with a density of 8,771 inhabitants / km^2 in 2017, according with INS, 2020). This area is the only metropolis of the country. UHI affects people's health or can disturb their wellbeing and productivity. Is the population living in Bucharest aware of this harmful phenomenon to which they are exposed? Starting from this question, the aim of our analysis is to assess the knowledge and understanding of UHI in Bucharest area based on the perception of the inhabitants. This investigation provides useful information for competent authorities to develop and implement

appropriate strategies allowing public awareness and informing on UHI, in order to mitigate this phenomenon and its negative consequences on the socio-economic activities.

1. The study area, data and methods

The Municipality of Bucharest is located in the South-Eastern Romania, in the Romanian plain (Fig.1A) at altitude ranging between 54-90 m. The city has a quasi-circular shape (Fig.1B), its axes measuring about 22 km on the East-West direction and about 24 km on the North-South direction, with an area of about 240 km^2, of which the built area is over 70% (INS, 2020). The climate in Bucharest area is the temperate-continental. It is the most representative area for urban topoclimate in Romania. This aspect is reflected by the distribution some climatic parameters: the average annual air temperature values increase from the periphery to the downtown, from 10.6°C at Bucharest-Băneasa weather station (located in the north of the city, outside the built area) to 11.5°C at Bucharest-Filaret station, located close to the city center (Fig.1B); the average air temperature during summer is 21.7°C (with 22.6°C in July) at Bucharest-Băneasa and 22.9°C (with 24.1°C in July) at Bucharest-Filaret (Urițescu, 2019); the relative humidity decrease from 76-78% at periphery to 74% in the downtown (Institutul de Geografie, 2005).

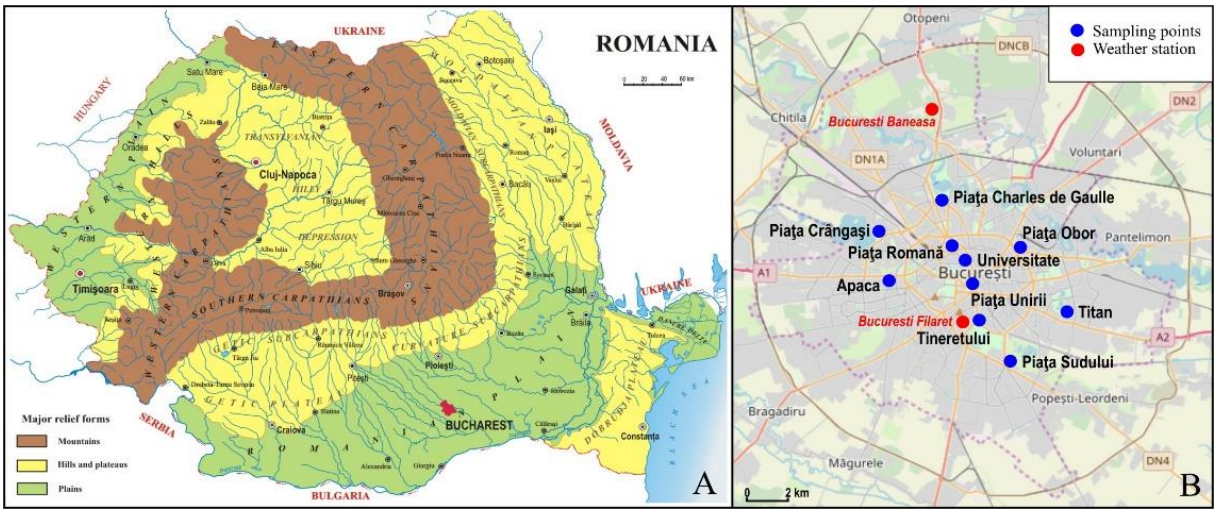


Figure 1. The location of the study area (A) and the sampling points & weather stations in Bucharest (B)

The Urban Heat Island phenomenon for the Bucharest area has been studied both by using the air temperature measurements performed on the ground, using the thermometers located at fixed points (Ionac and Grigore, 2013) and from satellite data (Cheval and Dumitrescu, 2009; Urițescu *et al.*, 2017). These studies showed that the UHI intensity generated by the city of Bucharest is on an annual average by 1-3°C higher than in the surrounding rural area.

Our analysis relies on a questionnaire, with closed questions, with and without the Likert scale and semi-open questions with multiple possible answers applied individually and directly. The questionnaire included sixteen questions of which eleven were used for the elaboration of this study. The data obtained from the processing of the semi-open questions, with multiple possibility of answer, will lead to results with values greater than the number of subjects interviewed. These values are derived from the sum of the answers given by the subjects per question. The questionnaires were applied to 267Bucharest residents in ten representative locations of the pedestrian traffic (Fig.1B). The subjects were classified according to socio-demographic indicators such as age, gender, and level of education. Of the total 267 subjects, 139 were male (52.1%) and 128 were female (49.9%), covering all the educational levels, from the high school (4.4%) to post-university studies (9%) (Fig.2). Most of the interviewed subjects are high school graduates (36.3%), followed by those with university studies (34.4%) (Fig.2).

The attitude of the subjects was cooperative, most of them showing interest in the topic of the UHI in the Bucharest area. The results from the field investigation were processed statistically, represented by graphics and interpreted.

2. Results and discussions

The questionnaire, included questions grouped into four categories which collectively reflecting the social perception of this phenomenon: UHI recognition, UHI causes and characteristics, UHI bioclimatic aspects, and responsible actors and measures to reduce the UHI.

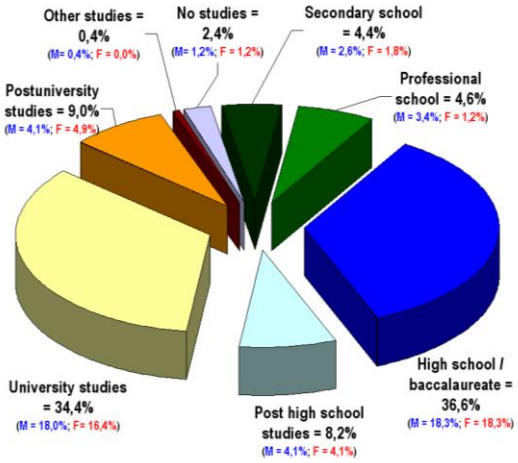


Figure 2. Classification of subjects by educational level

2.1. Knowledge of the UHI in Bucharest

The answered of the surveyed population has revealed that 70.9% of the subjects do not know at all (41.4%) or partially (29.5%) the UHI meaning. The percentage per gender is approximately equal: 36.2% for the masculine and 34.7% for the female. Referring to the most important urban centre of the country, the interviewees were asked with what category of cities, according to the number of inhabitants, would associate the UHI and if they consider that this phenomenon exists in the city of Bucharest. 86.3% of the respondents associated UHI with the large cities, between 100,000-1,000,000 inhabitants (41.5%, of which 23.6% were male) and very large cities, over 1,000,000 inhabitants (44.8%, of which 24.6% were female) (Fig.3A). 66.2% of the respondents consider that there is the phenomenon of UHI in Bucharest and 33.8% of the respondents consider that there is no such phenomenon or partially this phenomenon exists (Fig.3B). Of those who responded that there is the UHI phenomenon in Bucharest 33.6% are male and 32.6% are female. As a result, a significant percentage of those interviewed are not familiar with the term UHI, but they correctly associate this phenomenon with the city category.

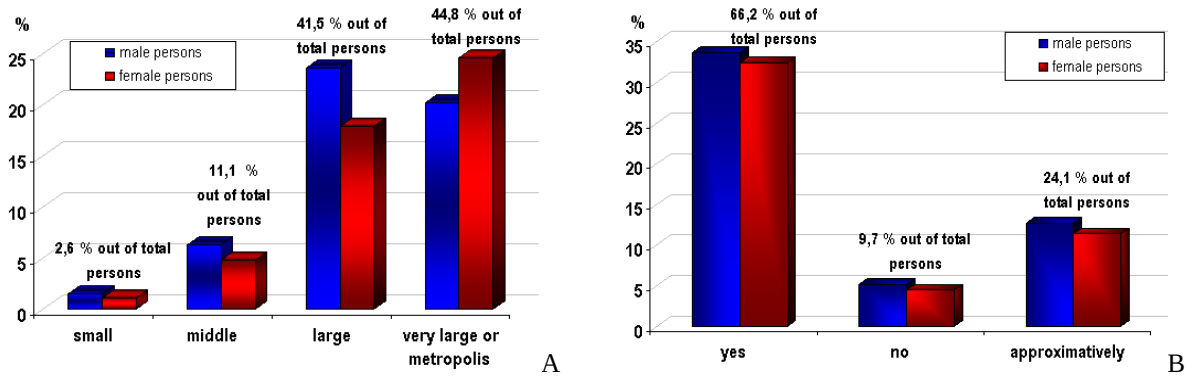


Figure 3. The answers of the questions: *Which cities do you consider the 'Urban Heat Island' to be characteristic?* (A) and *Do you consider that there is UHI in Bucharest?* (B)

2.2. Identifying the weather-related causes and the characteristic of the UHI

The magnitude of the UHI intensity is determined by a number of natural and anthropic factors and is directly proportional to the number of inhabitants and the density of buildings (Koppe *et al.*, 2004). Most respondents considered that the UHI has as main factor of appearance and/or maintenance the pollution phenomenon, totalling 176 responses (65.9%) (Fig.4). It is considered that another factor that triggers the UHI is the heat resulting from the burning of fossil fuels (130 responses meaning 48.7%), which in fact has everything to do with the phenomenon of pollution. In terms of the implications of weather and climate in the phenomenon of UHI, most part of the respondents (169 meaning 63.3%) associated this phenomenon to the air dry and air pollution higher in the urban areas than in the surroundings (Fig.5). This association is natural, because most respondents consider the pollution phenomenon to be the triggering factor of the UHI. It is also an easier finding at the individual level, without having a high level of weather information.

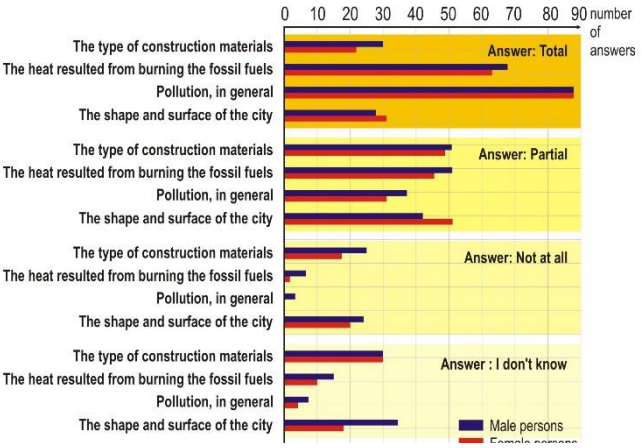


Figure 4. The answers of the question: *To which extent do you consider that the following factors determine/maintain the phenomenon of 'Urban Heat Island'?*

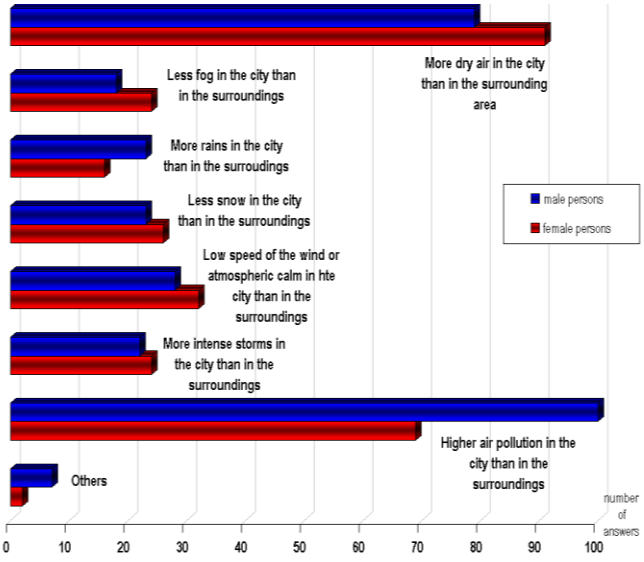


Figure 5. The answers of the question: *What can you associate with the term 'Urban Heat Island', from meteorological & climatic point of view?*

2.3. The subjects' reaction to the bioclimatic characteristics of the UHI phenomenon

The temperature, humidity, air movement and radiant energy exchange are altered by the presence of UHI and are important in maintaining the thermic balance of the human body (Koppe *et al.*, 2004). The intensity of the UHI increases on the synoptic background of the installation of the heat waves that is why the perception of the population on the bioclimatic aspects arising from the presence of the UHI must be known. Most respondents experience excess heat in the form of frequent dehydration of the body (185 responses or 69.3%), followed by fatigue and sleep problems (125 responses or 46.8%) as shown in figure 6A. In order to reduce the effects resulting from the human exposure to the bioclimatic stress by heating, the subjects answered they escape either at homes (173 responses or 64.8%) or at parks (127 responses or 47.6%) or go to the mountains (97 responses or 36.3%) (Fig.6B).

2.4. The responsible actors and the measures to reduce / combat the UHI

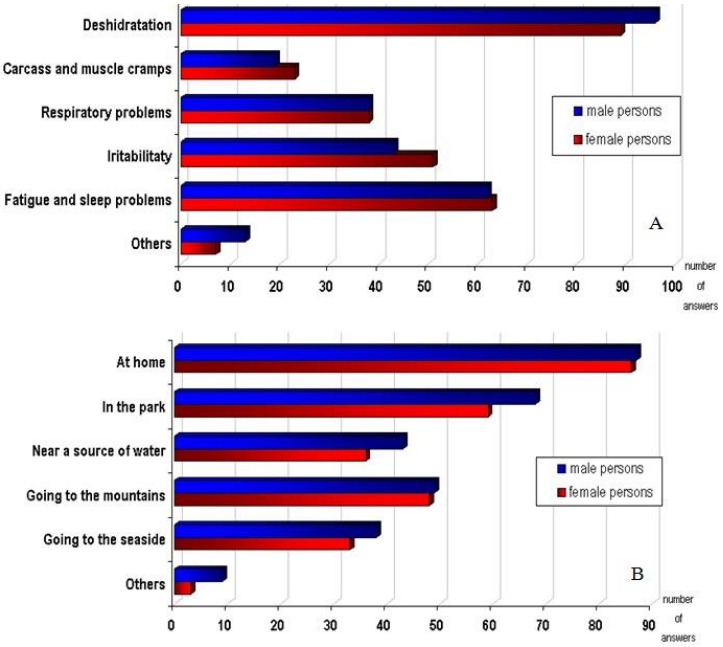


Figure 6. The answers to the questions: *How does your body react to heat excess?* (A) and *In case of a heat wave, where do you escape?* (B)

In the current context of global warming, of the intensification of the UHI phenomenon, in the large and very large cities, it is necessary to identify the responsible actors for developing strategies in order to adapt and mitigate the effects of the UHI phenomenon. It is also important to know what would be the methods of combating these effects from the point of view of population. In most cases, the subjects considered that the diminution of UHI phenomenon falls within the competence of either the local administration, such as the city halls (151 answers meaning 56.6%), or the state, through the central public authorities specialized in the environmental protection (148 answers or 55.4%). It is worth noting that a significant part of the subjects (104 answers meaning 39%) considered that the population should increase their responsibility towards the environment at individual and collective level (Fig.7A). As measures of combating the phenomenon, the interviewees believe that the most important are: more green space (181 responses or 67.8%), increasing the environmental responsibility, both individually and collectively (126 responses or 47.2%) and increasing the number of hydration and first aid points (124 responses or 46.4%) (Fig.7B). The interviewees' answers fall within the generally accepted and recognized methods at European and global level, being methods of diminishing and combating the UHI phenomenon.

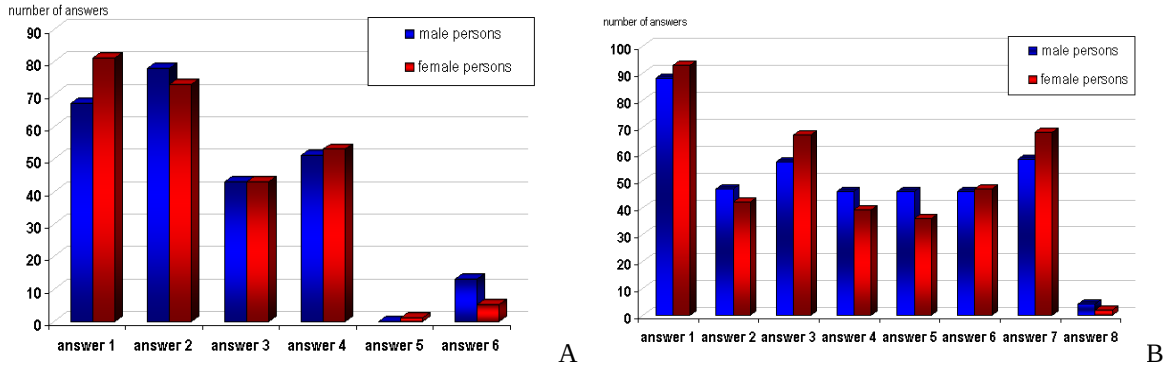


Figure 7. The answers to the questions: *Who do you think should take action for mitigate the Urban Heat Island?* (A) and *What aspects do you consider appropriate for improving the living environment in the periods with high temperatures/hot days?* (B).

Answers legend 9A: 1 = State through the Central Public Authorities responsible with specialized in environmental protection; 2 = Local administration (City Halls); 3 = NGOs and other associations for environmental protection; 4 = Population; 5 = Others; 6 = I don't know. Answers legend 9B: 1 = More green spaces; 2 = Developing public transport; 3 = More hydrating and health care points; 4 = More points with cooling system by evaporation (water spray system); 5 = Adapted work schedule; 6 = Ventilation and acclimatization equipment and systems of the buildings; 7 = Increasing individual and collective environment responsibility (environment / meteorological education); 8 = Others.

Conclusions

Bucharest city is the most representative area in Romania for the presence of the UHI. The results of our study allow to identify what is the perception of the population in Bucharest regarding the UHI phenomenon, thus establishing their degree of knowledge and understanding of this phenomenon. Given that the results showed that 70.9% of the respondents do not know at all or partly know the meaning of the UHI, we consider that the information campaigns would be necessary, since the information would reach the population directly and there would be great possibilities for adapting and/or rapidly changing the individual behaviour towards the environment protection. However, 66.2% of the subjects consider that there is the UHI phenomenon in Bucharest. It becomes a compulsory condition increasing the responsibility of the population, both at individual and collective level, to ensure a healthy and sustainable environment in Bucharest area.

Literature

Cheval S., & Dumitrescu A., 2009. The July urban heat island of Bucharest as derived from modis images. *Theoretical and Applied Climatology*. Doi: https://doi.org/10.1007/s00704-008-0019-3.

Koppe *et al.*, 2004, Heat-waves: risks and responses. *Health and Global Environmental Change Series*. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/96965/E82629.pdf?ua=1

European Commission, 2020. Developments and forecasts on continuig urbanisation. URL: https://ec.europa.eu/knowledge4policy/foresight/topic/continuing-urbanisation/developments-and-forecasts-on-continuing-urbanisation_en

INS, 2020. Prezentarea generală a municipiului București. URL: https://www.bucuresti.insse.ro/despre-bucuresti/

Institutul de Geografie, 2005. *Geografia României*. vol V, Editura Academiei Române, București, 967p.

Ionac N, & Grigore E, 2013. Thermal differences within Bucharest town area. Case study: 01.07.2006 – 31.03.2007, *Present Environment and Sustainable Development*, 7(2), 21-36.

IPCC, 2019. Special report on climate change and land. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/05_Chapter-2.pdf.

Torres-Valcárcel Á.R., Harbor J., Torres-Valcárcel A.L., & González-Avilés C.J., 2015. Historical differences in temperature between urban and non-urban areas in Puerto-Rico. *Int. J. Climatol.*, 35, 1648-1661. Doi: 10.1002/joc.4083.

Urițescu B., Ionac N., & Grigoraș G., 2017. The influences of land use on the urban heat island in Bucharest. *Air and water components of the environment conference proceedings*, 259-265. Doi: 10.24193/awc2017_32.

Urițescu B., 2019. *Diferențieri termice în aria metropolitană a municipiului București (rezumat)*. Thèse de doctorat, Faculté de Géogaphie, Université de Bucarest. URL: https://drive.google.com/file/d/1sJHnY9u5wOgEmRLhfz_WE1A810KNeW1P/view.

CHALEUR EN NORMANDIE, TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE (1970-2019)

DAVID M.[1], CANTAT O.[1], PLANCHON O.[2]

1 UMR 6554 LETG Caen, Université Caen Normandie, Caen, France (matthieu.david@unicaen.fr)
2 UMR 6282 CNRS, Biogéosciences, Université Bourgogne-Franche-Comté, Besançon, France

Résumé : *Cet article s'intéresse au rôle et à l'évolution des différents types de circulation atmosphérique dans l'occurrence des journées de chaleur en Normandie. La chaleur est ici très dépendante de la présence de centres d'action sur l'Europe centrale ainsi que, secondairement, des flux de NE et E. Le changement climatique contemporain se manifeste par une augmentation de l'efficience thermique de tous les types de circulation (plus de chaleur pour un même flux). Enfin, le nord du Cotentin se singularise par un véritable « îlot de fraicheur » en été en raison de son caractère de finisterre qui impose aux masses d'air un rafraîchissement par la base important quelles que soient leurs provenances.*

Mots clés : *chaleur ; type de circulation atmosphérique ; classification de Hess-Brezowsky ; changement climatique ; Normandie*

Summary: ***Heat in Normandy, types of atmospheric circulation and climate change (1970-2019).*** *Heat in Normandy, synoptic circulation patterns and climate change (1970-2019). This article focuses on the role and the evolution of the different kinds of synoptic circulation patterns in the occurrence of hot days in Normandy. Heat is here, very dependent on the presence of action centres over central Europe as well as, air flow coming from NE and E. Contemporary climate change expresses itself by a rise in thermal efficiency of all synoptic circulation patterns (more heat for the same flow). Lastly, the north of Cotentin stands out by being a real "cool island" during summer because of its peninsula position which imposes on any air mass, regardless of its origin, a cooling from its bottom.*

Key words: *Heat, synoptic circulation patterns; Hess-Brezowsky classification; climate change; Normandy*

Introduction

Avec le changement climatique et la répétition de records de chaleur, une attention plus particulière est portée ces dernières années sur les conditions estivales qui impactent notre quotidien et questionnent sur notre avenir. Dans cet article, nous nous proposons de caractériser les mécanismes atmosphériques sur l'espace euro-atlantique à l'origine d'épisodes de chaleur en Normandie. Deux grandes questions guident l'analyse :

- Quels sont les types de circulation atmosphérique responsables de la chaleur en Normandie ?
- Y-a-t-il une évolution de fréquence et/ou d'efficience des types de circulation associés ?

1. Données et méthodes

L'analyse s'appuie sur le croisement des températures maximales journalières de juin à septembre de quatre stations normandes avec les types de circulation atmosphérique issus de la classification de Hess-Brezowsky (1952).

1.1. Le choix des stations météorologiques de référence et du seuil thermique

Les stations météorologiques sélectionnées pour cette étude sont celles d'Évreux-Huest, Caen-Carpiquet, Cherbourg-Maupertus et Pointe de la Hague, en raison de leur représentativité de la diversité climatique régionale. Elles sont positionnées sur un axe Sud-Est/Nord-Ouest, allant d'une légère continentalité propre aux plateaux occidentaux du bassin parisien (Évreux), à l'hyperocéanité affirmée du *finisterre* cotentinois (La Hague). Pour disposer de séries complètes, l'extension temporelle s'étend de 1970 à 2019, soit cinq décennies que nous pouvons décomposer en deux ensembles vicennaux pour apprécier l'évolution récente du climat : 1970-1989, période de pré-changement climatique contemporain, et 2000-2019,

situation actuelle. Pour caractériser la chaleur, la température maximale journalière de 25°C a été choisie comme seuil, conformément à l'usage sous notre climat (jour de chaleur).

1.2. La classification des types de circulation atmosphérique

L'analyse des situations météorologiques d'échelle synoptique propices à la chaleur renvoie au calendrier des types de circulation atmosphérique définis par Hess et Brezowsky (1952). Le catalogue quotidien des types de circulation, archivé et mis à jour par le Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) jusqu'en 2009 (Werner et Gerstengarbe, 2010), est, depuis 2003, mis à jour et publié par le Deutscher Wetterdienst suivant la même méthodologie. Cette dernière s'appuie sur l'analyse du champ de pression au sol et en altitude, au-dessus de l'espace euro-atlantique (Werner et Gerstengarbe, 2010). La classification identifie 29 types de circulation (Großwetterlagen ou GWL), pouvant être regroupés en 5 classes (Großwettertypen ou GWT) (Bárdossy et Caspary, 1990). L'analyse proposée ici repose uniquement sur les cinq GWT (GWT 1 : circulation d'Ouest ; GWT 2 : circulations de Sud ; GWT 3 : circulations de Nord-Ouest et de Nord ; GWT 4 : circulations de Nord-Est et d'Est ; GWT 5 : situations à centre d'action sur l'Europe Centrale).

2. Résultats

2.1. Diversité géographique et évolution de la chaleur en Normandie

La figure 1 traduit l'existence de deux ensembles géographiques bien distincts : le premier est constitué par les stations « continentalisées » d'Evreux et Caen (à un degré moindre) où la chaleur est assez fréquente (de l'ordre de 20 à 40 jours par an) ; le second correspond aux stations « océanisées », où le phénomène est rare (Cherbourg), voire exceptionnel (La Hague). Pour les stations continentalisées, la série souligne de grands écarts distribués de façon aléatoire (de moins de 10 jours à plus de 60 jours par an), avec l'existence de pics isolés dans le passé dont les valeurs sont égales ou parfois même supérieures à celles de la période actuelle (cf. canicule de 1976, étés 1983 et 1989). Derrière cette forte variabilité interannuelle apparait également une augmentation de la fréquence moyenne du phénomène, en lien avec le réchauffement climatique global (IPCC, 2013), comme le démontre l'évolution pluri décennale de la moyenne des 4 stations (passage progressif d'environ 10 à 16 jours par an entre 1970-1979 et 2010-2019).

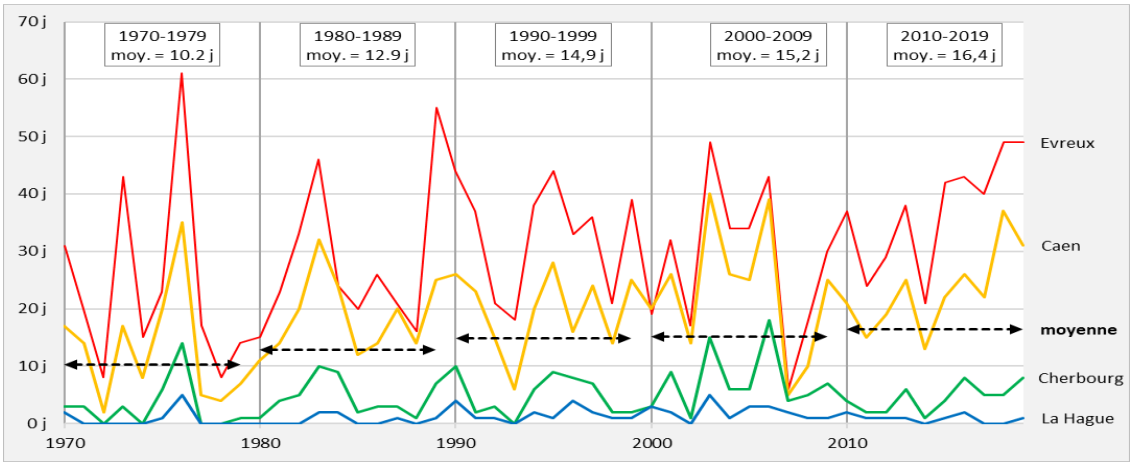


Figure 1. Evolution du nombre de jours de chaleur (TX ≥ 25°C) par an en Normandie. Valeurs pour 4 stations représentatives de la diversité régionale et moyenne, entre 1970 et 2019 (Données : Météo-France).

2.2. Croisement des jours de chaleur avec les types de circulation atmosphérique

2.2.1. Occurrence de la chaleur en fonction des types de circulation sur la période 1970-2019

Pour les deux stations continentalisées, la chaleur s'observe (Fig.2, gauche, très préférentiellement lors de situations sans véritable flux (centres d'action sur l'Europe centrale) : 514 cas à Evreux et 354 à Caen. Les autres types de circulation présentent des occurrences nettement plus faibles et assez proches les unes des autres, avec autour de 240 cas pour Evreux et 150 pour Caen ; les circulations d'est et nord-est se démarquent à peine avec une présence légèrement plus importante (276 cas à Evreux et 174 à Caen).

Pour les deux stations océanisées du nord Cotentin, les cas sont rares et également associés principalement aux masses d'air stagnantes et claires qui permettent en été un fort échauffement du substratum et de l'air à son contact. Bénéficiant d'une position en retrait du littoral et sur les hauteurs, la fréquence de la chaleur est alors plus importante à Cherbourg (119 cas) qu'à La Hague (34 cas) dont le site presque totalement ouvert sur la mer et ses brises qui facilitent le rafraîchissement de l'air. Le rôle des facteurs géographiques locaux est donc déterminant. Il peut se quantifier par un calcul de l'efficience de chaque type de circulation ; c'est-à-dire sa capacité à générer des températures supérieures ou égales à 25°C dans une station donnée.

2.2.2. Efficience des types de circulation sur la période 1970-2019

Pour les stations continentalisées, on note une grande efficience (Fig.2, droite) des situations à centres d'action sur l'Europe centrale (42% pour Evreux et 29% pour Caen) et à niveau presque égal les circulations d'origine continentale car en été synonymes d'air chaud et sec (40% pour Evreux et 25% pour Caen). Les autres types de circulation interviennent avec des valeurs de l'ordre de 16 à 19% pour Evreux et 9 à 12% pour Caen, un peu plus influencée par l'air marin.

Pour les stations océanisées, l'efficience est naturellement très faible car les masses d'air apportées par les différentes circulations ont quasi systématiquement subi un rafraichissement par la base en passant au-dessus de la Manche, mer qui les environne de toutes parts : en moyenne, l'efficience est de 0,5% à La Hague pour tous les grands types de circulation et seulement d'un peu moins de 3% par absence de flux (centre d'action sur Europe centrale). Pour Cherbourg, ce même type (GWT 5) s'élève presque à 10% (contre rappelons-le plus de 42% à Evreux) et atteint près de 6% pour les flux continentaux de nord-est et est. Pour tous les autres flux (du sud au nord-ouest), les valeurs varient entre 1,1 et 2,6% seulement.

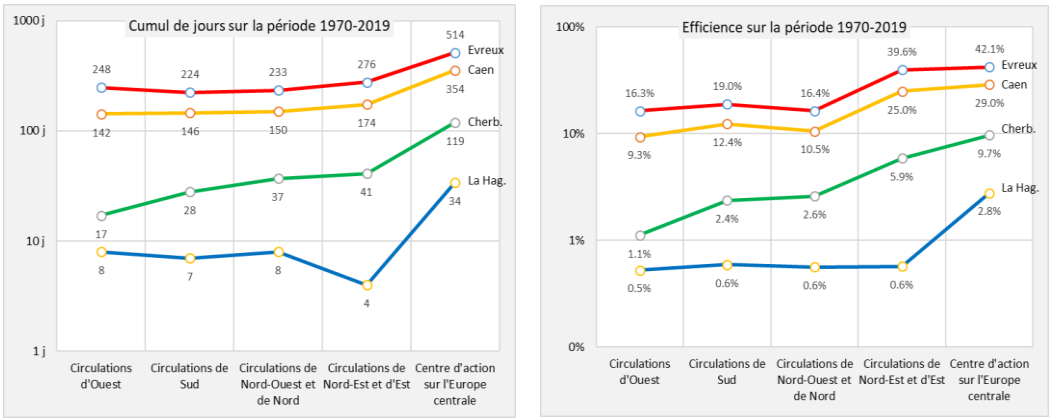


Figure 2. Sur la période 1970-2019, à gauche, cumul du nombre de jours de chaleur en Normandie (données Météo-France) en fonction des types de circulation atmosphérique (classification Hess-Brezowsky) ; à droite, efficience des types de circulation atmosphérique en Normandie pour dépasser 25°C dans la journée.

2.3. Evolution depuis 50 ans des jours de chaleur en fonction des types de circulation

En considérant la moyenne régionale, l'augmentation générale des occurrences de chaleur entre la période de pré-réchauffement contemporain (1970-1989) et l'actuelle (2000-2019) est principalement attribuable à un accroissement sensible (32 jours) des circulations de sud (de 27 à 59 jours) et des situations à centres d'action sur l'Europe centrale (de 83 à 115 jours). En revanche, on n'observe quasiment pas de changement pour les flux de nord-est et d'est (de 46 à 47 jours). La part des autres flux est en faible augmentation, de l'ordre d'une dizaine de jours pour les flux d'ouest (de 34 à 44 jours) et les flux de nord-ouest et nord (de 39 à 50 jours).

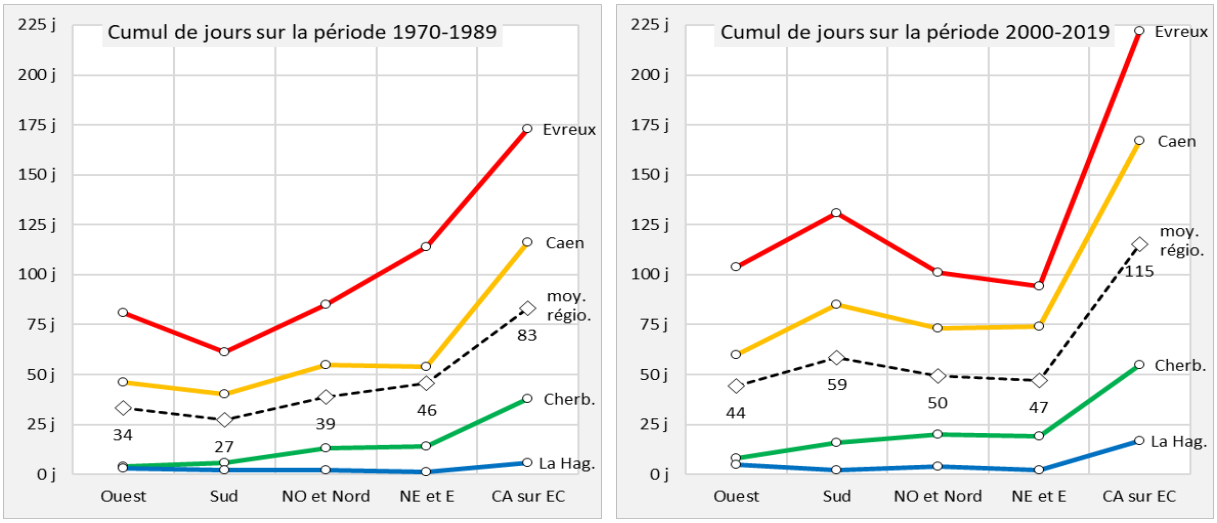


Figure 3. Comparaison inter vicennale du nombre total de jours de chaleur en Normandie (données Météo-France) en fonction des types de circulation atmosphérique (classification Hess-Brezowsky). A gauche pour la période pré réchauffement contemporain (1970-1989), à droite pour la période actuelle (2000-2019).

La part grandissante des circulations de sud et des centres d'action sur l'Europe centrale dans les occurrences de chaleur en Normandie est peut-être « simplement » à associer à une plus grande fréquence de ces deux types entre les deux périodes ? Pour apporter une réponse, nous avons comptabilisé les occurrences de toutes les circulations (Tab.1) : il en ressort que les flux de sud sont nettement plus fréquents (+8,0%), et de ce fait pourraient expliquer qu'ils contribuent plus aux journées de chaleur (+32 jours). Mais cette hypothèse n'est pas valide pour les situations à centres d'action sur l'Europe centrale puisque, à fréquence sensiblement équivalente (+1,1%), nous avons également gagné 32 jours de chaleur ! Dans la même logique, les flux d'ouest, bien que nettement moins présents aujourd'hui (-5,2%), apportent cependant plus de jours de chaleur qu'autrefois (+12 jours entre 1970-1989 et 2000-2019).

Tableau 1. Evolution inter vicennale 1970-1989 / 2000-2019 du nombre total d'occurrences de chaque type de circulation atmosphérique (données issues du calendrier des types de circulation de Hess-Brezowsky).

Descriptif du type de circulation	nb 1970-1989	%	nb 2000-2019	%	évolution	
Circulations d'Ouest	645	26.4%	517	21.2%	-128	**-5.2%**
Circulations de Sud	391	16.0%	586	24.0%	195	**8.0%**
Circulations de Nord-Ouest et de Nord	570	23.4%	561	23.0%	-9	**-0.4%**
Circulations de Nord-Est et d'Est	314	12.9%	257	10.5%	-57	**-2.3%**
Centre d'action sur l'Europe centrale	481	19.7%	508	20.8%	27	**1.1%**
indéfini	39	1.6%	11	0.5%	-28	**-1.1%**
Total	2440	100%	2440	100%	0	**0%**

On en déduit qu'à configuration synoptique identique, il est plus aisé actuellement de franchir le seuil des 25°C. La comparaison de l'efficience entre nos deux périodes permet de

quantifier indépendamment de leur fréquence respective la contribution de chaque type dans les jours de chaleur, *in fine* de quantifier l'évolution de leur « efficacité » calorifique (Fig.4).

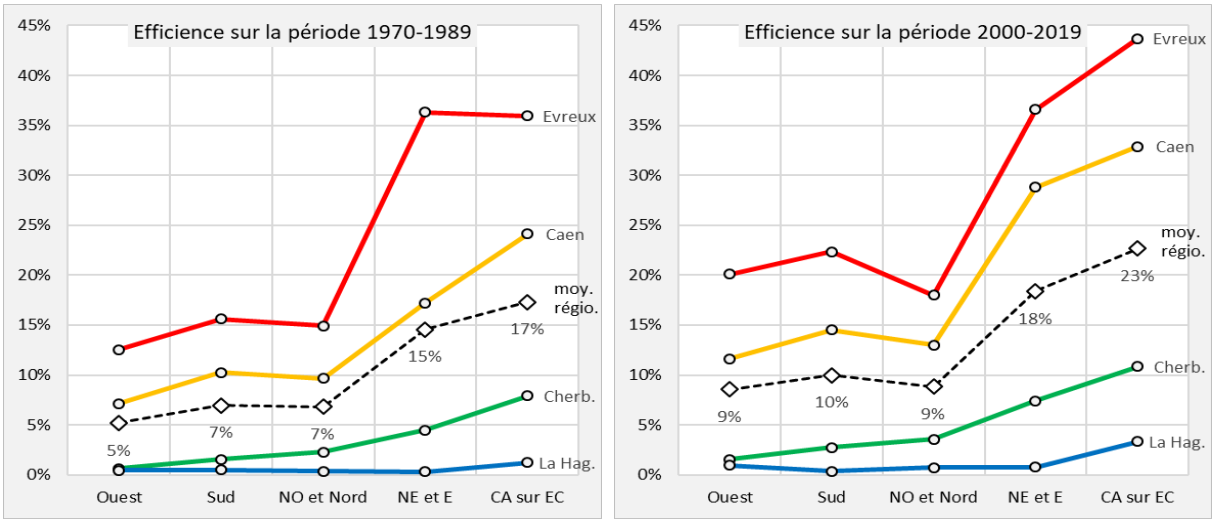


Figure 4. Comparaison inter vicennale de l'efficience (%) des types de circulation atmosphérique (classification Hess-Brezowsky) pour atteindre le seuil de chaleur (25°C) en Normandie (données Météo-France) : à gauche sur la période pré-réchauffement contemporain (1970-1989) ; à droite sur la période actuelle (2000-2019).

Discussion et ouverture

Enquêter sur l'occurrence de jours de chaleur par l'intermédiaire des types de circulation atmosphérique nous offre la possibilité de comprendre les mécanismes sous-jacents, croisant échelles synoptique et géographique. Le cas normand, avec les flux de sud et les situations à centres d'action sur l'Europe centrale, nous propose le parfait exemple de la nécessaire analyse simultanée de la fréquence et de l'efficience d'un aléa. Comme nous l'avons vu, l'origine de la hausse du nombre de jours de chaleur est différente pour les flux de sud (hausse de leur fréquence) et les situations à centres d'action sur l'Europe centrale (hausse de l'efficience). Un même résultat mais des causes différentes.

Ce binôme permet la distinction entre les origines synoptiques et géographiques d'un phénomène (Cantat, 2005). La fréquence des types de circulation est commune à travers l'ensemble de l'espace euro-atlantique mais l'efficience est propre à chaque point de mesure, déclinaison locale d'un type de circulation en plusieurs types de temps, fonction des singularités de l'espace géographique (Cantat, 2015).

Ce phénomène peut être observé en Normandie où une même circulation atmosphérique donne lieu à différentes conséquences thermiques sur un espace plus océanisé à l'ouest et plus continentalisé à l'est. La Presqu'île du Cotentin ne fait pas l'objet de beaucoup de jours de chaleur car aucun type de circulation n'est très efficient, mis à part pour les situations d'absence de flux significatif (10% à Cherbourg pour le GWT 5, centres d'action sur l'Europe centrale) et pour les flux d'origine continentale (6% à Cherbourg pour le GWT 4, NE et E). Sa situation géographique de péninsule semble expliquer l'inefficience des autres types de circulation. Le caractère océanique, voire hyperocéanique pour La Hague (moins de 1 et 3% d'efficience pour GWT 4 et GWT 5), est donc déterminant dans le maintien d'un îlot de fraîcheur en période de chaleur. On peut supposer qu'il se maintiendra car la hausse de l'efficience des types de circulation susceptibles de le dégrader reste faible et leur fréquence stagne.

De nouvelles questions émergent avec ces résultats. Certaines portant sur la fréquence, d'autres sur l'efficience, d'autres encore sur leur intrication dans les dynamiques d'évolutions passées

et potentiellement futures, tout cela en combinant les échelles spatiales (Normandie, France, espace euro-atlantique) pour tenter de comprendre l'évolution du système climatique.

On peut regrouper toutes ces questions sous une question centrale : le changement climatique global est-il à l'origine de l'évolution des fréquences et d'efficiences que l'on constate ? Si tel est le cas, quel est son effet sur ces composantes de l'efficacité des types de circulations à produire des jours de chaleur ? La question portant sur la raison de la forte évolution de la fréquence des flux de sud y est directement reliée. De même que la quête d'une réponse à la question sur les causes de la hausse de l'efficience de certains GWT en Normandie mis en avant précédemment.

L'élargissement de l'étude au reste de la France, avec l'établissement d'un tableau des efficiences de chaque type de circulation atmosphérique par secteur géographique, permettrait de mieux cerner l'originalité de l'îlot de fraîcheur du Cotentin. Cela offrirait également la possibilité de mieux comprendre la place des situations à centres d'action sur l'Europe centrale parmi les types de circulation donnant lieu à des jours de chaleur ailleurs en France. Cela confirmerait - ou non - l'hypothèse émise sur la raison du faible essor des jours de chaleur par flux de sud malgré leurs fréquences plus élevées, en lien avec l'océanité de la région et sa position septentrionale.

Enfin, le recours à d'autres seuils de températures pourrait apporter des informations complémentaires à l'échelle de la France sur l'efficience des types de circulation en fonction de l'intensité de la chaleur retenue (forte chaleur : $TX \geq 30°C$ et très forte chaleur : $TX \geq 35°C$). Ces seuils n'étant pas pertinents en Normandie du fait de la très faible occurrence de leur dépassement, particulièrement dans la partie Ouest de la région.

Bibliographie

Bárdossy A., Caspary H. J., 1990. Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 3, 155-167.

Cantat O., 2005. Dynamique spatio-temporelle d'un événement météo-climatique extrême. La canicule de l'été 2003 en Europe de l'ouest. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 2, 99-136.

Cantat O., 2015. *Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine. Étude de climatologie physionomique et appliquée*. HDR, Vol. 3, Université Paris 7 Diderot, 264p.

Hess P., Brezowsky H., 1952. *Katalog der Grosswetterlagen Europas*. Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 33, 39p.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Werner P. C., Gerstengarbe F.-W., 2010. *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. PIK Report 119, 146p.

ÉTUDE DU GRADIENT VERTICAL DE LA TEMPÉRATURE DANS DES PARCELLES DE VIGNE DE LA RÉGION DE BORDEAUX : VERS UNE SOLUTION POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

DE RESSÉGUIER L.[1], PONS R.[1], PIERI P.[1], PETITJEAN T.[1], MARY S.[2], VAN LEEUWEN C.[1]

1 EGFV, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, Université Bordeaux, ISVV, Villenave d'Ornon, France (laure.deresseguier@agro-bordeaux.fr)
2 VITINNOV, Bordeaux Sciences Agro, ISVV, Gradignan, France

Résumé : *La température est un élément clé pour le développement de la vigne et la composition des raisins. Le changement climatique impacte déjà ces paramètres dans de nombreuses régions viticoles et il devient nécessaire de s'adapter pour continuer à produire des vins de même typicité. Un levier d'adaptation pourrait être le système de conduite de la vigne. Une étude du gradient thermique verticale a été réalisée dans la région de Bordeaux afin d'évaluer si l'augmentation de la hauteur du tronc pourrait modifier le microclimat dans la zone des grappes. Les résultats montrent un faible effet sur le retard de maturité, mais révèlent que l'augmentation de la hauteur du tronc permettrait de lutter contre le gel et les effets dus aux journées de forte chaleur.*

Mots clés : *changement climatique ; viticulture ; température ; gradient vertical ; système de conduite ; entretien du sol ; adaptation*

Summary: ***Study of the vertical temperature gradient in vineyard plots in the Bordeaux region: towards a solution for adaptation to climate change ?*** *Temperature is a key factor involved in vine development and grape composition. Climate change already impacted these aspects in many wine-growing regions, and it becomes necessary to implement adaptation strategies in order to maintain the production of wines with the same typicity. A lever for adaptation could be the training system. A study of the vertical thermal gradient has been carried out in the area of Bordeaux in order to assess if trunk height increase could modify the microclimate in the bunch zone. Only a small effect on delaying ripeness has been shown but the increase of trunk height might minimize potential damage of both frost and heat wave events.*

Key words: *climate change; viticulture; temperature; vertical gradient; training system; vineyard floor management; adaptation*

Introduction

La température joue un rôle majeur sur le développement de la vigne et la composition des raisins (Jones, 2018). Le changement climatique récent (IPCC, 2013), marqué par une augmentation de la température de l'air notamment pendant la phase de maturation du raisin, a des effets déjà visibles en viticulture. Des avancées des différents stades phénologiques de la vigne ont été notées (de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017), ainsi que des modifications de la composition des raisins et des composés aromatiques du raisin et du vin (Mira de Orduña, 2010). Dans ce contexte, les viticulteurs vont devoir s'adapter pour continuer à produire des vins de même niveau qualitatif (van Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017).

La nature et le mode d'entretien du sol, ainsi que la proximité des grappes au sol, sont des facteurs qui influencent le microclimat du raisin (Cellier, 1991). Une étude du gradient vertical de la température en fonction de l'entretien du sol a été mise en place pour caractériser ces effets et évaluer si l'augmentation de la hauteur du tronc pourrait être une stratégie d'adaptation au changement climatique.

1. Données et Méthodes

1.1. Description du site d'étude

Le dispositif d'étude a été mis en place début 2016 dans deux parcelles juxtaposées de Merlot situées dans la plaine de l'Appellation Saint-Emilion sur des sols sablo-argileux. Les parcelles ont été plantées en 1972 avec une densité de plantation de 6000 pieds/ha (1,4 m entre rangs x 1,2 m entre pieds). La vigne est palissée et conduite en Guyot simple et le premier fil porteur, qui correspond à la hauteur des grappes, est situé à 45 cm du sol. Les rangs sont plantés dans le sens Nord/Sud. Les parcelles ont des modes d'entretien du sol différents, l'une est intégralement travaillée et l'autre est enherbée naturellement dans l'inter rang et travaillée sous le rang.

1.2. Dispositif d'étude de la température

1.2.1. Gradient thermique vertical

Pour étudier le gradient vertical de température en fonction de l'entretien du sol, des capteurs de température de type Tinytag Talk2-TK-4023 (Gemini Data Loggers, UK) ont été installés sur des piquets de vigne à l'intérieur des deux parcelles, à 4 hauteurs différentes au dessus de la surface du sol à 30, 60, 90 et 120 cm. Les sondes de température ont été protégées par des abris solaires anti-radiation de type RS3, et les capteurs ont été programmés pour enregistrer la température minimale (Tn) et maximale (Tx) horaire. Il y a trois répétitions sur chaque parcelle, soit un total de 24 capteurs de température.

1.2.2. Station météorologique

Les données de la station Météo-France de Saint-Emilion, localisée à 100 m des parcelles de l'étude ont été utilisées pour calculer les facteurs qui peuvent influencer le gradient vertical de la température.

1.3. Traitement des données

1.3.1. Variables météorologiques

Pour quantifier les écarts de température, l'indice bioclimatique Canopy Winkler Index a été utilisé (de Rességuier *et al.*, 2018).

À partir des données de la station Météo-France, les variables décrites par Cantat *et al.* (2012) ont été calculées (température moyenne, fraction d'insolation, pluviométrie et vent à 10m). L'humidité du sol a aussi été estimée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique du sol prenant en compte les flux à sa surface, notamment le rapport évaporation superficielle du sol sur évaporation potentielle du sol (Es sol / (1-k) ET_0 sol) (Lebon *et al.*, 2003).

1.3.2. Modèle phénologie

Afin de mesurer l'impact de la température sur la maturité technologique, l'utilisation du modèle GSR a permis de déterminer le jour où chaque capteur atteint la somme thermique correspondant au 220g/L de sucre du Merlot (Parker *et al.*, 2020).

2. Résultats et discussion

2.1. Gradient thermique vertical en fonction de l'entretien du sol

2.1.1. Canopy Winkler Index

Le Canopy Winkler Index a été calculé pour chaque capteur de température et pour les trois années de mesure (2016-18). Les résultats révèlent un effet de la hauteur et de la modalité d'entretien du sol sur le Canopy Winkler Index (Fig.1). Quelle que soit la modalité, le Canopy

Winkler Index est plus élevé à proximité du sol qu'en hauteur. Le gradient est plus régulier sur la modalité travaillée, que pour la modalité enherbée où l'on n'a plus d'effet de la hauteur sur le Canopy Winkler Index à partir de 90 cm.

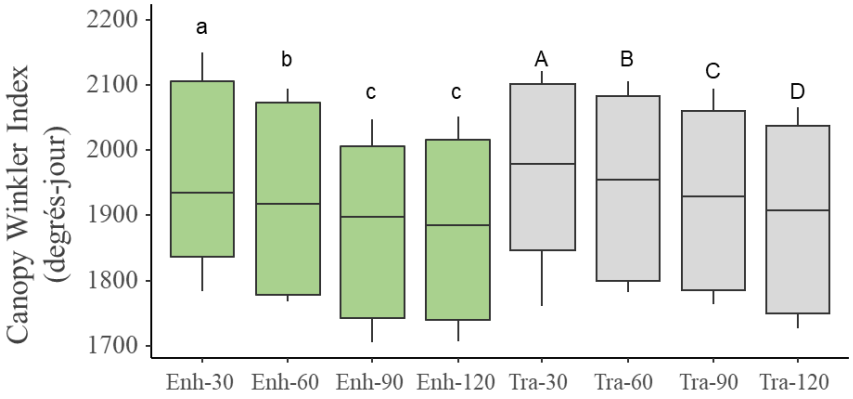


Figure 1. Boxplot du Canopy Winkler Index de 2016 à 2018 en fonction de la hauteur pour chaque modalité d'entretien du sol. (n = 3 années * 3 répétitions = 9 individus / boxplot). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les hauteurs. Des modèles différents ont été construits pour chaque modalité d'entretien du sol.

2.1.2. Modélisation de la maturité technologique (220g/L de sucre)

Même si des différences significatives ont été mises en évidence en fonction de la hauteur, elles ne sont que de 72 degrés-jour entre la moyenne des individus à 120 cm et à 30 cm. Pour étudier l'impact de ces variations de température sur la maturité, les 220g/l de sucre du Merlot ont été modélisés à partir du modèle GSR pour chaque hauteur et par modalité. Les mêmes différences significatives que pour le Canopy Winkler Index ont été trouvées entre les hauteurs avec 3 jours de différence de maturité théorique entre 30 et 120 cm quelle que soit la modalité.

Ces écarts sont faibles et le changement du système de conduite avec une augmentation de la hauteur du tronc ne permettra donc pas de retarder significativement le cycle végétatif.

2.2. Analyse temporelle du gradient vertical de la température journalière

Une analyse plus fine de la température a été réalisée au pas de temps journalier sur l'année 2018. Pour s'affranchir des variations de température journalière, l'étude s'est portée sur la température relative par rapport à la hauteur 120 cm considérée comme référence.

2.2.1. Températures minimales et maximales

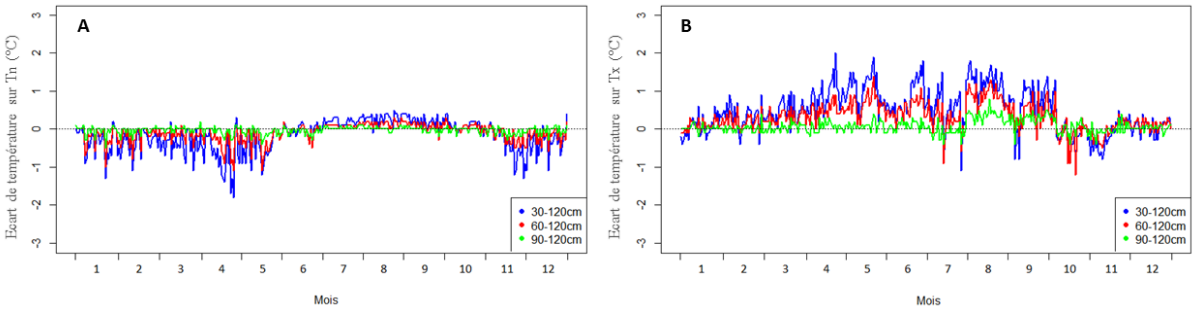


Figure 2. Températures journalières minimales (A) et maximales (B) relatives (30-120 cm, 60-120 cm, 90-120 cm) sur l'année 2018. Les valeurs représentent les moyennes des deux modalités d'entretien du sol.

Cette étude journalière révèle un fort gradient sur la température minimale de novembre à mai avec des températures plus froides proche du sol (Fig.2). Le gradient est particulièrement important en avril (jusqu'à 2°C) pendant la phase sensible des semaines qui suivent le débourrement, lorsque des évènements de gel de printemps sont possibles. En revanche, sur la

période entre juin et octobre le gradient est inversé et reste très faible. Cela est certainement dû à l'influence de la végétation sur le gradient qui limite le refroidissement nocturne. Pour les températures maximales, le gradient est important d'avril à fin octobre (saison végétative) avec des températures maximales plus chaudes proches du sol, malgré quelques journées très exceptionnelles d'inversions thermiques. Comme pour les températures minimales ce gradient peut atteindre 2°C.

2.2.2. Entretien du sol

Pour étudier l'impact de l'entretien du sol sur le gradient des températures minimales et maximales, l'écart relatif entre 30 et 120 cm a été étudié pour Tn et Tx (Fig.3).

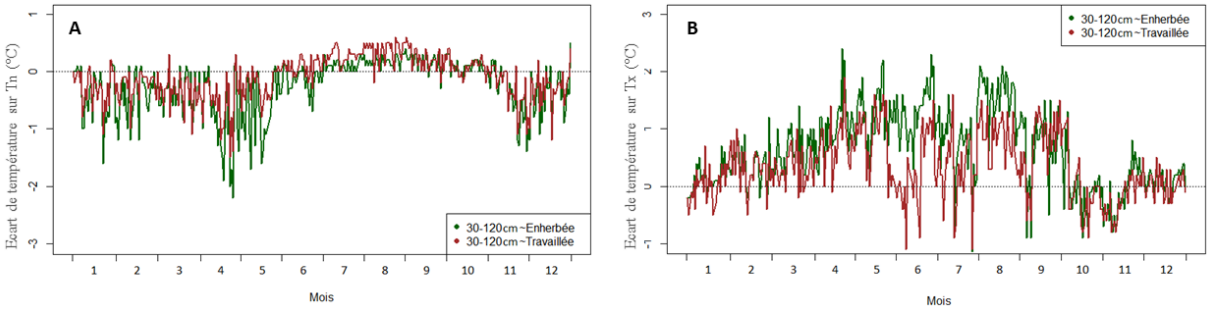


Figure 3. Températures journalières minimales (A) et maximales (B) relatives (30-120 cm) sur l'année 2018 moyennées avec les deux modalités d'entretien du sol.

Concernant la température minimale (Fig.3A), la cinétique entre modalités est la même, mais les écarts sont plus importants pour la modalité enherbée en avril, mai et juin. Le risque d'exposition aux gelées est donc plus important sur le sol enherbé. L'enherbement peut limiter la remontée de chaleur en provenance du sol durant la nuit (Cellier, 1991), et d'autres effets non quantifiés dans cette étude pourraient aussi avoir un impact, comme le tassement du sol ou son taux d'humidité. Pour la température maximale (Fig.3B), il fait plus chaud à proximité du sol sur la parcelle enherbée en particulier entre mai et septembre. Là aussi la dynamique d'humidité du sol en fonction de son entretien pourrait avoir un impact sur la température de surface et donc sur l'échauffement de l'air à proximité.

2.3. Analyse horaire du gradient verticale lors de journées de températures extrêmes

Une analyse horaire de journées de gel et de forte température a été réalisée afin de mesurer l'effet de la hauteur et de l'entretien du sol lors de ces journées sensibles pour le rendement, le développement de la vigne et la composition du raisin.

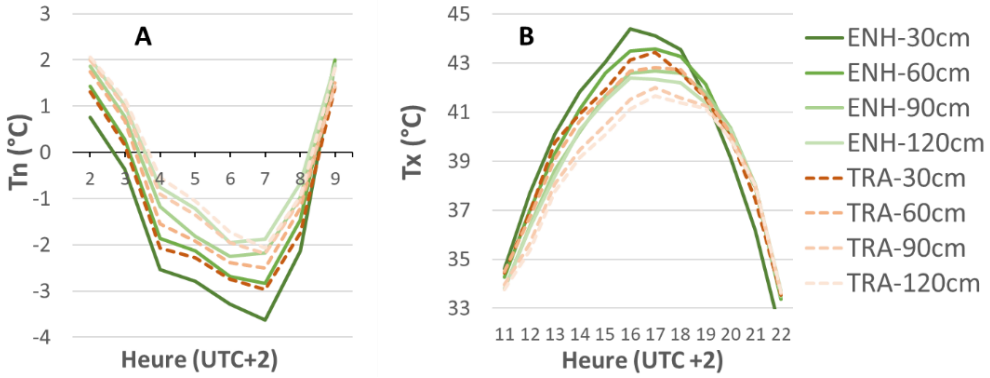


Figure 4. Distribution de la température horaire de la nuit de gel du 27 avril 2017 (Tn, A) et de la journée de canicule du 23 juillet 2019 (Tx, B) par hauteur et modalité d'entretien du sol.

2.3.1. Analyse de nuits de gel

L'analyse de la nuit de gel du 27 avril 2017 (Fig.4A) révèle que quelle que soit la modalité d'entretien du sol, les températures proches du sol sont plus froides qu'en hauteur. La parcelle enherbée présente un plus grand gradient vertical de température (1,7°C) que la parcelle travaillée (0,9°C) et les températures dans la zone des grappes (45 cm) sont plus froides pour la modalité enherbée (-0,5°C) notamment car l'enherbement limite les remontées de chaleur du sol durant la nuit. Des résultats similaires ont été trouvés pour l'ensemble de journées de gel. L'augmentation de la hauteur du tronc, associée au travail du sol, limite donc les risques de dégâts liés au gel.

2.3.2. Analyse de vagues de chaleur

Lors de la journée du 23 juillet 2019 et quelle que soit la modalité, les températures maximales sont plus élevées à proximité du sol (Fig.4B). Les températures sont aussi plus élevées sur la parcelle enherbée que sur la parcelle travaillée. La différence de température dans la zone des grappes à 45 cm est de 0,8°C entre les deux modalités.

L'analyse de nombreuses journées de fortes chaleurs, montre que les températures les plus chaudes sont toujours situées près du sol, mais elle n'a pas permis de faire ressortir systématiquement un effet de la modalité d'entretien du sol.

L'augmentation de la hauteur du tronc permettrait de réduire les risques induits par de très fortes températures, comme l'échaudage du raisin et l'altération du profil aromatique.

2.4. Analyse des facteurs qui influent sur le gradient vertical

Une analyse statistique avec un modèle mixte a permis de déterminer les facteurs influant les gradients verticaux de température. Au vu des résultats précédents, l'analyse s'est portée sur le gradient vertical des températures maximales au printemps et en été, et uniquement au printemps pour le gradient des températures minimales. Les deux modalités (travaillé et enherbé) ont été moyennées. Les facteurs explicatifs étudiés sont le vent à 10 m, la fraction d'insolation, les précipitations, la température moyenne (Tm) et l'humidité du sol (données quotidiennes synchrones).

Tableau 1. Résultats statistiques des modèles expliquant les gradients verticaux de température (30-120 cm) en fonction de variables climatiques et de l'humidité du sol, calculés à partir des données quotidiennes de 2016 à 2018 (ns : non significatif, ** signif à 0,01, *** signif à 0,001).

	Fraction insolation	**Tm**	**Précipitation**	**Vent 10 m**	**Humidité sol**
Gradient Tn (GrTn) 30 cm-120 cm Printemps *(n=273)*	*** GrTn ↗ qd Fr_ins ↗	*** GrTn↘ qd Tm↗	ns	*** GrTn↘ qd vent ↗	*** GrTn ↘ qd hum↗
Gradient Tx (GrTx) 30 cm-120 cm Printemps *(n=273)*	*** GrTx↗ qd Fr_ins ↗	ns	* GrTx↘ qd preci ↗	ns	*** GrTx↘ qd hum↗
Gradient Tx (GrTx) 30 cm-120 cm Eté *(n=276)*	*** GrTx↗ qd Fr_ins ↗	** GrTx↗ qd Tm↗	ns	*** GrTx↗ vent ↗	*** GrTx↘ qd hum↗

Le gradient de température maximale est fortement influencé par l'humidité du sol et la fraction d'insolation sur toute la saison végétative (Tab.1). Plus le sol est sec, ou plus le temps est dégagé, plus les écarts sont importants. Une température moyenne chaude durant l'été accentue les gradients de température maximale.

Les gradients des températures minimales au printemps (Tab.1) sont influencés par l'humidité du sol, le vent et les précipitations. Le gradient diminue avec le vent et l'augmentation de la température moyenne et augmente lorsque le sol devient plus sec.

Conclusions et Discussion

L'étude du gradient de température vertical en fonction de l'entretien du sol dans ce vignoble situé sur des plaines alluvionnaires, a permis de montrer que la hauteur du tronc présente un intérêt en terme d'adaptation au changement climatique. Même s'il a été montré que l'augmentation de la hauteur de tronc ne réduirait que de 3 jours la maturité théorique dans les hypothèses de cette étude, elle permettrait de lutter aussi contre les dégâts dus aux vagues de froid ou de chaleur. Un sol non enherbé permet de limiter les risques pendant les épisodes de gel printanier.

Les projections du changement climatique s'accordent sur une augmentation de la température de l'air dans le futur. Cette augmentation aura des conséquences sur l'humidité du sol, qui deviendra plus sec en l'absence d'augmentation des précipitations. Ces changements sont de nature à favoriser les gradients sur les températures maximales. Pour les températures minimales la réduction des gradients avec l'augmentation de la température moyenne pourrait compenser l'effet de la sècheresse sur ce gradient. L'augmentation de la hauteur du tronc serait aussi une solution d'adaptation.

Pour généraliser les résultats obtenus, cette étude devra être reconduite dans d'autres situations topographiques en travaillant sur les effets du relief sur la distribution verticale des températures.

Remerciements

Nous tenions à remercier Emilie Gorisse stagiaire pour son implication dans la collecte et le traitement des données en 2018, le Conseil Interprofessionnel du Vin de Bordeaux pour son soutien financier et la propriété où s'est déroulée l'expérimentation pour leur coopération.

Bibliographie

Cantat O., Savouret E., and Bensaïd, A., 2012. La régionalisation des types de temps en France métropolitaine. *Actes du XXVème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble, 165–170.

Cellier P., 1991. La prévision des gelées de printemps. *Comptes Rendus Académie Agric. Fr.* 77, 55–64.

De Cortázar-Atauri I., Duchêne E., Destrac A., Barbeau G., De Rességuier L., Lacombe T., *et al.*, 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One* 51, 115–126. Doi:10.20870/oeno-one.2016.0.0.1622.

De Rességuier L., Le Roux R., Petitjean T., Mary S., Quénol H., and Van Leeuwen C., 2018. Variability of climate, water and nitrogen status and its influence on vine phenology and grape composition inside a small winegrowing estate. XII International Terroir Congress, Zaragoza, 01016. Doi:10.1051/e3sconf/20185001016.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 33–118.

Jones G.V., 2018. The Climate Component of Terroir. *Elements* 14, 167–172. Doi:10.2138/gselements.14.3.167.

Lebon E., Dumas V., Pieri P., and Schultz H. R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Funct. Plant Biol.* 30, 699p. Doi:10.1071/FP02222.

Mira de Orduña R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 43, 1844–1855. Doi:10.1016/j.foodres.2010.05.001.

Parker A. K., García de Cortázar-Atauri I., Gény L., Spring J.-L., Destrac A., Schultz H., *et al.*, 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of Vitis vinifera L. cultivars. *Agric. For. Meteorol.* 285–286, 107902. Doi:10.1016/j.agrformet.2020.107902.

Van Leeuwen C., and Destrac-Irvine A., 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One* 51, 147p. Doi:10.20870/oeno-one.2016.0.0.1647.

SUIVI PAR TELEDETECTION DES TEMPETES DE SABLE ''KHAMSIN'' AU LIBAN

DIAB L.[1], ADJIZIAN GERARD J.[1], NOUACEUR Z.[2]

1 Centre de Recherche en Environnement-Espace Méditerranée Orientale, Université Saint Joseph de Beyrouth, Département de géographie, Beyrouth, Liban (Leila.kheirallah.diab@gmail.com)
2 UMR CNRS 6228 IDEES, Université de Rouen Normandie, Rouen, France

Résumé : *Les tempêtes de sable sont considérées comme des catastrophes naturelles majeures causant de nombreux dommages à la société et à l'environnement. Fréquentes dans les régions arides et semi-arides, ces phénomènes sont généralement causés par de forts gradients de pression associés à des dépressions. Le Liban, pays situé à la lisière des milieux arides est soumis périodiquement à des tempêtes de sables connus sous le nom de « Khamsin ». Cette étude porte sur ces types de temps observés au Liban sur une période de 6 ans, de 2012 à 2017. Grâce à l'analyse d'images satellitaires MODIS (TERRA et AQUA), de l'utilisation de la méthode AOD (Aerosol Optical Depth) et des cartes de rétro-trajectoires « NOAA HYSPLIT Model » couplée à des données météorologiques (température, humidité), il a été possible de les identifier et de spécifier leurs trajectoires et les zones sources. Ces investigations ont aussi permis de classifier ces événements en quatre catégories principales, selon l'origine et la période d'apparition.*

Mot clés : *tempête de sable ; télédétection ; Aerosol Optical Depth ; Khamsin ; Liban*

Summary: ***Remote sensing monitoring of ''Khamsin'' sandstorms in Lebanon.*** *Sandstorms are considered to be major natural disasters that cause great social and environmental damages. Frequent in arid and semi-arid regions, these phenomena are generally caused by strong pressure gradients associated with depressions. Lebanon, a country located on the edge of an arid environment, is periodically impacted by sandstorms known as "Khamsin". This study focuses on these types of weather observed in Lebanon over a period of 6 years (from 2012 until 2017). Using MODIS (TERRA and AQUA) data, the AOD method (Aerosol Optical Depth) and back-trajectory maps of 'NOAA HYSPLIT Model' coupled with meteorological data (temperature, humidity), it was possible to identify them and specify their trajectories and source zones. These investigations also made it possible to classify these events into four main categories, according to the origin and the period of occurrence.*

Key words: *sandstorm; remote sensing; Aerosol Optical Depth; Khamsin; Lebanon*

Introduction

Les tempêtes de sable sont des phénomènes météorologiques qui surviennent en général lorsque des vents forts soulèvent dans l'atmosphère de grandes quantités de sable et de poussière. Au cours des dix dernières années, une attention particulière de la communauté scientifique a été accordée à ces types de temps compte tenu de leurs impacts sur le climat, la santé humaine, l'environnement et les secteurs socio-économiques.

Fréquentes dans les régions arides et semi-arides, les tempêtes de sable sont généralement causées par des orages – ou de forts gradients de pression associés à des dépressions – qui accroissent la vitesse du vent sur une large zone. Ces vents violents soulèvent dans l'atmosphère de grandes quantités de sable et de poussière qui peuvent parcourir des centaines, voire des milliers de kilomètres. Quelques 40 % des aérosols présents dans la troposphère proviennent de l'érosion éolienne. Les principales sources de ces poussières minérales sont les régions arides sahariennes en Afrique, la péninsule arabique, l'Asie centrale et les zones désertiques chinoises. En se basant principalement sur des simulations numériques, on estime qu'entre un et trois milliards de tonnes de poussières sont rejetées dans l'atmosphère annuellement.

Chaque année à la même période, entre janvier et juin, commence la saison des vents de sable caractéristique des régions arides et semi – arides sahariennes et sahéliennes. C'est une véritable saison climatique (*maoussem eriah*, la saison des vents) qui commence. C'est la période où les sédiments fins sont arrachés par la force du vent d'un sol sec et nu. Ils sont ensuite transportés dans le sillage des grands courants atmosphériques vers des destinations très lointaines (exemple : transport de l'Afrique de l'Ouest vers les Caraïbes, de l'Afrique

saharienne vers l'Europe occidentale ou de l'Australie vers la Nouvelle-Zélande). Lors de l'occurrence de ces événements, on enregistre une baisse sévère de la visibilité qui perturbe fortement les transports et particulièrement le trafic aérien (NOUACEUR, 2004 ; NOUACEUR, 2005). Ainsi le 22 février 2020, 822 vols sur les îles Canaries ont été affectés par une tempête de sable venant du continent africain (selon la première trajectoire citée) bloquant ainsi des milliers de passagers dans les 8 aéroports de l'archipel canarien.

La région du Moyen-Orient est l'une des zones les plus arides au monde. On y observe des tempêtes de poussière majeures, notamment au printemps et en été, avec des effets destructeurs dans certains pays comme l'Irak, l'Arabie saoudite et l'Iran. Des recherches menées par l'Institut Max Planck ont permis de constater que, en raison de sécheresses prolongées et de l'assèchement des sols, les émissions de poussières ont augmenté jusqu'à 70 % en Arabie Saoudite, Irak et Syrie depuis le début de ce siècle (COOKE, 2016). Au cours des dernières années, l'Iran a été particulièrement touché par les tempêtes de sable et de poussières comme l'explique Masoumeh Ebtekar, vice-présidente et ministre iranienne de l'Environnement : « Nous avons observé une augmentation constante de l'intensité des tempêtes de poussières au cours des quatre dernières années ». Les simulations de modèles suggèrent que l'émission de poussières de cette région contribue pour environ 20% des émissions totales mondiales (HAMIDI, 2012).

Le Liban est situé dans la partie orientale du bassin méditerranéen. Ce territoire fait partie des arcs montagneux bordant le Proche-Orient à l'ouest et au nord. Le climat libanais est la résultante de plusieurs facteurs géographiques qui, en se conjuguant, contribuent à une originalité climatique frappante qui réside, comme dans toutes les régions méditerranéennes, dans sa sécheresse estivale associée à des températures élevées et à la douceur de la saison pluvieuse (ADJIZIAN-GÈRARD, 2013). Du fait de sa position, le Liban, largement exposé aux influences climatiques de ces régions arides, connait des tempêtes de sable caractérisées par un type de temps particulier : le ‘‘*khamsin* ”. Ce phénomène se produit fréquemment pendant les saisons intermédiaires (avril-mai et octobre) quand la crête chaude se décale vers l'est de la Méditerranée, favorisant l'advection vers le nord d'air chaud tropical, provenant essentiellement du désert d'Arabie ou d'Égypte (TRABOULSI, BEN BOUBAKER, 2012). Ce type de temps est ainsi très rarement mentionné dans le recueil des observations des stations météorologiques et peu d'études lui sont concernées au Liban, pourtant il est responsable de la dégradation de la qualité de l'air et altère fortement la santé humaine.

Le *khamsin* se manifeste par une température exceptionnellement élevée et par une humidité relative très faible. Il est inconnu au cœur de l'été ; il n'est pas rare en automne et en hiver, mais c'est le printemps qui est sa saison de prédilection (MAHERAS, BLANCHET, 1980).

L'objectif de cette étude est d'identifier et de suivre les tempêtes de sable à l'Est de la Méditerranée grâce à l'analyse satellitaire.

1. Données et Méthodes

1.1. Le capteur MODIS Terra/Aqua

Dans le but de détecter les tempêtes de sable, la télédétection, grâce aux images MODIS Terra/Aqua, s'avère être un outil intéressant. Le Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, que l'on peut traduire en français par « Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne ») est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un système embarqué satellitaire, lancé par la NASA à bord du satellite Terra en 1999, puis à bord du satellite Aqua (deux satellites de l'EOS - Earth Observing System, un programme

de la NASA destiné à l'observation à long terme des sols, biosphère, atmosphère et océans de la Terre) (BRIDHIKITTI,2011).

MODIS observe le rayonnement spectral dans 36 bandes de longueurs d'onde, allant de 0,412 à 41,2 mm, avec des résolutions spatiales de 250 à 1 km. Depuis l'orbite polaire (700 km), MODIS observe une bande de 2300 km de large, fournissant une couverture quasi quotidienne de la surface et de l'atmosphère de la Terre. Cette combinaison d'andain, de résolution et d'informations spectrales est suffisamment importante pour permettre une récupération statistique des aérosols. En agrégeant les pixels de résolution plus fine, MODIS peut séparer les pixels de ciel nuageux et clair afin qu'il y ait suffisamment de signal pour récupérer de manière cohérente et précise les propriétés des aérosols sur une résolution de 10 km sur 10 km.

1.2. L'épaisseur optique d'aérosols (AOD)

La profondeur optique des aérosols (AOD ou épaisseur optique des aérosols) est une mesure de l'extinction du faisceau solaire par la poussière et la brume. Les aérosols dispersent et absorbent la lumière solaire entrante, ce qui réduit la visibilité. Elle indique le niveau auquel les particules dans l'air empêchent la lumière de traverser l'atmosphère. Il s'agit d'un nombre sans dimension qui est lié à la quantité d'aérosols dans la colonne verticale de l'atmosphère au-dessus du lieu d'observation. La concentration de particules d'aérosol en mode fin est élevée au-dessus de la ligne de base par les activités anthropiques (fumée ou pollution urbaine), tandis que la poussière ou les embruns augmentent le mode grossier (KAUFMAN *et al.*, 2001).

L'épaisseur optique des aérosols (AOD) est largement reconnue comme un indicateur critique dans la compréhension de la physique atmosphérique et de la qualité de l'air dans la région en raison de sa capacité de quantification des particules dans l'atmosphère. Pour un observateur au sol, un AOD inférieur à 0,1 est « propre » - caractéristique d'un ciel bleu clair, d'un soleil éclatant et d'une visibilité maximale. Lorsque l'AOD augmente à 0,5, 1,0 et dépasse 3,0, les aérosols deviennent si denses que le soleil est obscurci. Elles sont en suspension dans l'air car leur vitesse de chute est très faible et leurs trajectoires suivent sensiblement l'écoulement de l'air. On peut distinguer l'AOD de tempêtes de sable des autres aérosols par le couplage des images avec des facteurs météorologiques caractéristiques de tempêtes de sable (température, humidité, pression, vent).

Ainsi, la première étape de notre approche consiste à extraire des images satellitaires MODIS concernant les tempêtes de sable qui ont touchées le Liban entre 2012 et 2017(plusieurs images pouvant concerner l'épisode retenu). Un premier repérage à l'œil nu (un panache de poussière sur la région) a permis de retenir la séquence. Au final, 335 images ont été sélectionnées parmi les produits de MOD04 (TERRA) et MYD04 (AQUA) puis traitées sur la période considérée. La valeur maximale de l'AOD de l'épisode a été retenue.

1.3. Hysplit (Représentation des trajectoires de chaque tempête de sable)

Il a été possible d'identifier les jours de tempêtes de sables et de remonter à leur origine grâce au « NOAA Hysplit trajectory model ». Celui-ci est utilisé dans diverses simulations décrivant le transport atmosphérique, la dispersion et le dépôt de polluants et de matières dangereuses (STEIN et DRAXLER, ROLPH, STUNDER, COHEN, NGAN, 2016) Le calcul des rétro-trajectoires a permis d'identifier l'origine de chaque tempête de sable pour chacun des cas retenus. Cette information a permis de procéder à une classification par origine et par période.

1.4. Classification

Les séquences retenues et analysées, sur une période de 6 ans, nous ont permis de procéder à une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) de ces événements selon les caractéristiques spatiales et temporelles des différentes tempêtes de sable.

Le jeu de données porte sur un ensemble d'individus en ligne décrits par un ensemble de variables en colonnes. Nous avons donc 335 épisodes de tempêtes de sable (caractérisés par leur origine, l'AOD) et 8 variables météorologiques. L'accès aux données climatiques étant limité au Liban (données inexistantes, difficulté à les obtenir, stations fonctionnant de manière discontinue), nous nous sommes basés sur le site https://www.wunderground.com/ pour acquérir les informations concernant la température, l'humidité et la pression La base de données est finalement intégrée dans le logiciel SPSS (« Statistical Package for Social Sciences »), un logiciel spécialisé de traitement statistique des données.

2. Classification des tempêtes

Les tempêtes de sable peuvent être des phénomènes régionaux ou locaux. Le Liban, compte tenu de ses caractéristiques géographiques, ne génère pas de tempêtes de sable. Il est, par conséquent, soumis à des phénomènes régionaux. Quelle que soit l'origine du *khamsin*, au moment où cet événement a lieu, le Liban connaît une élévation de la température et une baisse importante de l'humidité relative. Quatre catégories principales ont été identifiées par l'analyse CHA et cartographiées selon l'origine des tempêtes de sable.

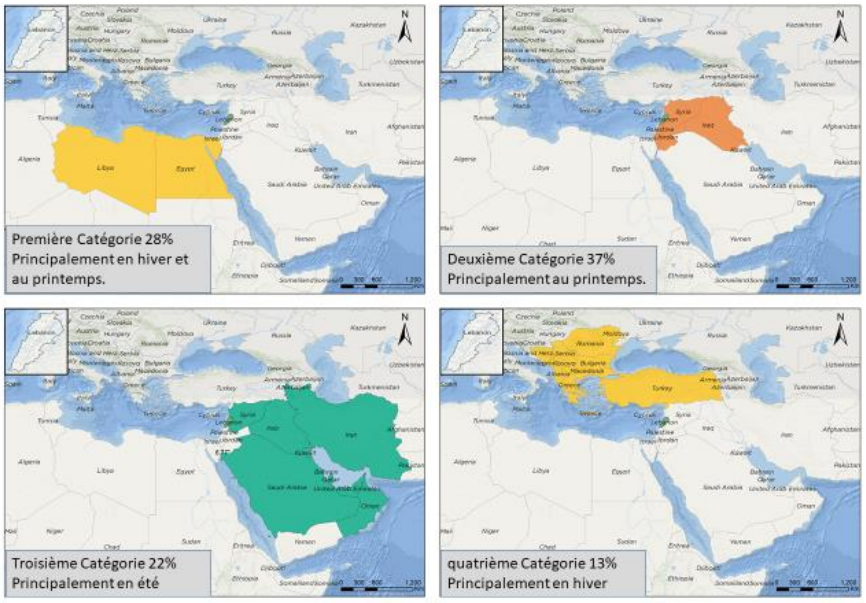


Figure 1. Classification des tempêtes de sable au Liban selon leur origine.

2.1. Première Catégorie

41% des événements de *khamsin* sont originaires de l'Afrique du Nord (principalement de Libye et d'Égypte). Ils surviennent principalement en hiver et au printemps. Des recherches basées sur 1'analyse de données météorologiques et de télédétection ont montré que les lithométéores sahariens sont fréquemment transportés sur plusieurs milliers de kilomètres (OZER, 2000). Il faut toutefois constater que le transport de poussières éoliennes sur de longues distances a considérablement augmenté durant ces vingt dernières années. En effet, la source est importante : le désert du Sahara est le plus grand du monde avec une superficie de 7,77 M

km² à laquelle il faut rajouter les 1,68 M km² du désert de Libye (en réalité, une continuation du Sahara). Il totalise environ 9,5 M km², à peu près 30 % de la superficie de l'Afrique.

2.2. Deuxième Catégorie

37% des tempêtes se produisent principalement au printemps et viennent surtout du Moyen-Orient : Ouest de l'Irak, Syrie, Jordanie, nord de la Palestine. Elles correspondent à un temps caniculaire, caractérisé par des températures anormalement élevées (par exemple, 41,3°C le 9 juin 2002 à Beyrouth).

2.3. Troisième Catégorie

22% des tempêtes, les plus fréquentes en été, sont originaires du nord-est de l'Irak, de la Syrie, du golfe Persique et du sud de la péninsule arabique. La fréquence de ces événements a augmenté de façon drastique au cours de la dernière décennie et elle s'accroit continuellement. L'une des principales causes du développement des tempêtes de sable et de poussière est le changement climatique dans la région, Comme il a été mentionné dans l'article publié par le Ministère des Affaires étrangères des Pays-Bas concernant le Profil du changement climatique – Irak (avril 2018) en particulier la diminution du taux annuel de pluie, outre les changements environnementaux, tels que l'assèchement des marais, la dégradation des terres et la désertification.

2.4. Quatrième catégorie

Finalement, il arrive (mais dans une moindre mesure) que le Liban connaisse des tempêtes de sable dont l'origine serait la Turquie et l'Europe. En réalité, l'origine principale est le Sahara et le désert de Gobi ; La masse d'air traversant le continent européen. Elles se produisent principalement en hiver. Elles ont alors les mêmes caractéristiques que toutes les autres tempêtes.

Quelle que soit l'origine de ces masses d'air, les caractéristiques locales sont quasiment identiques : Elévation de la température, baisse importante de l'humidité relative (qui peut être inférieure à 20%) et une dégradation de la visibilité à cause des particules en suspension.

Conclusion

L'un des problèmes majeurs des tempêtes de sable est la réduction considérable de la visibilité qui accompagne ces types de temps et qui limite fortement les activités humaines. La littérature scientifique consacrée à ce genre de phénomènes évoque un impact environnemental lié à une réduction de la fertilité du sol, des dommages aux cultures, une réduction du rayonnement solaire (matérialisé par une inefficacité des dispositifs produisant de l'énergie solaire). On note aussi des dommages liés aux télécommunications et aux systèmes mécaniques, ainsi qu'une forte dégradation de la qualité de l'air (augmentation sensible de la pollution par les PM 10 et PM 2.5). Enfin, durant ces évènements, une hausse sensible des consultations médicales pour pathologies respiratoires est observée (AL-JUMAILY, IBRAHIM, 2013).

L'enquête temporelle et spatiale menée sur les évènements observés au Liban montre une occurrence de plus de 55 cas/an, en moyenne (d'où le nom de *khamsin* qui signifie 50). Situé à la lisière des zones arides et semi-arides, le pays observe ces types de temps selon des origines multiples, avec une forte fréquence pour les événements venus de l'Afrique du Nord.

Cette étude n'a pu se faire que grâce à une analyse par image satellitaire. Cette première recherche n'est qu'une approche exploratoire d'un phénomène qui mériterait d'être mieux connu et mieux observé (tendance, intensité, conséquences, facteurs favorisant son apparition,). Ceci permettra de mieux gérer et prévenir les conséquences environnementales et économiques

liées à ce genre de type de temps qui est en nette recrudescence et notamment pour la trajectoire est et sud-est.

Bibliographie

Adjizian-Gérard J., Zaarour R., Badaro-Saliba N., Traboulsi M., Gérard P.C., Bakhache C., Kehdy N., El Ess F., 2013. Beyrouth face à l'aridification du climat. *Sécheresse* volume 24, 214–223.

Al-Jumaily K., Ibrahim M., 2013. Analysis of synoptic situation for dust storms in Iraq. *International Journal of Energy and Environment* Volume 4, Issue 5, 851 858.

Cooke K., 2016. Des températures élevées rendront invivables le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord. *Middle East Eye*, edition francais, p.311.

Hamidi M., Kavianpour M. Shao Y., 2012. Synoptic Analysis of Dust Storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* Volume 49, Issue 3, 279–286.

Kergomard C., 2002. *La télédétection aéro-spatiale une introduction*. *An Earth Resource Perspective* 2eme édition, 318-320.

Kaufman J.Y., *al.*, 2001. Baseline maritime aerosol: methodology to derive the optical thickness and scattering properties. *Geophysical Research Letters*, Volume 110, 3251-3254.

Maheras P, Blanche G., 1980. Le temps au Liban. Approche d'une climatologie synoptique. *Méditerranée*, troisième série, tome 40, 91- 94.

Ministry of Foreign Affairs of the Netherlands, 2018. Climate Change Profile - Iraq. URL : https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Iraq_3.pdf /.

Bridhikitti A., 2011. Applications of moderate-resolution remote sensing technologies for surface air pollution monitoring in Southeast Asia. *All Dissertations*, Tiger Prints, p.737.

Nouaceur Z., 2004-2005. Les Vents De Sable En Afrique Saharienne Et Subsaharienne. *The Annals of Valahia University of Târgovişte*, Geographical Series, Tome 4-5, 463-470.

Ozer P., 2000. Les Lithométéores En Région Sahélienne : Un indicateur Climatique De La Désertification. *Sècheresse* volume 4, 179-200.

Stein A.F., Draxler R.R, Rolph G.D., Stunder B.J. B, Cohen M.D, Ngan F., 2016. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *American Meteorological Society* volume 96, 2059-2077.

Traboulsi M., Boubaker H., 2012. Fortes Chaleurs Et Circulation Atmosphérique Associée Autour De La Méditerranée Orientale : Cas Du Littoral Tunisien Et Syro-Libanais. *Territoire en mouvement*, volume 2, 106-119.

VARIABILITE INTERANNUELLE DE LA PLUVIOMETRIE AU POSTE DE BIGNONA DE 1950 A 2018 (SENEGAL)

DIALLO M.M.[1], DAHECH S.[2], SY B.A.[3]

1 Laboratoire Géomatique et Environnement, Université Assane Seck Ziguinchor, Ziguinchor, Sénégal (rouanelodial2@yahoo.com)
2 Laboratoire PRODIG Université Paris Diderot, Paris, France
3 Laboratoire Leidi Université Gaston Berger de Saint-Louis, Saint-Louis, Sénégal

Résumé : *L'objectif de ce travail est de comprendre la variabilité interannuelle de la pluviométrie à différente échelle temporelle emboitées (année, saison, mois,) et regarder ses impacts sur les écoulements en surface et les activités agricoles. Pour répondre à cette problématique nous partons des données quotidiennes et mensuelles enregistrées de 1950 à 2018 au poste de Bignona. Les traitements statistiques préliminaires montrent deux périodes : une période humide et une période moins arrosée. La première s'étale de 1950 à 1967 avec une pluviométrie moyenne de 1504 mm et un coefficient de variation de 20%. La période moins arrosée s'étend de 1968 à 2018, la moyenne pluviométrique de cette période est de 1130 mm avec un coefficient de variation de 27%. Le test de Mann Kendall confirme la tendance à la baisse des précipitations. A l'échelle mensuelle, cette baisse est plus significative durant les mois d'octobre et septembre.*

Mots clés : *Bignona ; précipitations ; changements climatiques ; agriculture*

Summary: ***Inter-annual variability of rainfall at the Bignona station from 1950 to 2018 (Senegal).*** *The purpose of this work is to understand the interannual variability of the rainfall at different time scale nested (year, season, month) and watch its impacts on surface flows and agricultural activities. To answer this problematic, we start with daly and monthly data recorded from 1950 to 2018 at the Bignona substation. Preliminary statistical processing shows two periods: a wet period and a less watered period. The first spread from 1950 to 1967 with an average rainfall of 1504 mm and a coefficient of variation of 20%. The least watered period extends from 1968 to 2018, the average rainfall for this period is 1130 mm with a coefficient of variation of 27%. Mann Kendall test confirms downward trend in precipitation. On a monthly scale, this decrease is more significant during the months of October and September.*

Key words: *Bignona; precipitation; climatic changes; agriculture*

Introduction

La pluviométrie, un élément primordial qui occupe une place centrale dans les sociétés humaines en Afrique de l'ouest. Au Sénégal, l'agriculture dépend principalement du régime pluviométrique. Par ailleurs l'agriculture constitue la principale source de revenu de la population rurale (Ba, 2019). Face aux effets des changements climatiques, la population rurale se sent menacée. La variabilité temporelle des paramètres pluviométriques présente différentes évolutions en fonction des régions (Gnanglè *et al.*, 2011). En Casamance, les conditions climatiques sont les principaux facteurs de la production vivrière et de l'activité commerciale (Bodian, 2014).

L'objectif de cette communication est de comprendre la variabilité interannuelle de la pluviométrie au poste pluviométrique de Bignona à différente échelle temporelle emboitées (année, saison, mois) et d'observer ses impacts sur les écoulements en surface et les activités agricoles.

1. Données et méthodes

1.1. Données

Les données climatiques sur la pluviométrie, utilisées sont obtenues au poste pluviométrique de Bignona et concernent des enregistrements de pluie à l'échelle mensuelle de 1950 à 2018. Ce poste se situe à 12.79N et 16.23W. Cependant, la série présente des lacunes pour quelques années (1,4%). Pour corriger ces lacunes, les données pluviométriques de la station

météorologique de Ziguinchor située à 12.55N et 16.27W, sont choisies pour faire des corrélations afin de remplacer les années manquantes. Les données correctionnelles utilisées sont des données GPCC PLUIE de Bignona et de Ziguinchor téléchargées sur le site de PRODIG, et des données obtenues à la station météorologique de Ziguinchor.

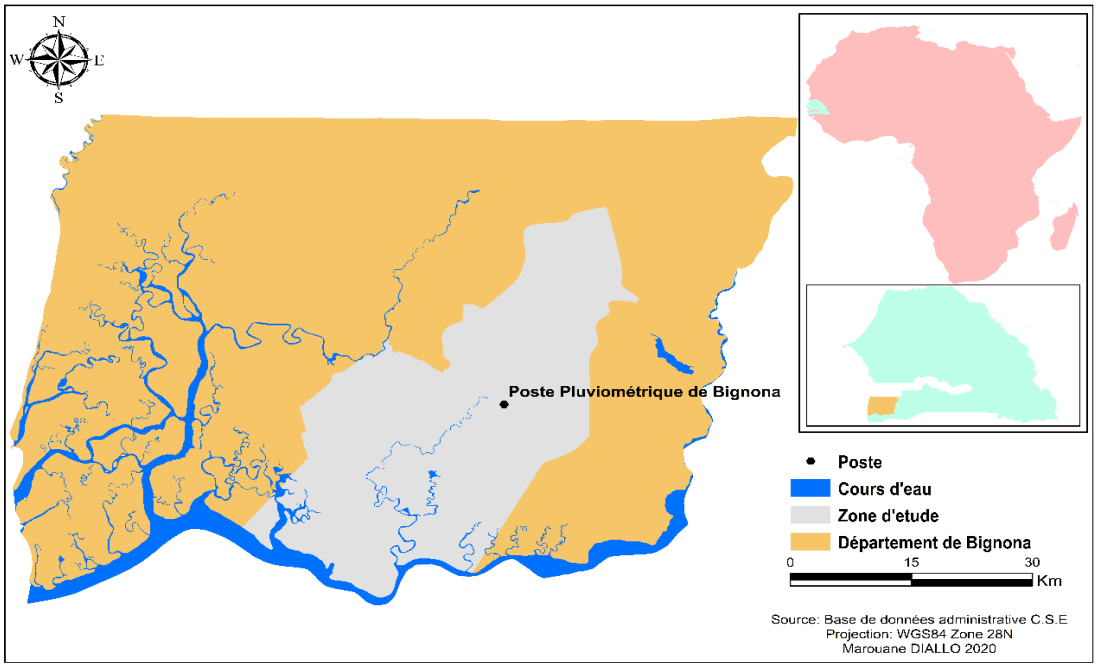


Figure 1. Carte de localisation du poste pluviométrique de Bignona

1.2. Méthodes

La méthode de traitement des données pluviométriques s'articule autour de deux grands points : le prétraitement et le traitement proprement dit.

Le prétraitement est la phase de préparation des données pluviométriques et celle-ci requière plus d'attention et de vigilance. C'est durant cette étape qu'il faut identifier les forces et les faiblesses de la série pluviométrique en vue d'apporter des corrections nécessaires pour la phase ultime. Ainsi les données aberrantes et les lacunes sont décelées. Les données aberrantes ce sont les données qui ne relatent pas les réalités du milieu. Tandis que les lacunes résument les données manquantes de la série. En outre, des tests d'homogénéité de la série sont appliqués pour faire ressortir les ruptures statistiques au niveau de la série des pluies enregistrées par le poste de Bignona de 1950 à 2018. Les tests sont appliqués à deux échelles de temps (annuelle et mensuelle), sont les tests d'homogénéité de Pettitt et Buishand. Pareillement, les fiches métadonnées de la station sont examinées. Les intensités des précipitations ainsi que de la sécheresse sont examinées en calculant des seuils (90%, 95%, et 99%) statistiques adaptés au contexte climatique local.

Le test de Man Kendall a été appliqué pour étudier la tendance des précipitations.

2. Résultats

2.1. La pluviométrie à Bignona de 1950 à 2018

La pluviométrie a connu une variabilité remarquable dans le département de Bignona, cette dernière est observée à différentes échelles : annuelle et mensuelle. Par ailleurs, cela a affecté le régime pluviométrique qui se caractérise par deux saisons : une saison sèche et une saison de pluie. La saison sèche dure sept mois de Novembre à Mai, et la saison de pluie occupe cinq

mois de Juin à Octobre. Ainsi, deux périodes ont été identifiées dans la série pluviométrique (1950-1967 et 1968-2018). Les pluies moyennes mensuelles enregistrées au cours de la période 1950-1967 est revue à la baisse durant la période 1968-2018, et cela est remarquable sur tous les mois de la saison de pluie (Fig.2).

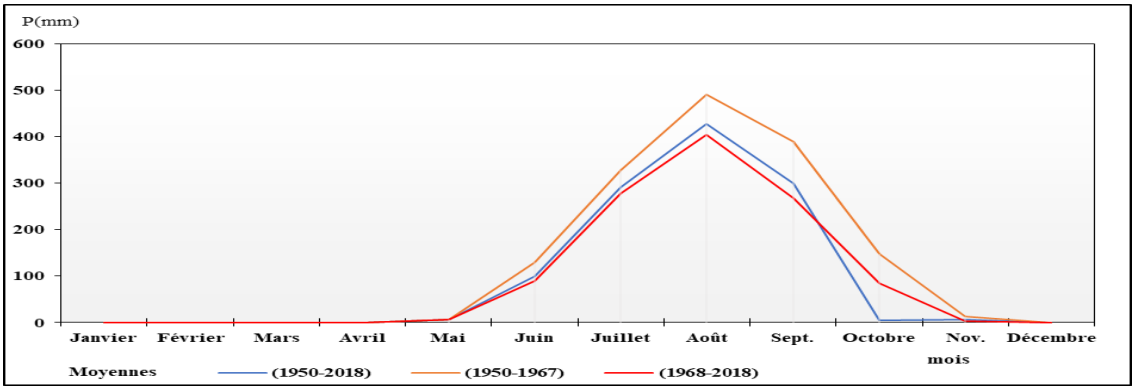


Figure 2. Comparaison du régime pluviométrique annuel moyen sur deux périodes à Bignona

2.1.1. Les changements à l'échelle annuelle

Les tests d'homogénéité de Pettitt et de Buishand appliqués aux seuils de 90%, 95% et 99%, ont permis de détecter une rupture dans les données, une date à partir de laquelle nous avons noté un changement dans la série pluviométrique. Cette rupture est intervenue en 1967, divisant la série en deux périodes, une de 1950 à 1967 et une autre de 1968 à 2018. La première période est humide (avec une moyenne de 1504 mm et un coefficient de variation de 20%) et la deuxième période est moins arrosée (avec une moyenne de 1130 mm et un coefficient de variation de 27%) (Fig.3). Cette rupture est intervenue à la veille du début de la sécheresse des années 1970, qui a secoué tout le système hydrologique et agricole de la région (Sané *et al.*2011, Prade *et al.*1990, Albergel *et al.*1996). Par conséquent, les conditions pluviométriques du département de Bignona sont toujours sous influence des périodes de sécheresse (1970 et 1980). D'ailleurs, le test de tendance de Mann-Kendall confirme la baisse des précipitations dans la zone (Tab.1).

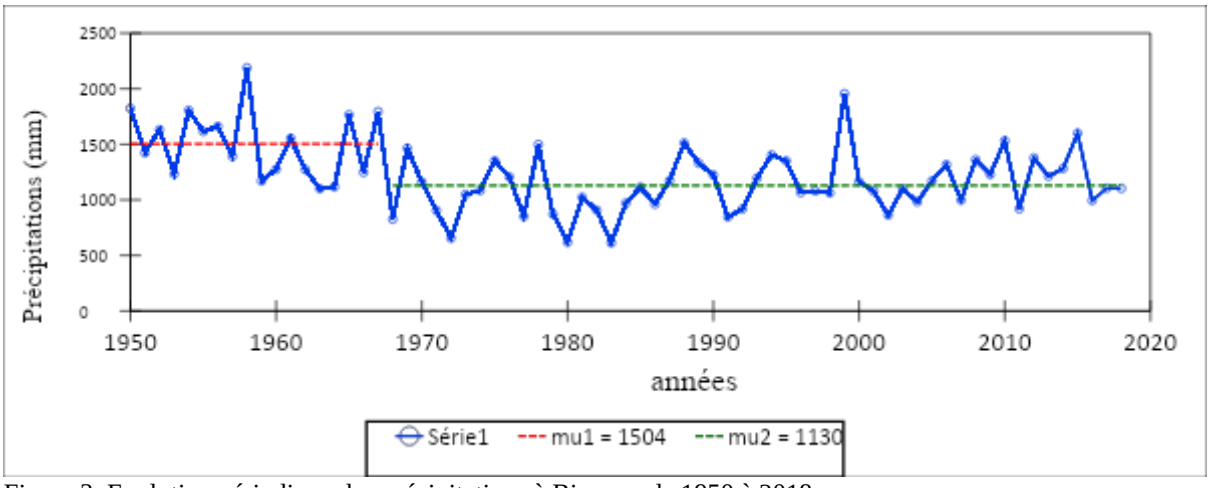


Figure 3. Evolution périodique des précipitations à Bignona de 1950 à 2018

Tableau 1. Valeur de la pente de tendance pluviométrique à Bignona de 1950 à 2018

	Valeur	Borne inférieure	Borne supérieure
Pente	-3,887	-4,000	-3,769

En effet, pour mieux appréhender les impacts des changements climatiques sur les précipitations, des tests de rupture et de tendance ont été appliqués à l'échelle mensuelle. Et ces tests concernent les mois susceptibles d'enregistrer des quantités de pluie.

2.1.2. Les changements à l'échelle mensuelle

Pour comprendre l'évolution des précipitations de 1950 à 2018, les bulletins mensuels de pluviométrie sont examinés afin de déceler les mois les plus affectés par la variabilité climatique.

Les tests d'homogénéité de Pettitt et Buishand appliqués aux seuils de 90%, 95% et 99% ont permis de caractériser l'évolution de la pluviométrie des mois pluvieux et de détecter ceux qui ont connu une rupture durant la période 1950-2018. Toutefois, les mois de septembre, octobre, et novembre ont enregistré une rupture dans les données. Pour septembre, d'après les tests de Pettitt et de Buishand cette rupture est intervenue en 1967 alors qu'elle est relevée en 1969 pour octobre. Cependant, en novembre, la rupture est notée en 1965 par Pettitt et en 1978 par Buishand.

Par conséquent, nous notons deux périodes pour les mois qui ont connu des ruptures dans les données. Ainsi, septembre se caractérise par une période humide de 1950 à 1967 avec une moyenne de 389mm et d'une période moins arrosée de 1968 à 2018 enregistrant une précipitation moyenne de 266mm. Cependant, pour octobre la première période, moins arrosée s'étend de 1950 à 1969 et a enregistré une pluviométrie moyenne de146mm, et la deuxième période est considérée comme relativement sèche, de 1970 à 2018, avec une précipitation moyenne de 81mm. Le mois de novembre se caractérise par quatre périodes distinctes : deux pour le test de Pettitt et deux pour le test Buishand.

Les deux périodes déduites par le test de Pettitt : la première période considérée comme aride s'étend de 1950 à 1965 et a enregistré une pluviométrie moyenne de 14mm ; la deuxième période plutôt hyper-aride, de 1966 à 2018, durant laquelle la précipitation moyenne est de 3mm.

D'après le test de Buishand, la première période aride s'étend de 1950 à 1978 avec une pluviométrie moyenne de 11mm ; alors que la deuxième période très aride, de 1979 à 2018 totalise des précipitations moyenne mensuelle de 1mm (Fig.4).

Le test de tendance de Mann-Kendall confirme la tendance à la baisse de la pluviométrie mensuelle durant les mois les plus arrosés de l'année. En effet, les mois de septembre et d'octobre sont les plus impactés (Tab.2).

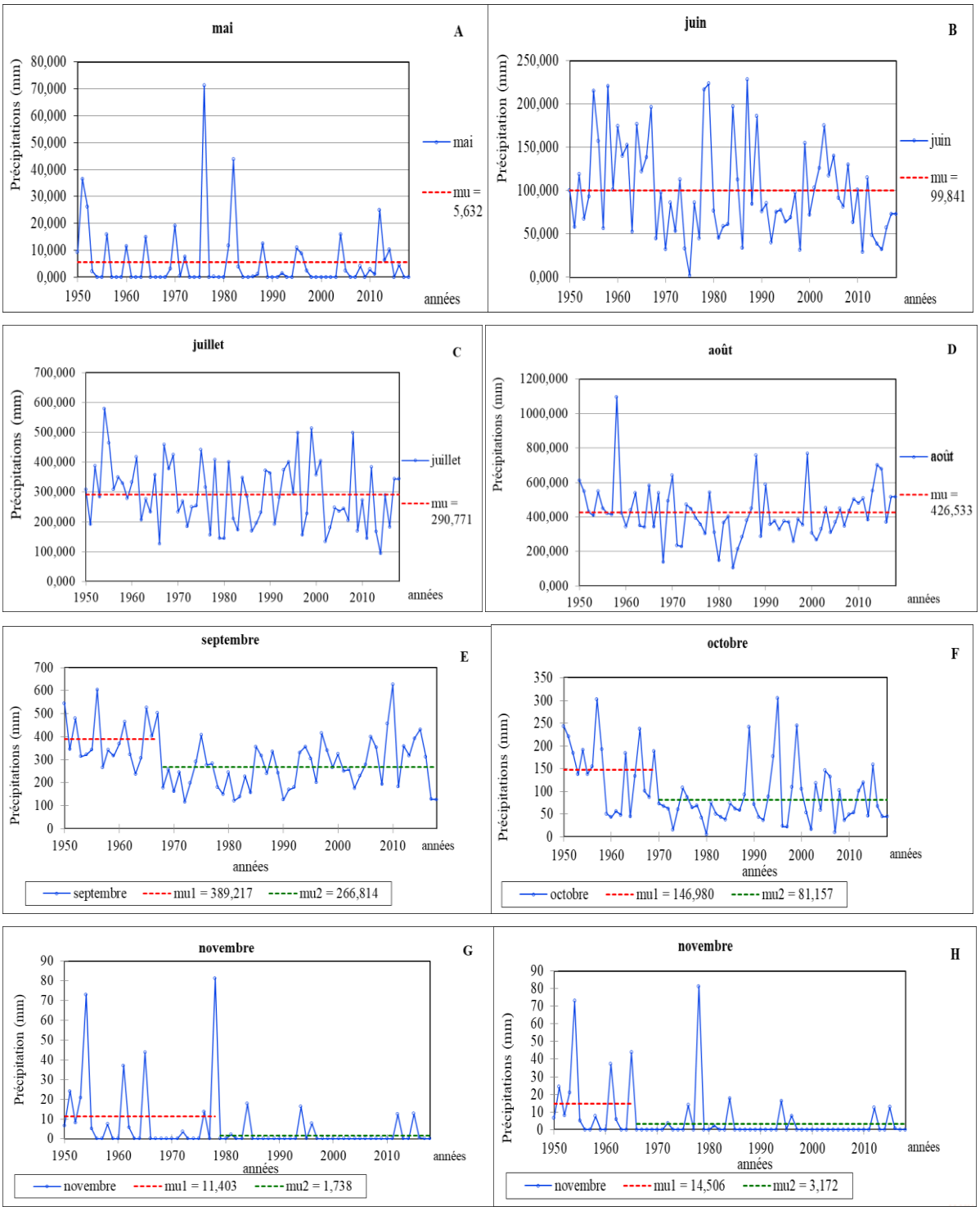


Figure 4. Evolutions périodiques et interannuelles des précipitations mensuelles à Bignona de 1950 à 2018 (A, B, C, D, E, F, G, H)

Tableau 2. Valeur de la pente des tendances mensuelles de la pluviométrique de 1950 à 2018

	Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre			Octobre			Novembre		
	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS	Valeur	BI	BS
Pente	0,000	0,000	0,000	-0,522	-1,202	0,059	-1,223	-2,419	0,215	-0,065	-1,711	1,545	-1,068	-2,631	0,406	-0,889	-1,744	-0,194	0,000	0,000	0,000

BI : Borne inférieure ; BS : Borne supérieure

Conclusion

Avant de commencer les traitements un travail conséquent de prétraitement et préparation de la base de données a été élaboré. Les données manquantes ont été remplacées en s'appuyant sur des données GPCC et celles relevées dans la station la plus proche : Ziguinchor.

Les différents traitements statistiques appliqués aux données pluviométriques ont permis de comprendre l'évolution des précipitations à une échelle locale. Ainsi, les tests d'homogénéité de Pettitt et Buishand ont permis de détecter la date à partir de laquelle la rupture est intervenue dans la série pluviométrique et d'identifier la période humide et la période moins arrosée. Le test de Mann-Kendall a permis la démonstration de la tendance à la baisse des précipitations à Bignona, une situation qui affecte le système agricole et fragilise le système hydrologique.

Les changements climatiques sont une réalité dans le département de Bignona. En effet, ils ont des impacts sur les quantités de pluie précipitées dans cette partie de la région de Ziguinchor où les activités agricoles en dépendent fortement.

Et par conséquent, nous avons observé deux périodes d'évolution des précipitations : une période humide de 1950 à 1967 et une période moins arrosée de 1968 à 2018. D'ailleurs, la tendance globale des précipitations est à la baisse dans le département de Bignona. Septembre et octobre sont les plus impactés par les changements climatiques.

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à toute l'équipe PRODIG pour tout le soutien logistique et documentaire qui a rendu possible la réalisation de cet article.

Bibliographie

Albergel J, et Dacosta H., 1996. Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal. URL : iahs.info/redbooks/a 238/iahs_0139.pdf.

Bodian A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, volume 8.

Demba Ba B., 2019. *Dynamiques spatio-temporelles des paysages et développement local dans le département de Bignona (Basse-Casamance septentrionale, Sénégal).* 314p.

Gnanglè C.P., Glélé Kakaï R., Assogbadjo A.E., Afouda Yabi J. et Sokpon N., 2011. Tendances climatiques passées, modélisation, perception et adaptations locales au Bénin. *Climatologie,* vol 8.

Prade K., *et al.*, 1989-1990. Relations entre les propriétés des sols des rizières inondées et la toxicité ferreuse en basse Casamance (Sénégal), Cahiers de l'ORSTOM, série Pedol., vol.xxv, n°4, 453-474, disponible sur horizon, URL : documentation.ird.fr/ex-doc/plein textes/cahiers/PTP/34145.pdf.

Sané T., *et al.*, 2011. Changement climatique et vulnérabilité de la ville de Ziguinchor. 14p. URL : www.univ-metz.fr/recherche/labos/cegum/2R2CV/Actes/SANE-SY-DIEYE.pdf.

EVOLUTION DES BIOCLIMATS LOCAUX FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN TUNISIE. CLASSIFICATION BIOCLIMATIQUE MONDIALE ET METHODE DE CLUSTERING

DJELLOULI Y., MESSNER F., LOUAIL A.

ESO-UMR 6590, Le Mans Université, Le Mans, France (francois.messner@univ-lemans.fr)

Résumé : *Nous avons appliqué au cas de la Tunisie, la classification bioclimatique de Rivas Martinez (WBCS), ainsi qu'une méthode de clustering employant la technique du Dynamic Time Warping (DTW) sur des données raster haute résolution CHELSA. Ces dernières sont modélisées à l'époque actuelle (1979-2013), dans le passé (dernier maximum glaciaire) par le programme PMIP, et pour le futur (2041-2060) par le programme CMIP. Les climats locaux déterminés par clustering emploient cinq variables climatiques mensuelles (T, T max, T min, P, PET) sous forme de séries temporelles. Nos résultats montrent que les deux méthodes soulignent une différentiation dans la répartition spatiale des bioclimats pour la même époque. La classification WBCS permet d'établir une comparaison inter époque qui se traduit par le décalage d'au moins un étage bioclimatique et l'aridité se propage rapidement dans le temps. Il aurait fallu des siècles pour passer du semi-aride à l'aride, le pas du temps passe de l'échelle millénaire au décennal, ce qui est en adéquation avec le changement climatique.*

Mots clés : *classification bioclimatique ; clustering, Tunisie ; changements climatiques*

Summary: ***Evolution of local bioclimates in the face of climate change in Tunisia. Global bioclimatic classification and clustering method.*** *We have applied to the case of Tunisia, the Rivas Martinez Bioclimatic Classification (WBCS), as well as a clustering method using the Dynamic Time Warping (DTW) technique on high-resolution CHELSA raster data. The latter are modelled at the present time (1979-2013), in the past (last glacial maximum) by the PMIP program, and for the future (2041-2060) by the CMIP program. Local climates determined by clustering use five monthly climate variables (T, T max, T min, P, PET) in the form of time series. Our results show that both methods highlight a differentiation in the spatial distribution of bioclimates for the same time period. The WBCS classification allows an inter-period comparison that results in the shifting of at least one bioclimatic stage and aridity propagates rapidly over time. It would have taken centuries to go from semi-arid to arid, the time scale goes from millennium to decadal, which is adequate with climate change.*

Keys words: *bioclimatic classification; clustering, Tunisia; climate change*

Introduction

Une mise à jour cartographique dans le domaine de la bioclimatologie et de la biogéographie, implique de mettre en place au préalable une approche de spatialisation des bioclimats locaux, reflétant la diversité ou la similarité climatique à l'échelle du territoire. La comparaison de l'évolution de cette répartition indique, de manière synthétique, les lieux les plus vulnérables au changement climatique.

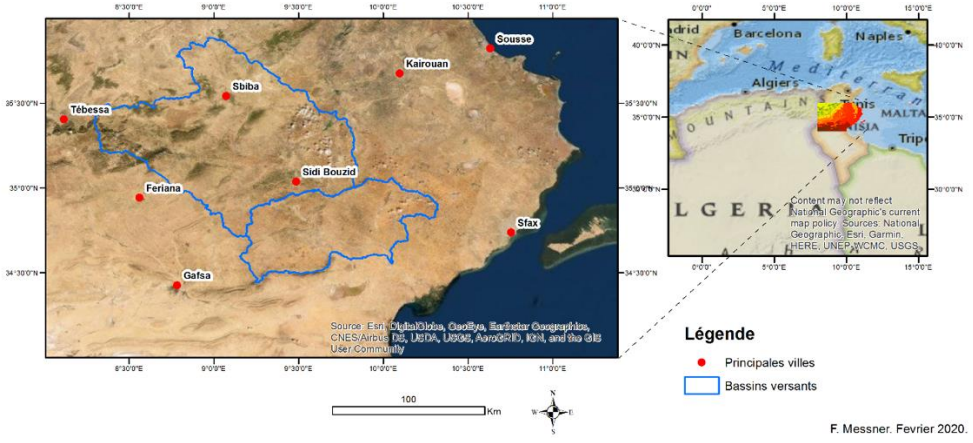


Figure 1. Carte de localisation de la Tunisie centrale

Nos travaux complètent ceux des auteurs ayant travaillé sur la biogéographie et la bioclimatologie de la Tunisie (Gammar, 2009). Ces méthodes ont été utilisées pour l'Est algérien (Djellouli *et al.* 2019 ; Louail *et al*, 2019) et ont donné des résultats probants.

1. Données et méthodes

1.1. Données utilisées

Au niveau de la Tunisie centrale, les données utilisées sont des rasters à haute résolution spatiale (1km) de séries temporelles climatiques CHELSA (*Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas*, Karger *et al.*, 2017). Ces données sont issues d'un redimensionnement spatial (downscaling) des estimations de températures et de précipitations à partir des ré-analyses climatiques ERA-INTERIM, corrigées des biais par des mesures de stations des réseaux d'archives *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) et *Global Historical Climatology Network* (GHCN). L'algorithme d'estimation de température est basé sur la réduction d'échelle statistique des températures atmosphériques. Celui des précipitations incorpore des prédicteurs orographiques, y compris les champs de vent, l'exposition des vallées et la hauteur de la couche limite, avec une correction de biais ultérieure.

Ces données sont fournies sous forme de séries temporelles de 4 variables climatiques mensuelles, qui sont : la température moyenne (Tm), la température moyenne minimale (Tmin), la température moyenne maximale (Tmax) et la somme des précipitations moyennes (Pm). L'évapotranspiration potentielle (PET) calculée mensuellement selon la méthode de Hargreaves (Trabucco *et al.*, 2008) vient compléter le jeu de données. Les modélisions ont été réalisées pour les trois périodes suivantes : (1) la période ancienne, au dernier maximum glaciaire (21000 ans Bp) à l'aide du programme PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) dérivé de modèle de circulation générale ; (2) la période considérée comme actuelle c'est-à-dire de 1979 à 2013 ; (3) la période future à l'horizon 2041-2060 suivant les données modélisées issues du CMIP5 (*Coupled Model Intercomparaison Project*). Le scénario de forçage radiatif RCP4.5 a été choisi. A ces cinq variables, s'ajoutent des extrêmes climatiques tels que la température minimale du mois le plus froid (m) et la température maximale du mois le plus chaud (M), estimées pour chaque période.

1.2. Classification bioclimatique

Plusieurs auteurs ont proposé des classifications bioclimatiques et/de végétations, basées à la fois sur les données climatiques (le plus souvent de précipitations et de températures) et les données de distribution spatiale des êtres vivants et plus particulièrement la végétation : Le Houerou (1969) Le Floch (1984), Rivas Martinez *et al.* (2011). Une nouvelle approche de stratification des bioclimats, complémentaire, a été développée (Metzger *et al.*, 2013). Elle repose sur une méthode de clustering, c.a.d. l'agrégation non supervisée de données multivariées à partir de critères d'homogénéité statistique entre les éléments d'un même groupe et d'hétérogénéité entre les différents groupes (Zscheischler *et al.* 2012).

1.2.1. Classification bioclimatique WBCS

Dans le cadre de cette étude, la classification bioclimatique de Rivas-Martinez WBCS (*Worldwide Bioclimatic Classification System*) a été testée (Rivas-Martínez *et al.*,2011). Cette classification consiste à appliquer des seuils hiérarchisés, par traitements d'algèbre spatiale conditionnelle sur des indices bioclimatiques, pour définir 4 unités bioclimatiques. Ces unités sont le macrobioclimat, le bioclimat, le thermotype et l'ombrotype. Les trois dernières unités peuvent être regroupées pour former une synthèse bioclimatique définissant une combinaison unique : l'isobioclimat (Rivas-Martinez *et al.*, 2011 ; Pesaresi *et al.*, 2014, Torregrossa *et al.*,

2013). Cette méthode est déclinable au niveau mondial avec cinq types de macro-bioclimats : polaire, boréal, tempéré, tropical et méditerranéen, où les seuils bioclimatiques ont été étroitement mis en relation avec la distribution phytogéographique (Fig.2).

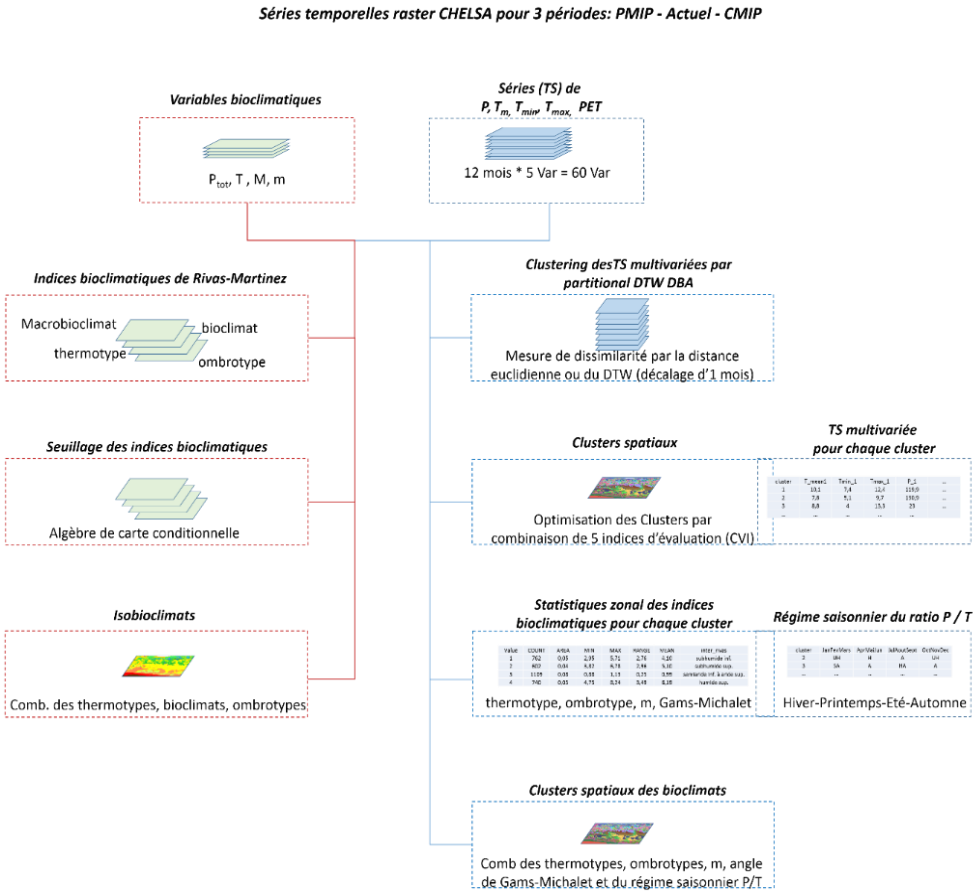


Figure 2. Schéma résumant les méthodes de classification bioclimatique. A gauche : classification WBCS. A droite : méthode de clustering DTW DBA interprété par indices bioclimatiques.

1.2.2. Classification bioclimatique par clustering DTW DBA

L'essentiel des méthodes de clustering appliquées à la classification des climats et bioclimats, emploient la méthode des K-means et CAH sur un ensemble multivarié d'indices climatiques dont la dimensionnalité a préalablement été réduite par une analyse en composantes principales (Zscheischler *et al.*, 2012 ; Metzger *et al.*, 2013). Dans ce cas, la représentation statistique du climat local en un lieu est un vecteur dans l'espace spectral nouvellement formé (Netzel et Stepinski, 2016). Ces auteurs, proposent une alternative méthodologique en modélisant le climat local comme une série temporelle cyclique (une séquence) de variables climatiques plutôt que comme un vecteur caractéristique de ces variables. La classification des climats ne s'effectue donc plus dans un espace spectral mais dans un espace des distances qui permet l'emploi de mesures de similarité entre deux séries temporelles. Celle-ci peut être mesurée par la distance euclidienne entre les éléments synchrones formant les séries temporelles multivariées ou par la distance du *Dynamic Time Warping* (DTW) qui permet de tenir compte du décalage temporel pouvant exister entre les éléments des séquences (Netzel et Stepinski, 2016). Un algorithme de clustering peut être appliqué pour regrouper les climats locaux en fonction de leur similarité et les associer à un centroïde, censé être représentatif d'un groupement. Nous retenons l'algorithme du *DTW Barycentric Averaging* (DBA), dont l'objectif est de positionner chaque élément de la séquence moyenne comme le barycentre des éléments de la séquence y étant associés par l'alignement du DTW (Petitjean *et al.*, 2011). Le

nombre de clusters est ensuite optimisé par l'évaluation d'indices de validité, tels que l'indice Silhouette, de Dunn, ou Davies-Bouldin (Arbelaitz *et al.*, 2013). L'étape du clustering a été effectuée à l'aide du package « dtwclust » disponible sous le logiciel R. Les clusters sont ensuite interprétés du point de vue bioclimatique, en calculant par analyse spatiale les statistiques zonales d'indices croisés avec l'étendue géographique des clusters. Les indices bioclimatiques retenus sont les ombrotypes et les thermotypes de Rivas-Martinez (2011), le minimum du mois le plus froid, m, (Daget, 1977), et l'angle de Gams modifié par Michalet (2018) qui renseigne sur le degré de continentalité pluviale. Le régime saisonnier du rapport P/T (Meddour, 2012) est aussi pris en compte pour distinguer les fines nuances au sein d'un cluster. La méthode est résumée dans la figure 2.

2. Interprétation et résultats bioclimatiques

2.1. Résultats et discussion des isobioclimats

Les résultats montrent qu'il y a 38 isobioclimats précis pour les trois périodes (Fig.3a).

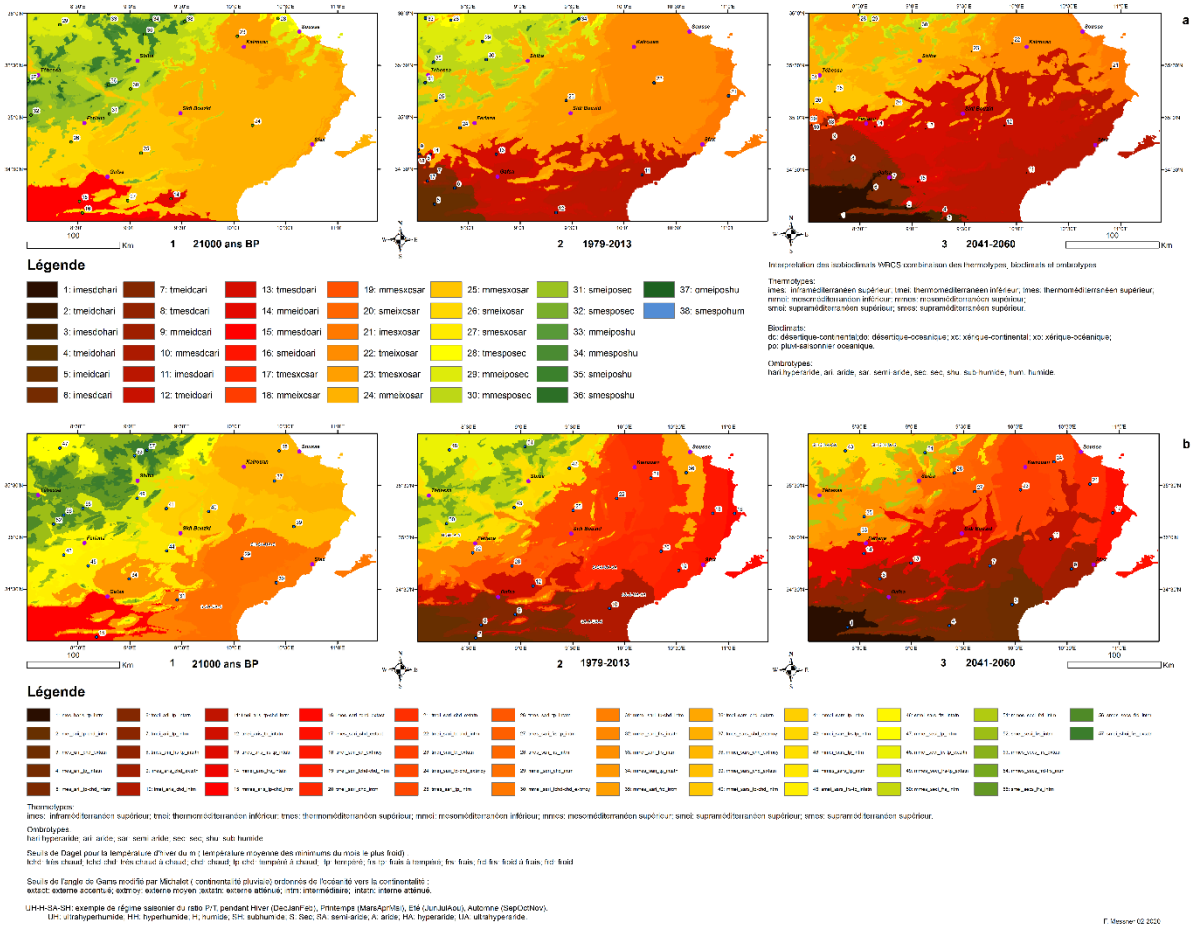


Figure 3. Carte des bioclimats pour les périodes anciennes (21000 BP), actuel (1979-2013) et futur (2041-2060).

La figure 3a1 indique qu'à la période 21000 Bp, la présence des isobioclimats humides (jebel Serj à 1350m) et subhumides supérieurs (jebel Chambi à plus de 1500m et jbel Mghilla à 1380m), se localisant au niveau des massifs montagneux. Cependant, les isobioclimats arides étaient relativement restreints, et l'isobioclimat hyperaride complètement absent. Si on compare avec la carte actuelle, les climats humides sont très réduits voire complètement inexistants tandis que les climats arides sont plus répandus.

La figure 3a2 montre que pour la période 1979-2013, l'isobioclimat humide a disparu, les isobioclimats subhumides et semi-arides persistent au niveau des sommets montagneux, tandis que l'aride s'étend vers le nord et à l'Est allant jusqu'au bord du littoral, et l'hyperaride apparaît dans la partie méridionale. La comparaison de l'ensemble de ces isobioclimats indiquent une bonne corrélation avec la répartition des formations végétales existantes sur le terrain (Gammar 2002).

La figure 3a3 montre l'apparition des isobioclimats hyperaride, plus étendus dans la partie sud des plaines de Sidi Bouzid, Fériana et même orientale dans la partie sfaxienne ainsi que les îles de Kerkenna. Un décalage de plusieurs isobioclimats, par rapport à la figure 3a2, apparait et où l'aridité est très marquée. Ceci annonce des impacts au niveau agricole et environnemental inquiétants et bien sûr des conséquences socio-économiques menaçantes.

2.2. Résultats et discussion des clusters

La méthode de clustering a permis de cartographier les résultats pour les trois périodes : ancienne, actuelle et future. L'évolution du bioclimat progresse vers une aridité croissante. Le bioclimat *semi-aride supérieur* (*Sec supérieur* sens de Rivas) apparaît pour la période ancienne uniquement, il colonise les massifs Chambi et Emguila (+1300 m). Ce cluster persiste au massif Serj pour la période actuelle et disparaît complètement dans le futur. Cela perturbe les écosystèmes naturels. Le bioclimat *semi-aride inférieur* (*Sec inférieur* sens de Rivas) apparaît à la période ancienne dès les premiers glacis au Sud de la Dorsale tunisienne, dès 900 m d'altitude. Ce cluster se retrouve à + 1200 m et se réduit largement à la période actuelle. Il persiste à + de 1300 m pour le futur. Le cluster *semi-aride supérieur* chaud avec une influence marine moyenne à atténuée, apparaît le long du Sahel (Sousse-Mahdia) pour la période ancienne. Il se retrouve dans sa variante tempérée à frais dans la plaine de Sidi Bouzid-Fériana vers 400 m. Il se réduit aujourd'hui au niveau du Sahel et à l'intérieur, occupant les premiers glacis vers 700 m. Ce cluster disparaît complètement dans le futur. Le *semi-aride inférieur* frais occupe le littoral et les basses steppes intérieures pour la période ancienne. Il remonte dans les hautes steppes au Sud de Fériana pour la période actuelle et s'étend plus au Nord pour le futur. Notons que seul le cluster *aride supérieur tempéré à chaud* demeure au Sud de Gafsa pour l'ancienne période. Le *semi-aride tempéré* s'étend au niveau des hautes steppes du Sud de la Dorsale, pour la période actuelle ; il remonte en latitude sur les glacis de la partie Nord-Est de la Dorsale tunisienne pour le futur. Quant au *semi-aride chaud à très chaud*, il occupe le Sahel pour la période actuelle et s'étend du littoral aux hautes steppes (région de Kérouan). Il remplace le *semi-aride supérieur* en totalité, montrant une aridité et un réchauffement qui s'accentuent. L'*aride supérieur tempéré* s'accentue en s'étendant vers les hautes steppes, passant de 200 m pour la période actuelle à 500 m d'altitude pour le futur et s'étend jusqu'au golfe de Gabès. Le cluster *aride inférieur très chaud à chaud* qui occupe actuellement les hautes steppes méridionales, s'étale jusqu'au golfe de Gabès et remonte en latitude au bassin de Sidi Bouzid. Enfin l'*hyperaride tempéré* n'existant pas à la période actuelle, occupe le Sud des hautes steppes. Ce cluster montre une intensification du climat qui aura de fortes conséquences.

Conclusion

Nos résultats montrent que les deux méthodes soulignent une différentiation dans la répartition spatiale des bioclimats pour la même époque. La classification WBCS permet d'établir rapidement une comparaison inter époque qui se traduit essentiellement par le décalage d'au moins un étage bioclimatique. La méthode DTW indique la similarité climatique qui se manifeste par une différentiation de l'étendue spatiale des climats locaux. Bien qu'il existe toujours une incertitude sur la fiabilité et l'unanimité des projections climatiques, notamment sur la quantification des changements, nos résultats, obtenus pour un scénario intermédiaire de

GES, peuvent attester que l'aridité se propage rapidement dans le temps et dans l'espace. Ceci aura des impacts sur la réduction de la végétation et sur la vulnérabilité des populations. Il aurait fallu quelques siècles pour passer du semi-aride à l'aride, aujourd'hui le pas du temps passe de l'échelle millénaire au décennal. Ceci est en adéquation avec le Changement climatique.

Bibliographie

Arbelaitz O., Gurrutxaga I., Muguerza J., Perez J. M., & Perona I., 2013. An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern Recognition*, 46(1), 243-256.

Daget P., 1977. Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio,* 34, 1-20.

Djellouli, Y., Louail A., Messner F., Missaoui K., et, Gharzouli R., à paraître 2020. *Les écosystèmes naturels de l'Est algérien face au risque du Changement Climatique. Colloque International de géographie physique*. Arlon, Belgique, géo-Eco-Trop, 1-16.

Gammar A.M., 2002. Végétation. Atlas National Tunisie, C.E.R.E.S., Tunis, Carte au 1/1 000000 + notice.

Karger D. N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann N., Linder P. H., Kessler M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*. 4, 10.1038/sdata.2017.122.

Le Houerou H. N., 1969. La végétation de la Tunisie steppique (1) (Structure, écologie, sociologie, répartition, évolution, utilisation, biomasse, productivité) (avec référence aux végétations analogues d'Algérie, de Libye et du Maroc). *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de la Tunisie*, 42, 622p.

Le Floch E., 1983. Contribution à une étude ethnobotanique de la flore tunisienne. Publ. Sci. tunisiennes, Programme flore et végétation tunisiennes, préface de M. Abdelhamid Nabli, Impr. off. Républi. Tunis.

Louail A., Messner F., Missaoui K., Djellouli Y. and Gharzouli R., 2019 Evolution of local bioclimates facing climate change in Algeria : mapping by global bioclimatic classification and clustering method. International Society for Ecological Modelling Global Conference 2019 (ISEM), Poster.

Meddour R., 2012. *Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie. Exemple Des Groupements Forestiers et Préforestiers de La Kabylie Djurdjuréenne.* Presses académiques francophones, 350p.

Metzger M. J., Bunce R. G., Jongman R. H., Sayre R., Trabucco A. and Zomer R., 2013, High-resolution bioclimate map of the world. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 630-638. Doi:10.1111/geb.12022.

Michalet R., 2018. L'importance de la continentalité hydrique dans les montagnes méditerranéennes : l'exemple du Maroc et de la Californie. *Ecologia mediterranea*, 44(2), 31-44.

Netzel P. & Stepinski T., 2016. On Using a Clustering Approach for Global Climate Classification. *Journal of Climate*, 29, 3387–3401.

Pesaresi S., Galdenzi D., Biondi E., Casavecchia S., 2014. Bioclimate of Italy: Application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 10, 538-553.

Petitjean F., Ketterlin A., Gancarski P., 2011. A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering. *Pattern Recognition*, 44(3), 678-693. ISSN: 0031-3203.

Rivas-Martínez S., Rivas-Sáenz S., Penas A., 2011. Worldwide Bioclimatic Classification System. *Global Geobotany*. 1, 1-638.

Torregrosa A., Taylor M. D., Flint L. E., Flint A.L., 2013. Present, Future, and Novel Bioclimates of the San Francisco, California Region. *PLOS ONE* 8 (3): e58450.

Trabucco A., Zomer R., Bossio D., van Straaten O., Verchot, L., 2008. Climate change mitigation through afforestation/reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies. *Agriculture Ecosystems & Environment*. Doi: https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.015.

Zscheischler J., Mahecha M.D., Harmeling S., 2012. Climate classifications: the value of unsupervised clustering. *Procedia Comput*., Sci.9, 897-907.

ELEVAGE INTELLIGENT FACE AUX MUTATIONS CLIMATIQUES DANS LA COMMUNE DE TCHAOUROU AU BENIN (AFRIQUE DE L'OUEST)

DJOHY L., SOUNON BOUKO B.

Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Université de Parakou, Parakou, Bénin (gildasdjohy@gmail.com)

Résumé : *L'élevage bovin est fortement menacé ces dernières années par les effets néfastes des mutations climatiques. Cette étude analyse les effets variables des mutations climatiques sur les relations entre production, adaptation et atténuation. Cette analyse repose sur des données qualitatives socio-anthropologiques issues d'enquêtes de terrain. Les résultats montrent que la hausse des températures (97 %), le début tardif de la saison pluvieuse (97 %), le prolongement de la saison sèche (96 %), la fin précoce de la saison pluvieuse (94 %), le raccourcissement de la durée de la saison pluvieuse (93 %) et la baisse pluviométrique (90 %) constituent les manifestations des paramètres climatiques les plus cités par les enquêtés. Cette instabilité climatique perturbe le système d'élevage à travers l'assèchement précoce des points d'eau et l'amenuisement des ressources fourragères. En réponse aux effets des mutations climatiques, les éleveurs ont développé diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation.*

Mots clés : *élevage ; mutations climatiques ; atténuation ; adaptation ; Tchaourou*

Summary: ***Intelligent cattle breeding in the face of climate change in Tchaourou district in Benin (West Africa).*** *Cattle farming has been seriously threatened in recent years by the harmful effects of climate change. This study analyzes the variable effects of climate change on the relationships between production, adaptation and mitigation. This analysis is based on qualitative socio-anthropological data from field surveys. The results show that the rise in temperatures (97%), the late start of the rainy season (97%), the extension of the dry season (96%), the early end of the rainy season (94%), the shortening the length of the rainy season (93%) and the drop in rainfall (90%) are the manifestations of the climatic parameters most cited by the respondents. This climatic instability disrupts the farming system through the early drying of water points and the reduction of available fodder. In response to the effects of climate change, farmers have developed various adaptation and mitigation strategies.*

Key words: *livestock; climate change; mitigation; adaptation; Tchaourou*

Introduction

Le changement climatique constitue un problème critique pour les éleveurs de bovins en Afrique de l'Ouest (Brooks, 2006). Il se manifeste par de fort déficit pluviométrique suivi d'une sécheresse généralisée, de la hausse des températures et du raccourcissement de la saison pluvieuse (Boko *et al.*, 2012). La qualité des pâturages naturels et les ressources en eau disponibles pour l'abreuvement des animaux connaissent une baisse considérable depuis plusieurs années (Djènontin *et al.*, 2009). La réduction des ressources pastorales contraint les éleveurs à un changement de système d'élevage en réponse aux mutations climatiques pour la survie du bétail (Camara, 2013 ; Chabi Toko, 2016). Ainsi, l'élevage intelligent constitue une démarche de transformation pastorale, d'adaptation et d'atténuation aux nouvelles conditions climatiques. La séquestration du carbone dans les sols, les sédiments et la biomasse représente un potentiel important d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Soussana *et al.*, 2010 ; Vayssières *et al.*, 2017) et des effets néfastes des changements climatiques (CGDD, 2019), ce qui renforce l'adaptation et la résilience des systèmes d'élevagede ruminants (Rigolot *et al.*, 2019). Il s'ensuit une gestion durable des pâturages et une amélioration de la production animale et des moyens d'existence (Djohy, 2019). Cette étude analyse les synergies possibles entre les objectifs de produire, d'atténuer et de s'adapter aux mutations climatiques. Elle est réalisée dans la Commune de Tchaourou située entre 8°48' et 9°36' de latitude Nord et 2°00' et 3°00' de longitude Est. La commune est soumise à un climat

de type sud-soudanien caractérisé par une saison pluvieuse et une saison sèche dont la moyenne pluviométrique annuelle varie entre 1100 et 1200 mm (Kora, 2006).

1. Données et méthodes

Cette étude propose de mettre en évidence les relations entre production, adaptation et atténuation aux mutations climatiques, en s'appuyant sur des données documentaires et des données socio-anthropologiques issues d'enquêtes de terrain dans la commune de Tchaourou. La méthode de collecte des données adoptée combine des entretiens individuels et collectifs ainsi que des observations réalisées dans les milieux agro-pastoraux de la commune de Tchaourou. Un total de 130 agro-éleveurs a étéenquêté à partir de la méthode d'échantillonnage raisonné et 26 troupeaux ont été partiellement suivis au pâturage. La production des bouses de vache de certains animaux a été suivie et quantifiée lors des travaux de terrain. Les données collectées concernent principalement la perception des agro-éleveurs sur les mutations climatiques et leurs effets sur les systèmes d'élevage, la mobilité des troupeaux et leur adaptation et les moyens de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces données ont permis d'analyser l'adaptation de l'élevage aux variations climatiques et les moyens de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Vayssières *et al.*, 2017). La méthode d'analyse de discours (Igalens, 2007 ; Seignour, 2011), utilisée dans le cadre de cette étude a permis de dépasser l'analyse simple des contenus des discours et entretiens des agro-éleveurs pour étudier les modes d'argumentation et de légitimation des différents énoncés.

2. Résultats et discussion

2.1. Mutations climatiques et système d'élevage

Les éleveurs de la Commune de Tchaourou, perçoivent les phénomènes de mutations climatiques à travers la hausse des températures (97 %), le début tardif de la saison pluvieuse (97 %), le prolongement de la saison sèche (96 %), la fin précoce de la saison pluvieuse (94 %), le raccourcissement de la durée de la saison pluvieuse (93 %) et la baisse pluviométrique (90 %). Pour les enquêtés, ces perturbations climatiques connues ces dernières années influencent fortement le système d'élevage (Fig.1).

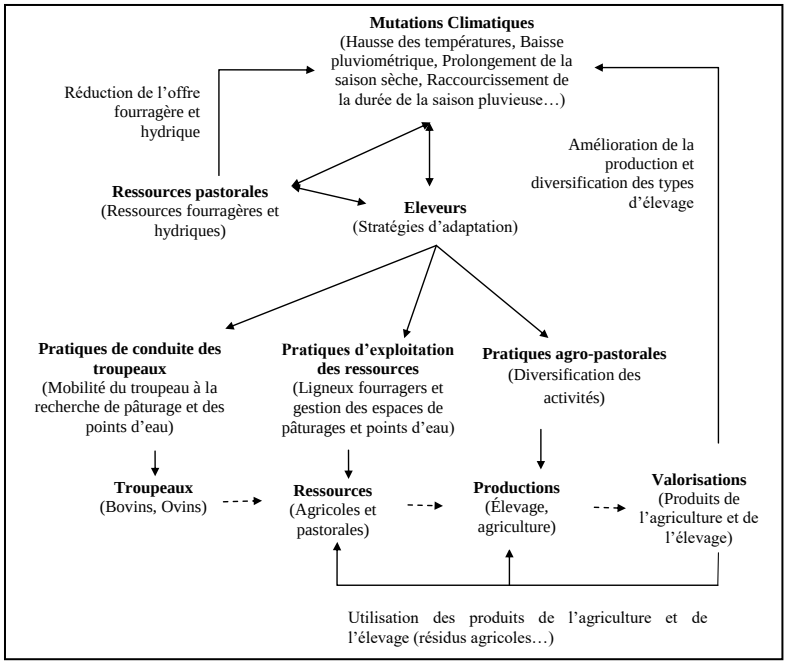


Figure 1. Système d'élevage pastoral dans la commune de Tchaourou (Source : Djohy, 2019)

Le système d'élevage, composé des éleveurs, des animaux et des ressources pastorales, est basé sur l'exploitation des ressources naturelles au rythme du climat. Ainsi, la succession régulière ou périodique des phénomènes climatiques influence la disponibilité des ressources pastorales, notamment la production des biomasses végétales, les ligneux fourragers et les ressources hydriques. La mauvaise répartition spatio-temporelle des précipitations entraîne une raréfaction des ressources fourragères et hydriques. Dans ces conditions, les éleveurs enquêtés perçoivent les saisons pluvieuses plus courtes et moins arrosées dans leur activité et une dynamique régressive des ressources disponibles.

L'évolution du climat est caractérisée par une baisse constante du nombre de jours de pluie, une baisse des précipitations comprise entre 11 et 28% et une augmentation des températures moyennes sur la période de 1951 à 2010 au Bénin (Boko *et al.*, 2012). Cette modification des conditions climatiques menace la résilience des écosystèmes pâturés et des ressources hydriques dont dépend le bétail (Dougill *et al.*, 2010). De plus, elle influence les différents systèmes de production animale par la raréfaction des ressources fourragères et en eau (Brooks, 2006 ; Dongmo *et al.*, 2007). Dans ces conditions, les éleveurs pratiquent la mobilité pour mieux exploiter les ressources dispersées.

2.2. Mobilité des troupeaux et adaptation

La mobilité des troupeaux est importante dans la commune de Tchaourou pour répondre à la forte variabilité temporelle et spatiale des ressources fourragères et hydriques. Elle permet aux éleveurs d'adapter les charges animales aux capacités mobiles des pâturages. Les différents mouvements saisonniers des troupeaux et des éleveurs sont inscrits au rang des stratégies d'adaptation des communautés pastorales pour mieux répondre à la sévérité des conditions climatiques et à la dégradation des parcours naturels. Les éleveurs déterminent quatre principales périodes au cours de l'année dont le *Ndungu,* le *Ceedu,* le *Yaane* et/ou *Dabune* et le *Seeto* auxquelles ils se réfèrent dans la pratique de conduite des troupeaux. Le *Ndungu* correspond à la saison pluvieuse et couvre principalement les mois de juillet à septembre. Au cours de cette période, les troupeaux se déplacent à l'intérieur du territoire d'attache d'où la petite transhumance. Pendant la période sèche (*Ceedu*), de janvier à avril, les troupeaux se déplacent à l'extérieur du territoire d'attache. L'assèchement des points d'eau de surface et la raréfaction des fourrages contraignent les éleveurs à la grande transhumance. La mobilité des troupeaux à l'extérieur du territoire d'attache favorise également la propagation des maladies contagieuses d'une zone pastorale à une autre notamment la péripneumonie contagieuse bovine, la trypanosomiase, la fièvre aphteuse, la pasteurellose bovineet la brucellose. Pour mieux s'adapter à ces maladies et maintenir la santé du bétail, les éleveurs enquêtés ont recours aux traitements vétérinaires (55 %), aux traitements ethno-vétérinaires « méthodes traditionnelles » (43 %) et aux traitements mixtes « méthodes traditionnelles et modernes » (2 %). Au cours des mois d'octobre à décembre (*Yaane* et/ou *Dabune*), les éleveurs exploitent les résidus de récolte « transhumance de récolte » et l'herbe fraîche des zones de décrues « transhumance de berge ». Le *Seeto* s'étend de mai à juin et correspond au début de la saison des pluies. L'installation des premières pluies permet aux agriculteurs et aux agro-éleveurs de mettre en valeur différents espaces agricoles. Les matières sèches de fèces des animaux permettent aux agro-éleveurs de mieux fertiliser les sols. Face aux fortes variations pluviométriques, l'association de l'agriculture et de l'élevage est d'une importance capitale pour la sauvegarde des moyens d'existence des communautés Peulh.

Les éleveurs mènent plusieurs formes de mobilité qui s'illustrent par des déplacements saisonniers dont la petite transhumance, la grande transhumance (Kperou Gado, 2006 ; FAO, 2012), la transhumance de pacage et la transhumance de berge (Manceron, 2011). Ces déplacements des éleveurs suivent des repères temporels et spatiaux (Dongmo *et al.*, 2007 ;

Djènontin, 2010 ; Djènontin *et al.*, 2012), afin de faciliter l'exploitation des ressources. La pratique de conduite des animaux suit quatre grandes périodes au cours de l'année (Chabi Boum, 2011 ; Djohy *et al.*, 2014). La mobilité à l'intérieur du territoire d'attache a eu lieu pendant la période humide « *Ndungu* » correspondant à la période de production agricole (Djènontin, 2010). En saison sèche « *Ceedu* », les éleveurs se déplacent des territoires d'attache à fort déficit fourrager vers des territoires d'accueil à fortes potentialités pastorales (Zakinet, 2015). Le faible accès aux ressources expose les animaux à de nombreuses maladies (Simel, 2010). De même la mobilité du troupeau d'un lieu à un autre favorise la transmission des maladies (MID, 2010). Dans ces conditions, les éleveurs combinent divers produits dans le traitement des animaux notamment des traitements vétérinaires et ethno-vétérinaires. Les Peulhs ont souvent recours aux plantes médicinales (Byavu *et al.*, 2000) et aux méthodes modernes proposées par le service vétérinaire pour le traitement des maladies bovines.

2.3. Fertilisation du sol et agro-pastoralisme

Les matières sèches de fèces des animaux sont utilisées dans la fertilisation des sols. Cette pratique développée par les agro-pasteurs consiste à épandre les déjections animales dans les champs. Les expériences réalisées dans la commune de Tchaourou révèlent que les bovins en parcours le jour produisent entre 2 et 4 kg de matière sèche de fèces. Or les bovins attachés la nuit produisent entre 1 à 2 kg de matière sèche de fèces. Les petits ruminants notamment les ovins et les caprins produisent quotidiennement entre 0,5 et 1 kg de matière sèche de fèces. L'utilisation de cette matière organique constitue une manière de valoriser les sous-produits de l'élevage. Ces agro-éleveurs cultivent principalement le maïs, sorgho, le mil et l'igname. Environ 60 % des enquêtés s'adonnent à l'agriculture pour l'autosuffisance alimentaire alors que 40 % visent à la fois l'autosuffisance alimentaire et la commercialisation. Les éleveurs ont opté pour l'agriculture comme deuxième activité du fait qu'avec la rudesse de la sécheresse, ils réservent les résidus de récoltes pour nourrir le bétail en saison sèche.

Les bovins fournissent entre 2 et 6 kg de matière sèche de fèces le jour et entre 1,5 et 2,5kg la nuit (Berger, 1996). Ces déjections animales représentent un engrais de qualité principalement pour sa forte teneur en azote, élément primordial pour le développement des végétaux (Christophe, 2004). L'utilisation des matières organiques dans l'entretien des sols limite l'émission du CO_2 dans l'atmosphère et contribue à la préservation de l'environnement. La production agricole permet aux agro-éleveurs de stocker les résidus de récoltes pour nourrir le bétail en saison sèche (Djènontin, 2010). Si en saison pluvieuse le fourrage herbacé est abondant et peut couvrir les besoins alimentaires des animaux, en saison sèche le fourrage herbacé devient rare (Douma *et al.*, 2007 ; Djènontin *et al.*, 2009).

2.4. Elevage et gaz à effet de serre

La mobilité pastorale occasionne une concentration des troupeaux bovins dans certaines zones à fortes potentialités pastorales notamment Bétérou, Kika, Alafiarou et Sanson dans la commune de Tchaourou en saison sèche. Cette concentration des troupeaux bovins entraîne une forte accumulation des déjections animales dans ces différents milieux agro-pastoraux qui sont responsables des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cet élevage extensif constitue une source importante d'émission de GES à travers les déjections animales. Mais le recours aux déjections animales dans la fertilisation des sols limite l'utilisation des engrais minéraux. Cette pratique réduit les émissions de GES liées aux engrais minéraux dans la zone d'étude. Elle permet également la séquestration du carbone dans les sols des zones agro-pastorales. Le développement des techniques agro-écologiques notamment l'alimentation du bétail à partir des parcours naturels, l'entretien du sol à partir des déjections animales et le traitement ethno-vétérinaires des animaux permet aux agro-éleveurs d'atténuer les émissions de GES. Pour

améliorer l'alimentation des animaux les éleveurs privilégient les espèces végétales digestibles, adaptées au climat et répondant aux besoins alimentaires des animaux. Les recherches dans la commune de Tchaourou montrent que les éleveurs ont une forte capacité à adapter leur élevage extensif aux mutations climatiques. Ils développent divers systèmes agro-pastoraux de valorisation des ressources locales permettant la production, l'adaptation et l'atténuation de l'élevage extensif aux mutations climatiques.

Les activités agricoles notamment l'élevage contribuent pour une large part aux émissions dans l'atmosphère des différents gaz à effet de serre (Bioteau *et al.,* 2007). Mais l'utilisation des matières sèche de fèces des animaux dans la fertilisation des sols au détriment des engrais minéraux limite l'émission des gaz à effet de serre liés aux minéraux (Vandaele *et al.,* 2010). La mobilité des animaux suivant la disponibilité pluviométrique et des ressources pastorales au cours de l'année n'empêche pas la séquestration du carbone dans les sols des zones pastorales ou agro-pastorales (Vayssières *et al.,* 2017). Ainsi, les sols des prairies et les surfaces pastorales valorisées par l'élevage bovin représentent un important puits de carbone, car ces surfaces ont la capacité à capter le carbone atmosphérique par photosynthèse puis à en stocker une partie de manière pérenne dans le sol (Gac *et al.,* 2014 ; Dolle *et al.,* 2017).

Conclusion

Les effets variables des mutations climatiques sur les relations entre production, adaptation et atténuation dans la commune de Tchaourou sont mis en évidence dans cette étude. La production animale notamment bovine reste dépendante des conditions climatiques et environnementales. Dans ce contexte d'incertitude, les agro-éleveurs développent diverses stratégies adaptées aux nouvelles conditions climatiques et peu émettrices de gaz à effet de serre.

Bibliographie

Berger M., 1996. *L'amélioration de la fumure organique en Afrique Soudano-Sahélienne*. Agriculture et développement, Montpellier, France, 58p.

Bioteau T., Gac A., Béline F., 2007. Évaluation et Spatialisation des Émissions Gazeuses liées à la gestion des déjections d'élevage (ESEGA) : de l'inventaire au test de technologies de réduction des émissions gazeuses. Ingénieries eau-agriculture-territoires. *Lavoisier*, n°51, 19-31.

Boko M., Kosmowski F., Vissin W.E., 2012. *Les Enjeux du Changement Climatique au Bénin : Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest*. Konrad-Adenauer-Stiftung, Cotonou, 65p.

Brooks N., 2006. Changement climatique, sécheresse et pastoralisme au sahel : Note de discussion pour l'Initiative Mondiale sur le Pastoralisme Durable. WISP, 12p.

Byavu N., Henrard C., Dubois M., François M., 2000. Phytothérapie traditionnelle des bovins dans les élevages de la plaine de la Ruzizi. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.,* vol.4, n°3, 135-156.

Camara A.S.D., 2013. *Le rapport au changement en société pastorale. Le cas des éleveurs du Ferlo et de Colonnat.* Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 345p.

CGDD, 2019. *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France. Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques* (EFESE). Commissariat général au développement durable (CGDD), Collection Théma Analyse, Paris, France, 102p.

Chabi Boum O.B.M., 2011. *Pastoralisme dans la Commune de Tchaourou : Organisations, Contraintes et Incidences Environnementales*. Mémoire de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 87p.

Chabi Toko R., 2016. *Place de l'élevage bovin dans l'économie rurale des peuls du Nord Benin*. Thèse de doctorat, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique, 209p.

Christophe J.D., 2004. *La bouse : historique, importance et écosystème*. Thèse de doctorat vétérinaire, Ecole nationale vétérinaire de Toulouse, France, 82p.

Djènontin A.J., 2010. *Dynamique des stratégies et des pratiques d'utilisation des parcours naturels pour l'alimentation des troupeaux bovins au Nord-est du Bénin.* Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 274p.

Djènontin J.A., Madjidou O., Houinato M.R., Mensah G.A., Sinsin B.A., 2012. Le calendrier pastoral en élevage extensif dans le Nord-Est du Bénin: un outil de gestion du cheptel bovin de l'exploitation. *Sécheresse*, vol.23, n°4, 261-270.

Djènontin P.J.A., Houinato M., Toutain B., Sinsin B., 2009. Pratiques et stratégies des éleveurs face à la réduction de l'offre fourragère au Nord-est du Bénin. *Sécheresse*, vol.20, n°4, 346-353.

Djohy G., Edja A.H., Djenontin A.J., Houinato M., Zoungrana T.P., 2014. Dynamiques sociocommunautaires de gestion des risques climatiques par les agropasteurs dans les terroirs riverains du Parc w, au Nord-Bénin. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, n°3, 15-34.

Djohy G.L., 2019. *Mobilité pastorale et dynamiques spatio-temporelles dans un contexte de variabilite climatique dans la commune de Tchaourou*. Mémoire de géographie, Université de Parakou, Bénin, 109p.

Dolle J.-B., Chambaut H., Delagarde R., Edouard N., Eugene M., Foray S., Lorinquer E., Manneville V., 2017. Mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en élevage bovin lait et viande. *Innovations Agronomiques*, n°55, 301-315.

Dongmo A.L., Djamen P., Vall E., Koussou M.O., Coulibaly D., Lossouarn J., 2007. L'espace est fini ! Vive la sédentarisation ? Innovations et développement durable en question chez les pasteurs des zones cotonnières d'Afrique de l'ouest et du centre. *Renc. Rech. Ruminants*, n°14, 153-160.

Dougill H., Duteutre G., Kamil H., Le Masson A., 2010. *Étude sur les sociétés Pastorales au Tchad.* PSSP, CIRAD/EMVTVSF, Tchad, 84p.

Douma S., Diatta S., Kabore-Zoungrana C.Y., Banoin M., Akpo L.E., 2007. Caractérisation des terres de parcours sahéliennes : typologie du peuplement ligneux de la station expérimentale sahélienne de toukounouss au Niger. *Journal des Sciences*, vol.7, n°4, 1-16.

FAO, 2012. La transhumance transfrontalière en Afrique de l'Ouest Proposition de plan d'action. Rapport, 146p.

Gac A., Agabriel J., Dollé J.-B., Faverdin P., Van Der Werf H., 2014. Le potentiel d'atténuation des gaz à effet de serre en productions bovines. *Innovations Agronomiques*, n° 37, 67-81.

Igalens J., 2007. L'analyse du discours de la RSE à travers les rapports de développement durable. *Revue Finance-Contrôle-Stratégie*, 129-155.

Kperou Gado B.O., 2006. *Impacts socio-économiques de la transhumance transfrontalière dans la zone riveraine du parc w du Benin*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 114p.

Manceron S., 2011. *Intervenir en périphérie pour la conservation des aires protégées : réexamen d'un postulat. La situation du Parc du W et des éleveurs mobiles*. Thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre, France, 586p.

MID, 2010. *Evaluation rapide de l'impact de la sécheresse en milieu rural*. République de Djibouti, 19p.

Rigolot C., Martin G., Dedieu B., 2017. Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : Cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement. *INRA Productions Animales*, 1-12.

Seignour A., 2011. Méthode d'analyse des discours : L'exemple de l'allocution d'un dirigeant d'entreprise publique. *Lavoisier, Revue française de gestion*, n°211, 29-45.

Simel O.J., 2010. Le pastoralisme et les défis du changement climatique. *Pasteurs nomades et transhumants autochtones*, L'Harmattan, Paris, 61-75.

Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V., 2010. Mitigation the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Cambridge University Press*, vol 11, 119-151.

Vandaele D., Lebreton A., Faraco B., 2010. Agriculture et gaz à effet de serre : état des lieux et perspectives. Rapport d'étude. Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme, 69p.

Zakinet D., 2015. Des pasteurs transhumants entre alliances et conflits au Tchad. Les Arabes Salamat Sifera et les Arabes Djaatné au Batha. *Afrique contemporaines*, n°255, 127-143.

URBAN WATER BALANCE RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN HYDROLOGIC SIMILARITY AREAS: MODELLING APPLICATION IN BELEM CATCHMENT, SOUTHERN BRAZIL

DOS SANTOS I., CARVALHO J.W.L.T., IENSEN I.R.R.

Hydrogeomorphology Laboratory (LHG), Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil (irani69@gmail.com)

Summary: *The water balance resilience to climate change scenarios in Hydrologic Similarity Areas (HSA) in the Belém catchment is evaluated. For this purpose, the driving model HadGEM2-ES was used to simulate the climate scenarios for the 2067–2096 period. The model is downscaled to 25km resolution in REMO2015 under RCP2.6 and 8.5. We used CMhyd to bias-correct data from the regional climate model and Aquacycle model to simulate the climate change effects on water balance. The climate scenario exhibited an increasing trend in average temperature, potential evapotranspiration, rainfall, as well as an increase in extreme events. Considering the water balance in those HSA, the simulated results indicate a higher increase in the surface runoff in places with a higher percentage of impervious areas. Evapotranspiration, infiltration and baseflow increased only in HSA with the lowest percentage of impervious areas. Thereby, the results indicate that those HSA with a higher percentage of impervious areas are less resilient to the climate change scenarios effects.*

Key words: *aquacycle; urban water balance; HadGEM2-ES; future climate*

Résumé : ***La résilience du bilan hydrique urbain aux scénarios de changement climatique dans les zones de similarité hydrologique : application de la modélisation dans le bassin versant de Belem, au sud du Brésil.*** *La résilience du bilan hydrique aux scénarios de changement climatique dans les zones de similarité hydrologique (ZHS) a été étudiée dans le bassin hydrographique de Belém.. Le modèle HadGEM2-ES (25km de résolution) a été utilisé selon les scénarios RCP2.6 et 8.5 pour la période 2067-2096. CMhyd a été utilisé pour corriger les données du modèle climatique régional. Le du modèle Aquacycle a permis de simuler les effets du changement climatique sur le cycle de l'eau. Le scénario climatique a montré une tendance d'augmentation de la température moyenne, de l'évapotranspiration potentielle, des précipitations, ainsi que des événements extrêmes. Les simulations ont mis en évidence une augmentation plus élevée du ruissellement de surface dans les zones imperméables du bassin. L'évapotranspiration, l'infiltration et le flux de base n'a augmenté que dans les HSA avec le plus faible pourcentage de zones imperméables. Par conséquent, les résultats indiquent que les HSA qui ont un pourcentage plus élevé de zones imperméables sont moins résistants aux effets des scénarios de changement climatique.*

Mots clés : *aquacycle ; cycle de l'eau en milieu urbain ; HadGEM2-ES ; climat futur*

Introduction

Climate change associated with the growth prospect of urban areas brings up significant challenges related to the impacts in the urban water balance. Changes in climate dynamics can lead to variations in the temperature or rainfall regime, as well as to the intensification of extreme events (IPCC, 2014). On the other hand, the urban space configuration can influence the urban water cycle dynamics, changing the rates of water balance components. It happens primarily due to the growing percentage of impervious surfaces, that in addition to decreasing evapotranspiration, infiltration, and baseflow rates (see Mejía *et al.*, 2001 and Lee *et al.*, 2010), can also increase up to seven times the overland flow of urban catchments (Leopold, 1968).

The urban floods are a direct response to the increase in runoff volume due to both increased rainfall and impervious areas. Currently, because of climate change, the growth of cities and the lack of urban planning, the occurrence of urban floods increases as well as the number of people living in a risk area (UNESCO, 2018). The occurrence of floods is also associated with the urban space configuration, which may be diverse in the same city. Different Hydrological Similarity Areas (HSA) produce different responses in the water balance (Carvalho, 2016) and can reveal a highly dependent relationship between the percentage of impervious surfaces and some components of urban water balance as runoff, infiltration, and evapotranspiration (Mejía

et al., 2014). Such variability in those responses could possibly indicate that each HSA has a different level of resilience when faced with an extreme event.

In this context, and based on the above-mentioned issues, this paper aims to evaluate the water balance resilience to climate change scenarios in different HSA in Belém catchment, Southern Brazil. The evaluations are carried out using climate modeling with regional downscaling and hydrological modeling of urban water balance.

1. Data and Methods

1.1. Study Area

With 87.59km², Belém catchment is the most densely urbanized area of Curitiba, which is the capital of the State of Paraná, Southern Brazil (Fig.1). The catchment is integrally located in an urban area, from its headwater to its outlet, and has several water management issues related to urbanization, such as river pollution and frequent floods. For this research we delimit the catchment until the Prado Velho Fluviometric Station (65011400), whose streamflow data were used to calibrate the *Aquacycle* model, encompassing a drainage area of 42.6km².

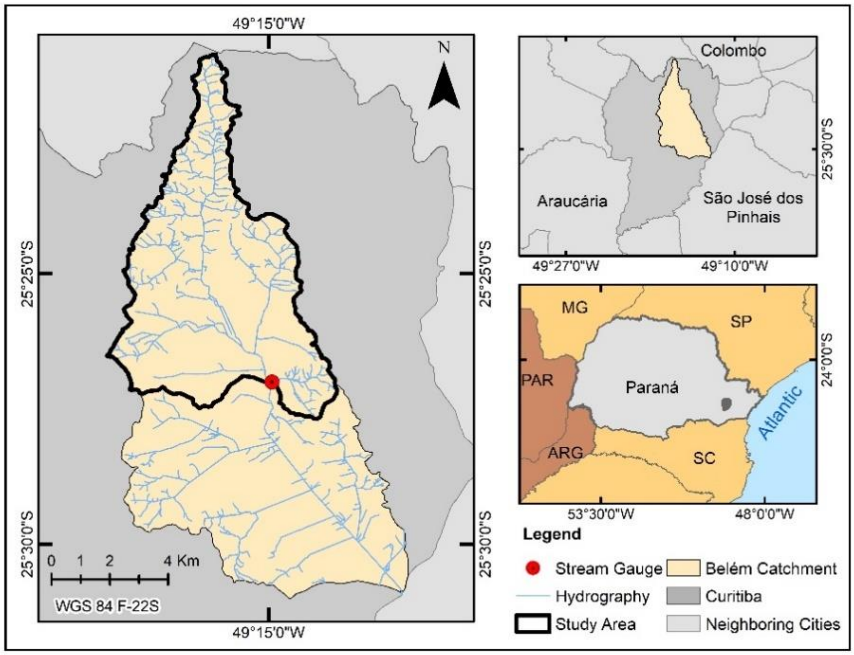


Figure 1. Location Map

The climate in the study area is subtropical, with well-defined seasons, regularity of rainfall, which are more expressive during the summer. There are accentuated thermal amplitudes, mild summers, and low temperatures during the winter. The annual averages of rainfall and temperature, respectively, are around 1,450 mm and 18°C (IAPAR, 2000).

1.2. Climate Change Modeling

For climate change modelling, we tested MPI-M-MPI-ESM-LR, NCC-NorESM1-M and HadGEM2-ES driving models. We chose to use HadGEM2-ES, coupled in the ESGF to the SAM-22 domain, because it presented the most pessimistic scenario, even understanding that there are lots of uncertainty and bias when using a single model. The variables used to simulate the climate scenarios were maximum and minimum temperature and precipitation daily data. Developed by the UK Met Office Hadley Centre (MOHC), and part of CMIP5, the HadGEM2 family includes atmosphere and ocean components in its structure. The version Earth System

(ES), chosen for this research, includes troposphere, land surface and hydrology, aerosols, ocean and sea-ice, terrestrial carbon cycle, ocean biogeochemistry and chemistry processes (Martin *et al.*, 2011). It has an ocean resolution of 1° (with 40 vertical levels) and atmospheric resolution of 1.875°×1.25° (with 38 vertical levels) (Jones *et al.*, 2011).

The model is downscaled to 25km resolution with REMO2015 and forced by RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios. REMO2015 is one of the RCMs used in the CORDEX project and presents good performance for subtropical regions (Remedio *et al.*, 2019). RCP2.6 and RCP8.5 are representative concentration pathways from CMIP5 that estimate, respectively, the most optimistic (emissions reaching a peak of 2.6 W/m2) and the most pessimistic (emissions reaching a peak of 8.5 W/m2) scenario of climate change until the end of the 21st century.

Attempting to bias-correct precipitation and temperature data from the RCM output to a local downscale we used the Climate Model data for hydrological modeling (CMhyd) tool (Rathjens *et al.*, 2016). In this software, the distribution (or probability) mapping of precipitation and temperature procedures was employed as a transformation algorithm. In distribution mapping, it is corrected the distribution function of RCM-simulated climate values to agree with the distribution function observed in monitored data (Teutschbein and Seibert, 2012). The gamma distribution was used to distribute precipitation events and for temperature data, the Gaussian distribution had the best fit. Climate change was assessed based on the period 1982-2013, with measured data available. The period simulated is the far future time (2067–2096).

1.3. Urban Water Balance Modeling

The climate change effects on water balance were simulated with the hydrological urban model *Aquacycle*. *Aquacycle* simulates the urban water cycle as an integrated whole, encompassing the natural water cycle system with the constructed stormwater drainage, water-supply and wastewater network systems. Its structure comprises the complex dynamics of water pathways in an urban environment, generating the water balance in daily, monthly and annual time scales, and *unit block*, *cluster* and *catchment* spatial scales (Mitchell, 2005). Its structure allows understanding the effect of individual or sets of elements like roofs, roads, sidewalks, gardens or rainwater tanks in the urban water balance.

Input data required for modeling are water use profile, spatial parameters, calibration parameters, daily precipitation and potential evapotranspiration for climate data (Mitchell, 2005). The model calibration for Belém catchment in the current time was run by Carvalho (2016).

CMhyd tool allows the user to bias-correct only temperature and precipitation data. Thus, the Hargreaves-Samani method was chosen to calculate potential evapotranspiration for future series. The employment of Hargreaves-Samani to the study area revealed an overestimate trend in the potential evapotranspiration by 20%. Data obtained from climate change modeling were used to simulate the water balance for the 2067-2096 period. The analysis was done by *cluster*, on an annual time scale. In the current research, we delimited the *clusters* based on the identification of the HSA. The elements analyzed to evaluate each HSA´s resilience to climate change were runoff, actual evapotranspiration, infiltration, and baseflow.

1.3.1. Hydrological Similarity Areas Delimitation

To analyze the different configurations of urban space, we compartmentalized the catchment into fourteen HSA, according to Carvalho (2016) methodology. HSA are areas that present similar water dynamics characteristics. The delimitation was done based on an integrated analysis including the Curitiba Zoning and Land Use Law, demographic data and orbital

images. The *clusters´* average size was 3km² and the average impervious surface among them varies from 45% to 97%, evincing the diversity of urban space configuration.

2. Results

The climate changes projected by HadGEM2-ES reveal an increasing trend in annual average temperature, potential evapotranspiration, annual rainfall, and an increase in the number and magnitude of extreme events for both RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios. The climate change modeling indicates that the annual average rainfall increases from 1,449mm in the current period to 1,957mm (RCP2.6) and 2,085mm (RCP8.5) in the 2067-2096 period, indicating a possible increase in risk. However, the number of rainy days decreases (131 for the current period) while the greenhouse gas concentration increases (102 days for RCP2.6 and 96 for RCP8.5). These simulations exhibit a trend for extreme events, with concentrated rains and longer periods of drought.

The results for annual runoff, actual evapotranspiration, infiltration, and baseflow, simulated in *Aquacycle* for future and current scenarios, for the fourteen HSA, are presented in Figure 2. The graphs also show the percentage of impervious areas for each HSA.

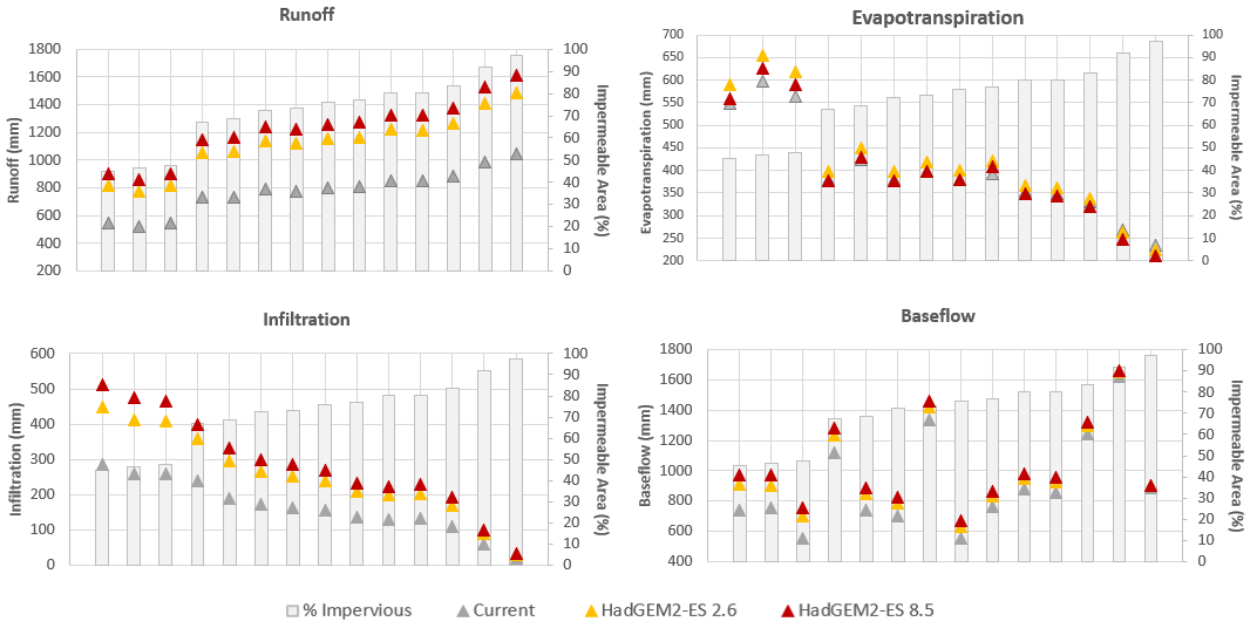


Figure 2. Simulation results for runoff, actual evapotranspiration, infiltration, and baseflow per HSA at the current and far future period (2067-2096 forced by RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios).

The runoff increased in all the scenarios mainly due to the enhance in surface runoff in the whole catchment. Considering the water balance in those HSA, the simulated results showed a higher increase in the surface runoff in places with a higher percentage of impervious surfaces and in scenarios with a higher increase of annual rainfall. Infiltration and baseflow indexes had representative increases in the HSA with a lower percentage of impervious areas, consequently reducing the surface runoff. Evapotranspiration indexes slightly increased in the HSA with less impervious areas and a slight decreased in the HSA with more impervious areas.

Baseflow and infiltration presented large differences between their volumes due to baseflow be not only dependent on rainfall and on the percentage of impervious surfaces. Baseflow is also dependent on demographic density inasmuch as it is composed not only by natural baseflow but also by water-supply system leakage and wastewater inflow into stormwater drainage (Carvalho, 2016).

The increment for each water balance component in relation to the current scenario is given in Figure 3.

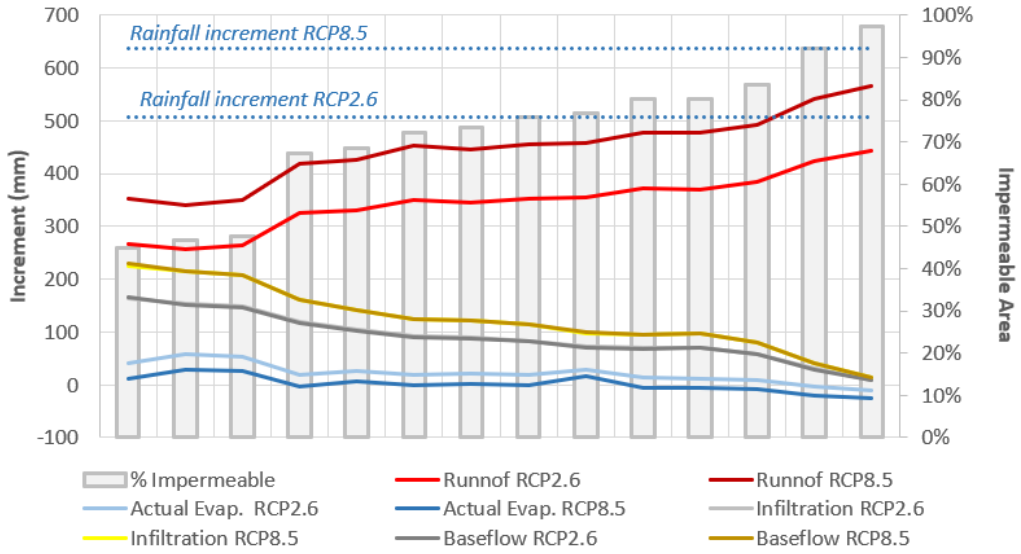


Figure 3. Variation of water balance components in relation to the rainfall increase

Runoff was the urban water balance component with a higher increment. RCP2.6 presented an increase varying from 266mm for the HSA with a higher percentage of impervious surfaces and 444mm for the HSA with a lower percentage of impervious surfaces. RCP8.5, in turn, presented increments ranging from 352mm to 566mm. The most significant changes for baseflow and infiltration were also observed in RCP8.5, however, an inverse relationship was verified in the HSA´s response, when compared to runoff. For RCP 2.6 the values for baseflow and infiltration ranged, respectively, from 10mm (both components) in the HSA with more impervious area to 166mm and 164mm in the HSA with less impervious areas. In RCP8.5 the values ranged from 13mm (both components) to 230mm and 225mm. Such results point that in urban watersheds impervious areas are less resilient to the climate change scenarios effects.

Actual evapotranspiration is the water balance component that showed the lowest variation. RCP2.6 and 8.5 shows a greater and positive variation for the HSA with more pervious areas and negative variation in the most impervious areas. Although RCP8.5 has a higher annual rainfall, is has also the lowest annual actual evapotranspiration, when comparing to RCP2.6. Such results can be explained due to the reduced number of rainy days in scenarios with higher greenhouse gas concentration. Therefore, drought periods keep less water available for evapotranspiration.

Conclusions

The climate change simulations performed by HadGEM2-ES, showed an increasing trend in annual average temperature, potential evapotranspiration, annual rainfall, and an increase in extreme events. Such increases were higher in RCP8.5, which also revealed a reduction in the number of rainy days and, consequently, in the annual actual evapotranspiration. The *Aquacycle* modeling results demonstrated that the HSA with a higher percentage of impervious surfaces present a higher runoff increment and lower infiltration and baseflow increments according to the annual precipitation increase. Thereby, the results demonstrated that in urban watershed impervious areas are less resilient to the climate change scenarios effects. We suggest that studies on seasonal impacts and extreme events be carried out. We also suggest testing an ensemble of climate change scenarios.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge CAPES for granting PhD scholarship to CARVALHO and IENSEN, postgraduate students in the Geography Department at UFPR.

Literature

Carvalho J.W.L.T., 2016. *Configuração urbana e balanço hídrico com aplicação do modelo Aquacycle na bacia hidrográfica do rio Belém – Curitiba/PR*. Dissertation (Master in Geography) - Federal University of Paraná, Curitiba, 136 f.

IAPAR. Instituto Agronômico do Paraná. 2000. Cartas climáticas do Paraná. Caviglione J. H, KIihl L. R. B, Caramori P. H, Oliveira D, Londrina: IAPAR.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

Jones C. D., *et al.*, 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci*. Model Dev., 4, 543–570

Lee J., Pak G., Yoo C., Kim S., Yoon J., 2010. Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 923–928.

Leopold L.B., 1968. Hydrology for urban land planning: a guidebook on the hydrologic effects of urban land use. *U.S. Geological Survey*, Washington.

Martin G. M., *et al.*, 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations, *Geosci. Model Dev*., 4, 723–757

Mejía A., Daly E., Rossel F., Jovanovic T., & Gironas J., 2014. A stochastic model of streamflow for urbanized basins. *Water Resourses Research*, 50, 1984–2001

Mitchell V. G., 2005. *Aquacycle User Guide. CRC for Catchment Hydrology*. Monash University, Melbourne, Australia.

Rathjens H., Bieger K., Srinivasan R., Arnold J.G., 2016. *Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*. URL: http://swat.tamu.edu/software/cmhyd/.
Armelle Reca Remedio * Claas

Remedio A.R, Teichmann C., Buntemeyer L., Sieck K., Weber T., Rechid D., Hoffmann P., Nam C., Kotova L. & Jacob D. 2019. Evaluation of New CORDEX Simulations Using an Updated Köppen–Trewartha Climate Classification. *Atmosphere*, 10(11), 726p.

Teutschbein C., Seibert J., 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 12-29.

UNESCO. 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions for Water. Paris, UNESCO.

SIMULATION DES PRÉCIPITATIONS DANS LA RÉGION DU LAC VICTORIA (AFRIQUE ÉQUATORIALE DE L'EST) À L'AIDE DU MODÈLE RÉGIONAL MAR

DOUTRELOUP S., FETTWEIS X., ERPICUM M.

Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Département de Géographie, UR SPHERES, Université de Liège, Liège, Belgique (s.doutreloup@uliege.be)

Résumé : *La région du Lac Victoria en Afrique équatoriale de l'Est constitue un véritable défi pour la modélisation régionale, et plus particulièrement pour la simulation des précipitations. Dans cette étude, le modèle régional MAR est utilisé pour simuler les précipitations sur cette région d'Afrique. MAR est forcé à ses frontières par les réanalyses ERA-Interim sur la période 1987-2017 et possède une résolution horizontale de 15 km. L'objectif de cette étude est, premièrement, d'évaluer les précipitations simulées par MAR par rapport à différentes bases de données d'observations, deuxièmement, de déterminer s'il y a eu des changements dans le régime des précipitations sur la période étudiée et enfin, troisièmement, de déterminer si le modèle MAR est capable de simuler les variations saisonnières des précipitations dans cette région. Les résultats montrent qu'il est très difficile d'évaluer les sorties d'un modèle sur cette région alors que les données d'observations disponibles sont contradictoires.*

Mots clés : A*frique ; modélisation régionale ; précipitation*

Summary: ***Rainfall simulation in the Lake Victoria region (Eastern Equatorial Africa) using the MAR regional model.*** *The region of the Lake Victoria in Eastern Equatorial Africa is a real challenge for regional modeling, particularly for rainfall simulation. In this study, the regional model MAR is used to simulate rainfall over this region of Africa. MAR is forced at its boundaries by the ERA-Interim reanalyses over the period 1987-2017 and has a horizontal resolution of 15 km. The objective of this study is, firstly, to assess the rainfall simulated by MAR against different observation databases, secondly, to determine whether there have been any changes in the rainfall regime over the study period and thirdly, to determine if MAR model is capable of simulating seasonal variations in rainfall in this region. The results show that it is very difficult to evaluate the outputs of a model over this region when the available observational data are contradictory.*

Key words: *Africa; regional modeling; precipitation*

Introduction

Le modèle régional MAR (pour Modèle Atmosphérique Régional) simule les conditions atmosphériques avec succès dans des régions au climat polaire aussi bien au Groenland (Fettweis *et al.*, 2013, 2017) qu'en Antarctique (Kittel *et al.*, 2018 ; Agosta *et al.*, 2019) mais aussi dans des régions au climat tempéré comme en Belgique (Wyard *et al.*, 2017 ; Doutreloup *et al.*, 2019). MAR permet également de simuler les précipitations sur des régions d'Afrique de l'Ouest (Brasseur *et al.*, 1998 ; Gallée *et al.*, 2004).

Cependant, MAR n'a pas encore été utilisé sur la région du Lac Victoria au climat tropical de savane. Or cette région constitue un véritable défi pour la modélisation régionale, et plus particulièrement pour la simulation des précipitations notamment en raison du passage de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) qui offre une variabilité saisonnière particulière, mais aussi en raison de l'orographie locale qui influence la répartition spatiale des précipitations.

L'objectif de cette étude est, premièrement, d'évaluer les précipitations simulées par MAR par rapport à différentes bases de données d'observations, deuxièmement, de déterminer s'il y a eu des changements dans le régime des précipitations sur la période étudiée et enfin, troisièmement, de déterminer si le modèle MAR est capable de simuler les variations saisonnières des précipitations dans cette région.

1. Données et Méthodes

1.1. Configuration du modèle régional MAR

Le modèle régional MAR est un modèle tridimensionnel atmosphérique couplé à un schéma unidimensionnel de transfert entre la surface, la végétation et l'atmosphère (De Ridder et Gallée, 1998).

Comme MAR est un modèle régional, il a besoin d'être alimenté par un modèle global à ses frontières latérales, c'est ainsi que les conditions atmosphériques d'une réanalyse ou d'un modèle de circulation générale doivent être directement forcées aux bords du domaine MAR toutes les 6 heures. Les variables atmosphériques utilisées par ce forçage sont la température, la pression, le vent et l'humidité spécifique, ainsi que la température de surface de la mer.

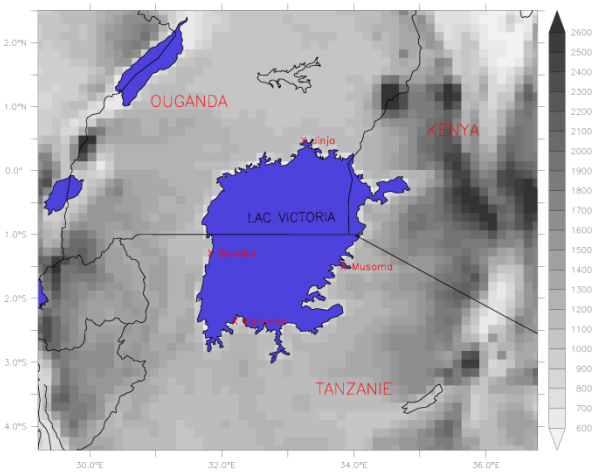


Figure 1. Topographie (trame en échelle de gris, en mètre) du domaine du modèle MAR sur la région du Lac Victoria, les étendues d'eau sont en bleu, les noms des pays sont en majuscules rouges et le nom des villes utilisées dans cette étude en minuscules rouges.

Dans cette étude, le modèle régional MAR (version 3.9) est forcé à ses frontières par les réanalyses ERA-Interim sur la période 1987-2017 et possède une résolution horizontale de 15 km. Le domaine MAR est composé de 80 x 75 pixels, soit un domaine de 1200 km x 1125 km (Fig.1).

1.2. Données d'observations utilisées

Les données pluviométriques du « Climate Prediction Center » (CPC ; (Xie *et al.*, 2007 ; Chen *et al.*, 2008)) et du « Climatic Research Unit » (CRU ; (Harris *et al.*, 2014)) sont utilisées. La base de données CPC fournit des précipitations journalières maillées de 1979 à nos jours partout sur le globe. Pour ce faire, les données de plus de 30 000 pluviomètres sont collectées et comparées à des observations satellites et radar, puis sont extrapolées sur une grille à 0.5° x 0.5°. La base de données CRU fournit les précipitations mensuelles maillées de 1901 à nos jours à partir de données mensuelles de stations météorologiques réparties sur l'ensemble du globe. Comme pour les données CPC, les données CRU sont extrapolées sur une grille à la résolution spatiale de 0.5° x 0.5°.

2. Résultats

Les Figures 2 et 3 montrent que les précipitations moyennes annuelles simulées par MAR comportent des biais assez importants (> 600 mm/an) sur la bordure nord-est du Lac Victoria, mais aussi à l'ouest du domaine. Sur la moitié ouest du domaine, même si les biais sont

importants, ils sont peu significatifs (Fig.3) alors que sur la moitié est du domaine les biais sont significatifs et compris entre -100 et -600 mm/an.

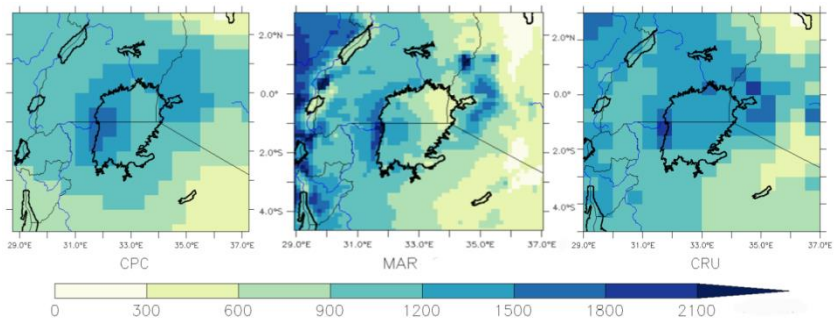


Figure 2. Précipitations moyennes annuelles (en mm/an) simulées par MAR (au milieu) et fournies par les données CPC (à gauche) et par les données CRU (à droite) sur la période 1987-2017 dans la région du Lac Victoria (Afrique équatoriale de l'Est).

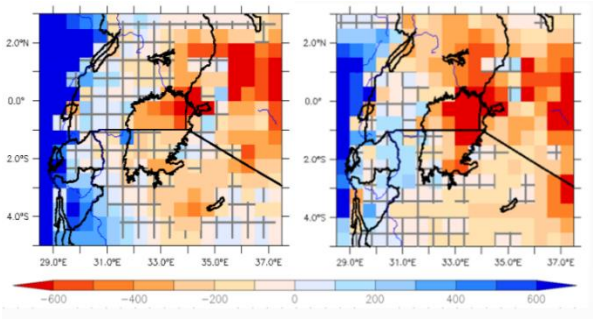


Figure 3. Biais (en mm/an) entre les précipitations moyennes annuelles simulées par MAR et celles fournies par les données CPC (à gauche) et CRU (à droite) sur la période 1987-2017 dans la région du Lac Victoria (Afrique équatoriale de l'Est). Les pixels quadrillés sont considérés comme ayant des biais statistiquement non-significatifs c'est-à-dire ayant un biais inférieur à la variabilité interannuelle.

Sur la Figure 4, la tendance des précipitations moyennes annuelles simulées par MAR indique une augmentation des précipitations au nord-est du domaine comme pour les données CRU. En revanche, les données CPC montrent des tendances complètement différentes avec une diminution des précipitations au nord et une augmentation au sud-ouest du Lac Victoria.

La variabilité saisonnière des précipitations autour du Lac Victoria simulée par MAR représente bien les variabilités saisonnières observées par les données CPC et CRU, le coefficient de corrélation est compris entre 0,8 et 0,9 en fonction des pixels représentant les principales villes. Les valeurs de précipitations moyennes mensuelles simulées par MAR sont comprises dans la gamme de valeurs composées par les deux données d'observation, sauf dans le cas de Bukoba où les deux *maxima* de précipitations sont surestimés par les simulations MAR (>150 mm/mois).

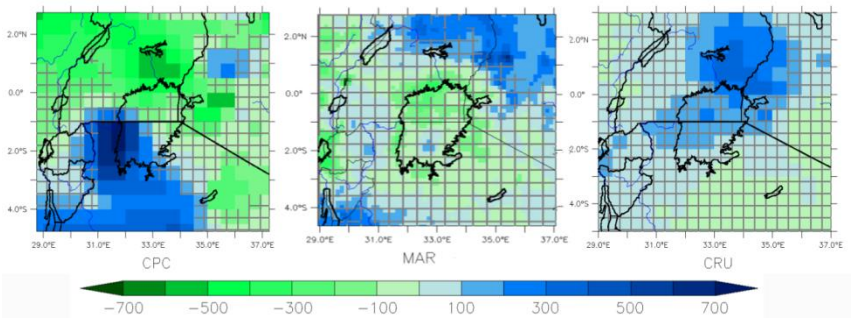


Figure 4. Tendance (en mm/an/31ans) des précipitations moyennes annuelles simulées par MAR (au milieu) et celles fournies par les données CPC (à gauche) et CRU (à droite) sur la période 1987-2017 dans la région du Lac Victoria (Afrique Équatoriale de l'Est). Les pixels quadrillés sont considérés comme ayant des tendances statistiquement non-significatives.

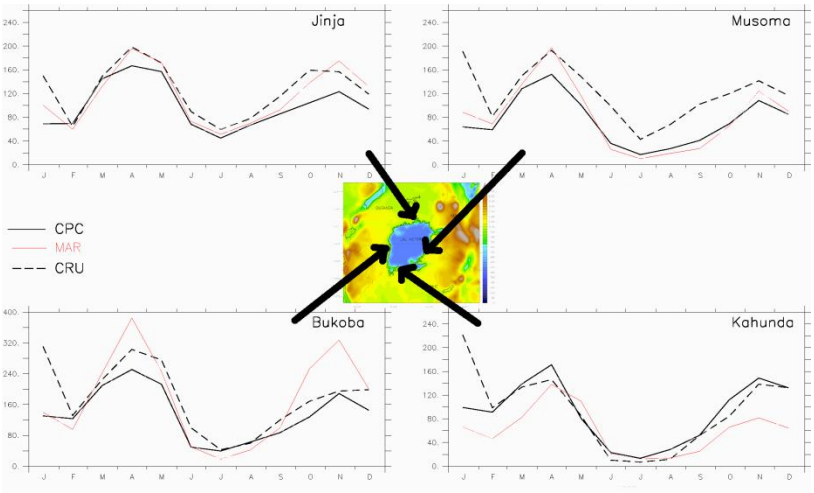


Figure 5. Moyennes des cumuls mensuels de précipitations (en mm/mois) simulées par MAR (lignes rouges continues) et fournies par les données CPC (lignes noires continues) et par les données CRU (lignes noires pointillées) sur la période 1987-2017 pour quatre villes situées sur les rives du Lac Victoria et pointées sur la carte avec les flèches noires. Attention : l'axe des ordonnées pour la ville de Bukoba est différent des autres villes.

3. Discussions

Les Figures 2 à 5 montrent clairement que les deux bases de données d'observations sont assez différentes l'une de l'autre :

- La Figure 2 montre que les précipitations moyennes annuelles observées par CPC (à gauche) et CRU (à droite) sont différentes et ne représentent pas les mêmes quantités aux mêmes endroits (par exemple sur les reliefs en bordure ouest du domaine ou sur les reliefs au nord-est du Lac Victoria).
- La Figure 4 présente des tendances de précipitations entre les deux observations qui sont contraires.
- Même si la variabilité saisonnière est semblable entre les deux observations, la Figure 5 indique que les valeurs moyennes observées comportent des écarts qui peuvent aller jusqu'à 80 mm/mois.

Ces différences importantes entre les deux bases de données d'observation ne permettent pas une comparaison aisée des précipitations simulées par MAR. D'ailleurs, sur la Figure 2, les biais de MAR par rapport aux deux observations sont élevés sur les deux régions (ouest du domaine et nord-est du Lac Victoria) où les différences entre les observations sont elles-aussi élevées.

Même si les variations saisonnières sont cohérentes entre les deux observations, les tendances des précipitations moyennes annuelles sur les 31 années sont contradictoires entre CPC et CRU. Les tendances du MAR indiquent une plus forte similitude avec les données CRU. Cependant, vu l'énorme incertitude des observations, nous ne pouvons rien conclure quant à la tendance des précipitations de 1987 à 2017 sur cette région d'Afrique. D'ailleurs, la tendance générale sur le domaine est faiblement significative aussi bien dans les observations que dans la simulation.

D'autres études (Diem *et al.*, 2014 ; Thiery *et al.*, 2015 ; Nicholson, 2016) illustrent d'ailleurs qu'il n'existe aucune bonne donnée d'observation dans cette région et qu'il est préférable d'utiliser un ensemble d'observations afin d'évaluer au mieux l'incertitude sur les précipitations. La densité des stations météorologiques dans cette région d'Afrique est tellement faible et les périodes de disponibilités tellement fluctuantes dans le temps que des artefacts peuvent apparaître entre plusieurs données d'observations pouvant mener à des incohérences (Maidment *et al.*, 2015).

Conclusions

Dans cette étude, le modèle régional MAR est utilisé pour simuler les précipitations sur la région du Lac Victoria en Afrique Équatoriale de l'Est. MAR, à la résolution horizontale de 15 km, est forcé à ses frontières par les réanalyses ERA-Interim sur la période 1987-2017 et est comparé aux données d'observation maillées CPC et CRU.

Premièrement, l'évaluation des précipitations montre des biais élevés entre MAR et les données d'observations maillées. Cependant, les précipitations provenant des observations sont également très différentes entre elles.

Deuxièmement, la tendance des précipitations simulées par MAR est similaire à la tendance des précipitations fournies par CRU sur la période 1987-2017. Toutefois, la tendance des précipitations fournies par CPC sont contraires à celles fournies par CRU. Il est donc impossible de conclure quoique ce soit de définitif quant à la qualité des précipitations simulées par MAR.

Enfin, troisièmement, MAR est tout à fait capable de simuler les variations saisonnières des précipitations dans cette région. Même si les valeurs observées et simulées sont différentes, il ressort que les observations sont cohérentes entre elles et que les simulations sont également cohérentes avec les observations.

Afin de contrôler les données d'observations maillées, mais aussi d'évaluer de manière robuste les résultats du modèle MAR, une perspective intéressante serait d'obtenir des données d'observation *in situ* d'un ensemble de stations météorologiques. Mais un travail d'analyse de qualité des données serait absolument nécessaire avant leur utilisation.

Finalement, même s'il est relativement compliqué de travailler sur cette région du monde à cause du manque de données d'observations et/ou du manque de continuités dans ces données, il apparaît que la simulation des précipitations par MAR est cohérente tant en termes de répartition spatiale qu'en termes de variabilité saisonnière.

Bibliographie

Agosta C., Amory C., Kittel C., Orsi A., Favier V., Gallée H., van den Broeke M.R., Lenaerts J.T.M., Van Wessem J.M., Van de Berg W.J., Fettweis X., 2019. Estimation of the Antarctic surface mass balance using the regional climate model MAR (1979–2015) and identification of dominant processes. *The Cryosphere*, 13(1), 281–296. Doi: https://doi.org/10.5194/tc-13-281-2019

Brasseur O., Ntezimana V., Gallée H., Schayes G., Tricot C., 1998. *Importance of the convective adjustment scheme in the simulation of the diurnal cycle of convective activity in Africa*. Royal Meteorological Institute of Belgium; Royal Academy of Overseas Sciences, 299–312.

Chen M., Shi W., Xie P., Silva V.B.S., Kousky V.E., Wayne Higgins R., Janowiak J.E., 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 113(D4): D04110. Doi: https://doi.org/10.1029/2007JD009132.

De Ridder K., Gallée H., 1998. Land Surface–Induced Regional Climate Change in Southern Israel. *Journal of Applied Meteorology*, 37(11), 1470–1485. Doi: https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1470:LSIRCC>2.0.CO;2.

Diem J.E., Ryan S.J., Hartter J., Palace M.W., 2014. Satellite-based rainfall data reveal a recent drying trend in central equatorial Africa. *Climatic Change*. Springer Netherlands, 126(1–2), 263–272. Doi: https://doi.org/10.1007/s10584-014-1217-x.

Doutreloup S., Wyard C., Amory C., Kittel C., Erpicum M., Fettweis X., 2019. Sensitivity to Convective Schemes on Precipitation Simulated by the Regional Climate Model MAR over Belgium (1987–2017). *Atmosphere*, 10(1), 34p. Doi: https://doi.org/10.3390/atmos10010034.

Fettweis X., Box J.E., Agosta C., Amory C., Kittel C., Lang C., Van As D., Machguth H., Gallée H., 2017. Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere*, 11(2), 1015–1033. Doi: https://doi.org/10.5194/tc-11-1015-2017.

Fettweis X., Franco B., Tedesco M., Van Angelen J.H., Lenaerts J.T.M., Van den Broeke M.R., Gallée H., 2013. Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, 7(2), 469–489. Doi: https://doi.org/10.5194/tc-7-469-2013.

Gallée H., Moufouma-Okia W., Bechtold P., Brasseur O., Dupays I., Marbaix P., Messager C., Ramel R., Lebel T., 2004. A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*. Wiley-Blackwell, 109(D5): D05108. Doi: https://doi.org/10.1029/2003JD004020.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*. John Wiley & Sons, Ltd, 34(3), 623–642. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.3711.

Kittel C., Amory C., Agosta C., Delhasse A., Doutreloup S., Huot P.-V., Wyard C., Fichefet T., Fettweis X., 2018. Sensitivity of the current Antarctic surface mass balance to sea surface conditions using MAR. *The Cryosphere*, 12(12), 3827–3839. Doi: https://doi.org/10.5194/tc-12-3827-2018.

Maidment R.I., Allan R.P., Black E., 2015. Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa. *Geophysical Research Letters*. John Wiley & Sons, Ltd, 42(19), 8155–8164. Doi: https://doi.org/10.1002/2015GL065765.

Nicholson S.E.., 2016. An analysis of recent rainfall conditions in eastern Africa. *International Journal of Climatology*. John Wiley & Sons, Ltd, 36(1), 526–532. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.4358.

Thiery W., Davin E.L., Panitz H.-J., Demuzere M., Lhermitte S., Van Lipzig N.., 2015. The Impact of the African Great Lakes on the Regional Climate. *Journal of Climate*, 28(10), 4061–4085. Doi: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00565.1.

Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2017. Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959–2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*. John Wiley & Sons, Ltd, 37(5), 2782–2796. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.4879.

Xie P., Chen M., Yang S., Yatagai A., Hayasaka T., Fukushima Y., Liu C., 2007. A Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3), 607–626. Doi : https://doi.org/10.1175/JHM583.1

ACQUISITION D'IMAGES THERMIQUES INFRAROUGES PAR DRONE POUR LA CARACTERISATION DE L'ICU DE SURFACE A ECHELLE FINE : ETUDE PILOTE DANS UNE ZAE DU TERRITOIRE DE METZ METROPOLE (LE PLATEAU DE FRESCATY)

DROGUE G., HASSANI N., MANCEAU L., PARUKE L.

Centre de Recherche en Géographie (LOTERR EA 7304), Université de Lorraine, Metz, France (gilles.drogue@univ-lorraine.fr)

Résumé : *Cet article décrit le test d'une caméra thermique infrarouge non refroidie (caméra FLIR Vue Pro 336, 35°FOV, 9 mm, 30Hz) embarquée à bord d'un drone quadricoptère (DJI Phantom 4 Pro) aux fins de cartographier à échelle fine (100 m x 100 m) la température de surface de la couche de canopée urbaine. Les images acquises sont corrigées radiométriquement par régression linéaire à partir des données thermiques collectées sur 3 cibles stables (une cible froide, une cible chaude, une cible intermédiaire) installées au sol lors de la mission thermographique. Ce test a permis d'obtenir une thermographie d'été, calibrée par l'utilisateur et servant à caractériser le comportement thermique du bâti existant (notamment en termes de gradients thermiques et d'énergie émise) lors d'une après-midi radiative. Nos résultats montrent que, malgré une marge d'erreur importante sur la température absolue, l'utilisation d'une caméra thermique miniature installée sur un drone, permet d'acquérir, après correction radiométrique des images infrarouges d'une qualité suffisante pour être exploitée en climatologie urbaine.*

Mots clés : *drone ; caméra thermique infrarouge ; température de surface ; îlot de chaleur de surface ; Metz Métropole*

Summary: ***Acquisition of infrared thermal images by UAV for the characterization of fine-scale surface ICU: a pilot study in the Metz Métropole area.*** *This paper describes a test of an uncooled thermal infrared camera (the FLIR Vue Pro 336, 35°FOV, 9 mm, 30Hz camera) installed on a quadcopter DJI Phantom 4 Pro UAV in order to map the surface temperature at a fine scale (100 m x 100 m) in the canopy layer. Images are radiometrically corrected by linear regression using ground temperature data recorded on stable plates (a cold one, a warm one and an intermediate) installed during the thermal mission. This test allows to get a summer infrared thermography, calibrated by the user and usable to characterize the thermal behavior of existing buildings (especially in terms of thermal gradients an emitted energy) during a radiative afternoon. Results show that, despite a poor accuracy of absolute temperature estimates, using an miniaturized thermal infrared camera mounted on a UAV is able to provide, after radiometric correction, infrared images of sufficient quality for being exploited in urban climatology.*

Key words: *UAV (drone); thermal infrared camera; surface temperature; surface heat urban island; Metz Métropole*

Introduction

Les images thermiques sont un excellent indicateur de l'énergie émise par les parois urbaines et un très bon descripteur spatio-temporel de l'ICU de surface. Celui-ci se situe à la base de la couche de canopée urbaine et se mesure à partir de la température de surface du sol (solide ou liquide) généralement déduite du rayonnement infrarouge enregistré par un capteur de satellite ou une caméra thermique. La miniaturisation des caméras thermiques permet aujourd'hui de les installer sur des drones. De ce fait, la télédétection par drone est en plein essor en climatologie urbaine (Naughton *et al.* 2019). Cette télédétection de proximité (faible distance caméra-cible) offre l'avantage d'une grande flexibilité (« pouvoir mesurer où et quand on veut ») par rapport à la télédétection satellitale ou à l'aéroporté par avion. En termes d'échelle spatiale, elle est complémentaire à ces deux approches dans la mesure où le champ d'une image drone (prise à basse altitude, ~ 50 m) est typiquement de l'ordre de 100 à 300 m². Cette technologie s'applique donc préférentiellement aux échelles fines (de la rue à l'îlot urbain).

L'objet de cet article est de présenter un premier test d'une caméra thermique infrarouge « low cost » (~ 2500 € TTC) non calibrée, non refroidie, embarquée à bord d'un drone aux fins de

cartographier à échelle fine la température de surface dans une zone d'activité économique en cours de rénovation.

Les objectifs de cette expérimentation sont à la fois fondamentaux et appliqués : i) mettre en place un protocole de correction radiométrique des images thermiques à partir de données terrain qui soit reproductible; ii) caractériser une variabilité sous-maille de la température de surface (par comparaison à la température de surface donnée par la maille Landsat 8 à 100 m de résolution) ; iii) définir des jeux de données de référence pour caractériser le bâti existant vis-à-vis des acteurs de la rénovation (urbanistes, décideurs, bureaux d'études) ; et iv) valider des outils de modélisation du micro-climat urbain (modèle ENVI-met par exemple).

1. Matériel et méthodes

1.1. Acquisition des images

Notre dispositif d'acquisition d'images thermiques infrarouges est composé d'un drone DJI Phantom 4 Pro (aéronef quadricoptère généralement utilisé pour des applications en imagerie optique) et d'une caméra thermique FLIR Vue Pro 336, 35°FOV, 9 mm, 30Hz utilisée couramment pour le diagnostic thermique (Fig.1). La plage de températures de fonctionnement de cette caméra s'étend de -20°C à +50°C et sa bande spectrale se situe entre 7,5 et 13,5 µm (caméra dite à ondes longues). Différents outils et logiciels dédiés au paramétrage du vol et de la caméra sont utilisés lors de la mission : DJI Go 4 (gestion de vol et paramétrage drone), Pix 4D Capture (gestion de vol et paramétrage drone en scénario S1, S2 et S3), FLIR Tools (gestion, paramétrage, exploitation des données issues de la caméra thermique), FLIR UAS (paramétrage caméra thermique), une tablette Ipad servant d'écran de contrôle, Photoscan Pro (post-traitement photogrammétrie).

Figure 1. Dispositif d'acquisition d'images thermiques infrarouges. De gauche à droite : le drone, la tablette Ipad et les batteries ; la nacelle avec la caméra thermique ; le drone en vol avec la nacelle et la caméra thermique « sous abri ». Photographies prises lors de la mission drone du 8 juillet 2019 (Carré de l'Escadron, sur le Plateau de Frescaty).

1.2. Correction radiométrique à partir de données terrain

Comme le signalent Jolivot *et al.* (2014), « les caméras thermiques miniaturisées embarquées à bord de drones n'ont pas de système de contrôle de la température des microbolomètres, ce qui conduit à la dérive continue des données, avec la difficulté de mesurer correctement la température absolue des objets étudiés sur le terrain ». Ceci signifie que les images issues de la caméra thermique utilisée (récupérées en comptes numériques -CN- traduisant les valeurs de luminance) doivent être corrigées en CN pour obtenir une cartographie en température de l'objet ou du site observé. Un protocole inspiré des travaux de Jolivot *et al.* (2014) et des préconisations de Kelly *et al.* (2019) a donc été mis en place afin : d'une part de corriger radiométriquement les images à partir de références terrain présentes dans l'image et dont la température est connue indépendamment et d'autre part, de limiter au maximum les dérives instrumentales. Les références terrain sont des plaques de polystyrène fixées sur un cadre en bois de 1 m², recouvertes de feuilles de canson blanches, noires ou grises, représentant

respectivement une cible froide, une cible chaude et une cible intermédiaire (Fig.2, 3). Chaque cible est munie d'une sonde thermique *Tynitag* (thermistance de type perle) enregistrant en continu la température de surface de la cible. La perle est logée sous la feuille de papier canson au contact du polystyrène. Les températures des cibles chaude et froide correspondent aux températures extrêmes de la zone d'étude. Les mesures de température des *Tynitag* sont utilisées pour recalculer la valeur des autres objets présents dans l'image par l'intermédiaire d'une équation d'étalonnage reliant la température de surface mesurée par les *Tynitag* et la valeur moyenne de luminance (exprimée en CN) de chaque référence terrain pour chaque image brute. Ces références terrain sont facilement identifiables dans le visible et dans l'infrarouge thermique (voir Fig.3, 5) ce qui permet la création d'AOI (Area Of Interest) afin de calculer cette valeur moyenne. Notre protocole intègre également les bonnes pratiques suivantes : i) une protection de la caméra thermique visant à limiter au maximum la dérive découlant de l'instabilité de la température du capteur et l'effet des conditions de vol (effet de refroidissement éolien, radiation solaire) sur les données radiométriques enregistrées ; raison pour laquelle la caméra thermique a été placée dans un abri en polystyrène (Fig.1) ; ii) le préchauffage de la caméra (allumage 30 minutes avant le vol pour stabiliser la température interne de la caméra et éviter d'accentuer la dérive des micro-bolomètres).

Figure 2. A gauche : les 2 ellipses blanches entourent les 3 cibles thermiques en polystyrène posées au sol (cible blanche, cible noire et cible grise) ; à droite : cible grise avec sonde *Tinytag*. Photographies prises lors de la mission drone du 8 juillet 2019 (Carré de l'Escadron, sur le Plateau de Frescaty).

1.3. Zone étudiée

La zone étudiée se situe sur le Plateau de Frescaty, une Zone d'Activités Economiques (ZAE) gérée par la Métropole de Metz à la périphérie sud-ouest de l'agglomération messine.

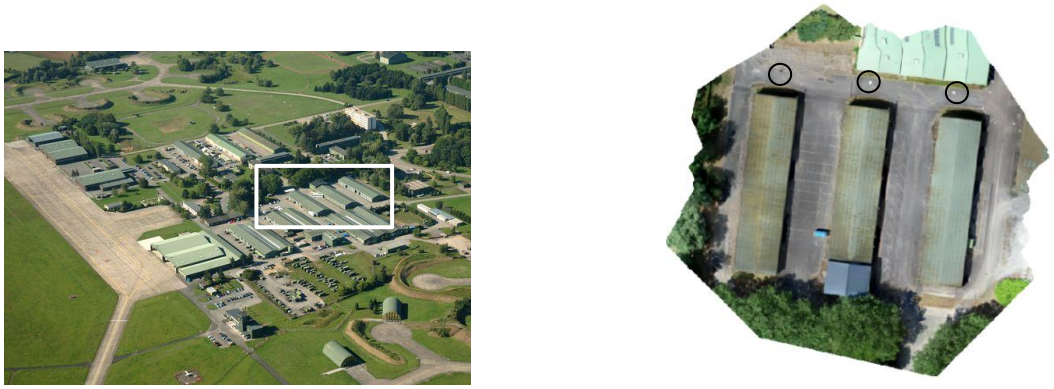


Figure 3. A gauche : La « Base Vie », qui comprend le « Carré de l'Escadron » (rectangle blanc), zone d'étude de la mission drone; à droite : vue aérienne (orthomosaïque de résolution 1.3 cm/pixel) de la zone d'étude où l'on distingue les trois cibles thermiques (ronds noirs) utilisées lors de la thermographie du 8 juillet 2019.

La zone couverte par la mission drone est un carré de 100 m x 100 m composé de hangars, d'un enrobé dégradé et de quelques grands arbres situés en périphérie (Fig.3). Il s'agit du « Carré de l'Escadron » situé dans le secteur de la « Base Vie », qui constitue une priorité pour la

reconversion du site du Plateau de Frescaty, ancienne Base aérienne 128 Metz Frescaty[1]. La Base Vie comprend une trentaine de bâtiments (hébergements, bureaux, hangars techniques et aéronautiques), soit reconvertis, soit en cours de commercialisation (Fig.3). Agrémenté d'espaces verts, cet ensemble compose un cadre de vie agréable, de type campus d'activités.

Compte-tenu des caractéristiques de la zone à survoler, le drone a été utilisé en scénario S3. Préalablement au vol, il a fallu : obtenir les autorisations de la Préfecture et de Metz Métropole, mettre en place un protocole de vol avec la Section Aérienne de Gendarmerie (proximité d'un héliport), obtenir l'accord de l'aéroport Metz-Nancy Lorraine, préparer le matériel topographique (station totale et mires) et celui du drone (accessoires), obtenir le déblocage des zones de non vol DJI par DJI.

1.4. L'acquisition des images

Les images ont été acquises le 8 juillet 2019 par temps ensoleillé et vent faible (rafales inférieures à 20 km/h) à 50 m d'altitude de manière à garantir un taux de recouvrement élevé entre les images. La caméra thermique est calibrée pour prendre un cliché toutes les 2 secondes. L'heure des capteurs (sondes *Tinytag*, caméra thermique, caméra optique) est synchronisée sur l'heure universelle GMT. La zone à survoler étant de taille réduite, le site d'intérêt a pu être couvert en 1 vol. Celui-ci a commencé à 15:45 (heure locale) pour se terminer à 16:00 soit au moment le plus chaud de la journée (22°C sous abri). La faible durée du vol (15 mn) permet de limiter l'effet du déplacement du soleil sur l'horizon sur les variations thermiques dans la zone d'étude.

1.5. Post-traitement des images infrarouges

Les images acquises (81) doivent être orthorectifiées et mosaïquées pour créer une orthomosaïque géoréférencée précise. Cette opération a nécessité l'utilisation des relevés GPS des cibles thermiques (calage du site au GPS monofréquence et ensuite mesure des cibles avec la station totale ou tachéomètre) et la récupération des métadata des images optiques (coordonnées, oméga, phi, kappa, altitude) afin de les prescrire aux images thermiques, la caméra thermique n'étant pas équipée d'un GPS.

Ensuite il a fallu créer des repères sur la modélisation 3D optique afin de les importer sur la modélisation 3D thermique (référentiel de 245 points générés). Cette opération a été réalisée dans l'environnement du logiciel Photoscan Pro dont les fonctionnalités (processus en patchwork, mosaïquage, importation de modèle 3D - issu de la modélisation optique-, texture et tuilage de modèle 3 D -par les images thermiques alignées-) ont permis d'obtenir une orthomosaïque thermique.

2. Résultats

Les données de température des cibles, facilement identifiables et homogènes dans le visible (Fig.3) comme dans l'infrarouge (Fig.5), ont été comparées aux valeurs moyennes de CN par cible (Fig.4).

L'équation de la droite de régression qui ajuste très bien les trois cibles a été utilisée pour convertir les CN en température absolue (Fig.5). Ce géotraitement a été réalisé dans l'environnement du logiciel ArcGIS grâce à l'outil « calculatrice raster ». Le post-traitement photogrammétrique réalisé dans Photoscan a permis d'orthorectifier et de géoréférencer chaque

[1] https://www.metzmetropole.fr/innover-entreprendre/grands-projets/plateau-de-frescaty/les-zones-d-activite/base-vie-339.html

image issue de la caméra thermique, puis de mosaïquer les images de façon à obtenir une orthomosaïque thermique (Fig.5).

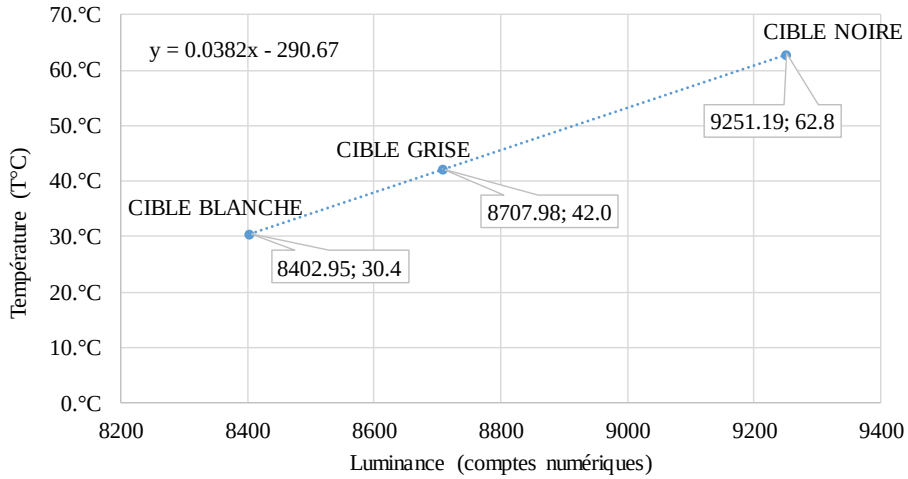


Figure 4. Relation entre comptes numériques (CN) et températures de surface au niveau des trois cibles thermiques (mission drone du 8 juillet 2019, Base Vie Frescaty).

Celle-ci fait clairement ressortir les zones les plus chaudes (pans de toit des hangars orientés à l'ouest et parties d'enrobé plus sombres) qui dégage le plus d'énergie par rayonnement IR et où la température de surface (Ts) excède 60°C. A l'inverse, des zones de fraicheur ressortent nettement : il s'agit des zones ombrées (façades de hangar à l'ombre des arbres, enrobé à l'ombre des hangars) et de la canopée située au sud et à l'ouest de la zone étudiée (Fig.3). La Ts y est inférieure à 30°C voire 20°C pour les endroits les plus frais (au même moment la température sous abri est de 22°C). Les zones au comportement thermique intermédiaire (Ts comprise entre 40°C et 50°C) correspondent principalement aux pans de toit des hangars orientés à l'est et à des parties d'enrobé plus réfléchissantes (Fig.3).

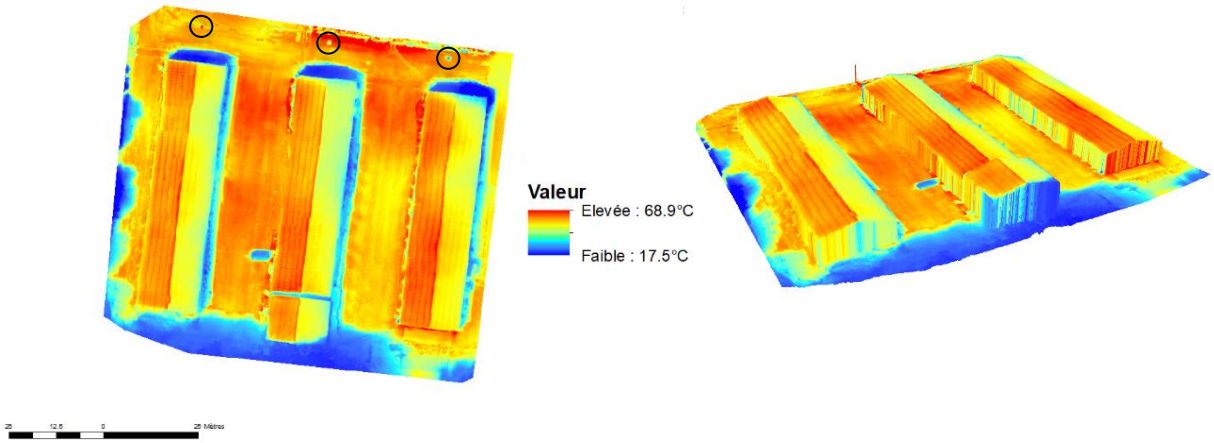


Figure 5. Thermographie d'été du Carré de l'Escadron, sur le Plateau de Frescaty, réalisée à l'aide d'un drone DJI Phantom 4 Pro et d'une caméra FLIR Vue Pro 336 (8 juillet 2019, milieu d'après-midi). A gauche : vue 2D. A droite : vue 3D. Taille de la zone : 80 m x 80 m. Résolution de l'orthomosaïque 2D : 8,48 cm/px. Les ronds noirs indiquent la localisation des cibles thermiques.

Conclusions et Discussion

Nos premiers résultats de thermographie de surface par drone à l'aide d'une caméra thermique non calibrée et non refroidie sont encourageants. La méthode de correction radiométrique semble efficace et restitue des gradients thermiques cohérents sur l'orthomosaïque thermique. Des investigations complémentaires (mesure des Ts par radiomètre au sol par exemple) seraient utiles pour valider les calculs de Ts effectués par étalonnage cible-image et pour vérifier la précision des mesures de Ts effectuées avec les sondes *Tinytag*. Ceci permettrait en outre d'évaluer plus précisément la marge d'erreur de nos estimations. Quoiqu'il en soit, notre étude montre que l'utilisation d'une caméra thermique miniature non calibrée installée sur un drone apporte une information micro-climatique utile en raison : i) de la flexibilité apportée par le drone (plusieurs vols possibles à horaire « libre » au cours de la journée aéronautique) ; ii) de la possibilité de voler à basse altitude (50 m), ce qui garantit une haute résolution spatiale des images (grain centimétrique) ; iii) de la possibilité de survoler des zones peuplées en scénario S3 ; iv) de la bonne restitution, sur les images thermiques, des forts contrastes thermiques qui existent en milieu urbain à une échelle fine. Le traitement des images reste néanmoins une étape chronophage qui requiert une certaine technicité ainsi que des connaissances spécialisées en thermographie infrarouge et dans les logiciels de photogrammétrie. Enfin, le montage d'un kit GPS sur la caméra thermique est indispensable pour simplifier et accélérer le post-traitement des images.

Remerciements

Les auteurs remercient Metz Métropole (en particulier S. Douche et M. Riboulot) pour son soutien logistique et pour l'accès au Plateau de Frescaty, la préfecture de Moselle et la Section Aérienne de Gendarmerie de Metz pour les autorisations de vol, ainsi que Dominique Brion pour la couverture photographique de la mission drone.

Bibliographie

Jolivot A., Gomez-Candon D., Labbé S., Virlet N., & Regnard J.L., 2017. Acquisition d'images thermiques par drone : corrections radiométriques à partir de données terrain. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (213-214)*, n.spéc. Drones, 117-123.

Kelly J., Kljun N., Olsson P.-O., Mihai L., Liljeblad B., Weslien P., Klemedtsson L., & Eklundh L., 2019. Challenges and Best Practices for Deriving Temperature Data from an Uncalibrated UAV Thermal Infrared Camera. *Remote Sensing*, 11, 567p.

Naughton J.B., McDonald W.M., 2019. Evaluating the variability of urban land surface temperatures using drone observations. *Remote Sensing*, 11, 1722p.

Paruke L., 2019. *La thermographie par drone, un outil d'aide à la réhabilitation urbaine.* Mémoire de Master 2 Département de Géographie, Metz, Université de Lorraine, France, 58p.

2019, UNE ANNEE EXCEPTIONNELLE DE FREQUENCE ET D'INTENSITE D'ILOTS DE CHALEUR A RENNES ?

DUBREUIL V., FOISSARD X., NABUCET J., THOMAS A., QUENOL H.

LETG Rennes, Université Rennes 2, CNRS, UMR 6554, Rennes, France (Vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)

Résumé : *Cet article s'intéresse à l'observation de l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Rennes en 2019. Au cours de cette année des températures très élevées ont été observées (record absolu de 40,1°C en juillet) et les conditions sèches et radiatives ont également permis le développement de situations très favorables aux ICU. Ainsi, l'intensité moyenne de l'ICU a atteint 2,7°C, valeur la plus élevée depuis le début des observations (2004). Le nombre de jours de gel a aussi été proche de zéro en centre-ville contre 23 à 30 jours dans la proche campagne. Parallèlement, le nombre de jours d'ICU de très forte intensité (plus de 5°C) a atteint 42, soit presque autant qu'en 2011, précédent record. On a même relevé 14 jours d'ICU supérieur à 6°C (trois fois la valeur normale) dont une valeur maximum de plus de 7°C, deuxième valeur la plus élevée après celle, record absolu, de 8°C observée en octobre 2011.*

Mots clés : *îlot de chaleur urbain ; Rennes ; 2019*

Summary: ***2019, an exceptional year for the frequency and intensity of heat islands in Rennes ?*** *This article focuses on the observation of the urban heat island (UHI) in Rennes in 2019. During this year, very high temperatures were observed (absolute record of 40.1°C in July) and the dry and radiative conditions also allowed the development of very favorable situations for the UHI. Thus, the average intensity of the UHI reached 2.7 ° C, the highest value since the beginning of the observations (2004). The number of frost days was also close to zero in the city center compared to 23 to 30 days in the nearby countryside. At the same time, the number of very high intensity UHI days (over 5 ° C) reached 42, almost the same as in 2011, the previous record. It were also recorded 14 days of UHI above 6 ° C (three times the normal value) including a maximum value of more than 7 ° C, second highest value after the absolute record of 8 ° C observed in October 2011.*

Key words: *Urban Heat Island ; Rennes ; 2019*

Introduction

L'année 2019 a connu deux vagues de chaleur importantes en France au cours des mois de juin et juillet. A cette occasion, Rennes a connu sa température maximale la plus élevée jamais enregistrée, soit 40,1°C ! Dans les villes, la sensation de chaleur a été amplifiée en raison du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) mais il s'agit d'un phénomène marqué essentiellement la nuit et qui s'exprime donc plutôt par les températures minimales (Oke *et al.*, 2017 ; Amorim et Dubreuil, 2017). Pour observer cet ICU, il faut disposer de séries de mesures à échelle fine car le réseau conventionnel n'a pas une densité suffisante pour pouvoir l'appréhender (Masson *et al.*, 2019). Pour ce faire, plusieurs équipes de recherches ont ainsi implanté depuis quelques années des réseaux de mesures permanents dédiés à ce phénomène mais ce sont des réseaux récents. La situation est un peu différente à Rennes où un tel réseau existe depuis 2004 (Dubreuil *et al.*, 2010).

A partir des observations faites par le réseau de suivi de l'ICU à Rennes, cet article propose de resituer l'année 2019 par rapport à la série de mesures disponibles sur l'agglomération. Les indicateurs retenus sont les fréquences d'intensités de l'ICU, définies comme la différence de température entre la station de référence rurale et celle du centre-ville, le nombre de jours de gel et la cartographie de quelques situations particulièrement représentatives en été et en hiver.

1. Données et Méthodes

Pour étudier le phénomène d'ICU, un réseau de stations automatiques a été implanté à partir de 2004 dans le cadre du programme ECORURB (Dubreuil *et al.*, 2010) : ce programme résultait d'une demande sociale forte en liaison avec la gestion délicate d'espèces aviaires invasives, ainsi que d'une volonté politique de mettre en place des actions visant à limiter le

réchauffement climatique à la fois par des mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (première ligne de métro ouverte en 2002) mais aussi de contribuer localement à tenter d'envisager des solutions pour réduire le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

En 2019, le réseau d'observation climatologique permanent de l'ICU à Rennes était constitué de 25 stations automatiques de type DAVIS Vantage Pro, auxquelles il convient d'ajouter les deux stations officielles gérées par Météo-France et par l'INRA (Fig.1) : depuis 2004, la disponibilité totale des données est de l'ordre de 80%, les lacunes principales étant dues au remplacement progressif de la première génération de stations réalisé entre 2008 et 2014. A ce réseau principal s'est ajouté en 2019 un réseau de campagne de mesure ponctuelle de 25 capteurs HOBO disposés sur l'ensemble de l'agglomération en janvier-février et de juin à août permettant d'obtenir une cartographie plus fine des situations hivernales et estivales de l'année 2019.

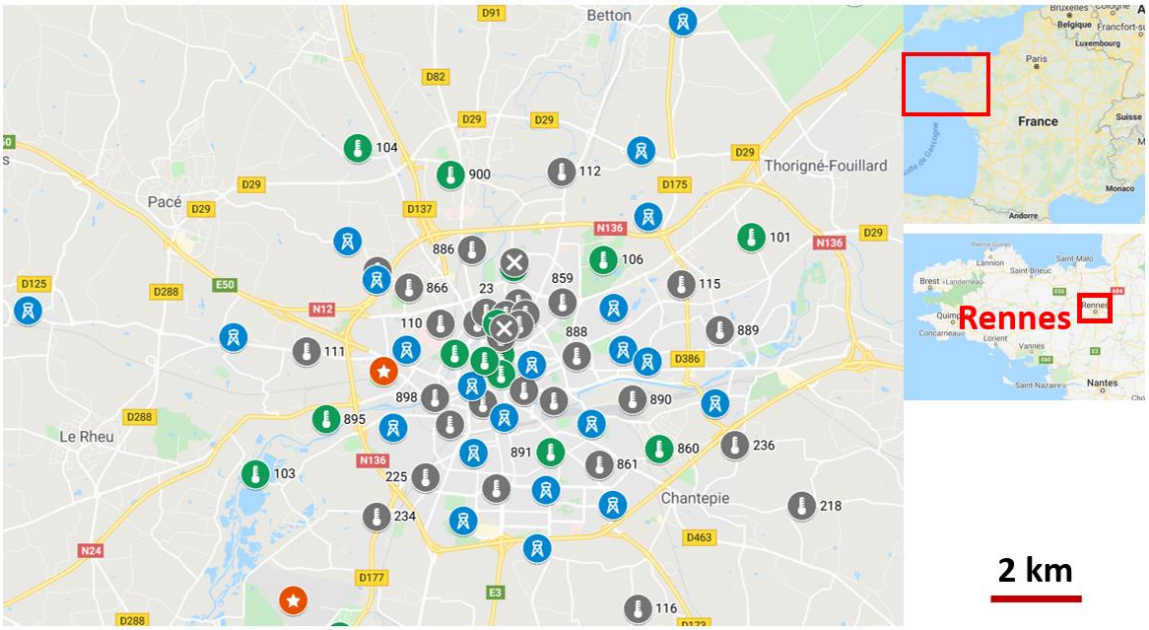


Figure 1. Réseau de mesure météorologique à Rennes en 2019 : en bleu, les stations complètes du réseau permanent ; en orange, les stations officielles de Météo-France et de l'INRA. En vert et en gris, réseau de sondes thermo-hygrométriques (campagnes saisonnières de 2019).

Pour cette étude, les données des températures minimales de deux stations de référence du centre-ville (Griffon et Champs Libres) et de deux stations de référence rurale (Betton-Melesse au nord) sont analysées sur l'ensemble de la période, soit 4807 journées représentant 81% des journées possibles. Les deux couples de stations retenues, dont les données et les caractéristiques paysagères environnantes sont très proches (Nabucet, 2018 ; Foissard *et al.*, 2019), ne présentent que 19% de lacunes essentiellement en 2004, 2008 et 2014 pour des raisons techniques. La base de données représente donc près de 19 années de mesures de l'intensité de l'ICU à pas de temps horaire.

2. Résultats

2.1. Une forte fréquence des ICU de forte intensité à Rennes en 2019

Si l'on classe les ICU par gamme d'intensité de 2°C et plus, les journées où ce seuil est dépassé atteignent une fréquence de 50,6% à Rennes, tous mois confondus et sur l'ensemble de la période, soit un peu plus d'un jour sur deux. Au cours de l'année, les fréquences varient entre 64,6% en septembre, la fin de l'été étant plus favorable à l'accumulation de chaleur en ville, et 31,6% en janvier. Les journées où l'ICU dépasse 4°C représentent 17,1% des cas (62 jours par

an en moyenne) et celles à plus de 6°C 1,4% des observations (5 jours en moyenne par an). En 19 ans, 8 journées au total ont dépassé le seuil de 7°C et le record est détenu par l'ICU du 1er octobre 2011 avec 8°C !

En 2019, le record d'intensité absolue de l'ICU n'a pas été battu : le maximum observé est de 7,1°C le 6 septembre et la deuxième valeur la plus élevée (6,7°C) le 25 juillet, à la fin de l'épisode caniculaire. En revanche, l'intensité moyenne annuelle de l'ICU a atteint 2,7°C, valeur la plus élevée depuis le début des observations (2004), juste devant 2011 (2,6°C). Mais c'est surtout la fréquence des forts ICU qui est remarquable. Ainsi, le nombre de jours d'ICU de très forte intensité (plus de 5°C) a atteint 42, soit autant qu'en 2011, précédent record ; on a même relevé 14 jours d'ICU supérieur à 6°C c'est-à-dire trois fois la valeur normale ! Plus d'un jour sur trois (contre un sur quatre en moyenne) a enregistré un ICU supérieur à 3°C, valeur record observée également en 2011 et les journées de faible ICU (moins de 2°C) n'ont représenté que 42,5% du total, le record étant détenu par 2014 avec 41% (Fig.2).

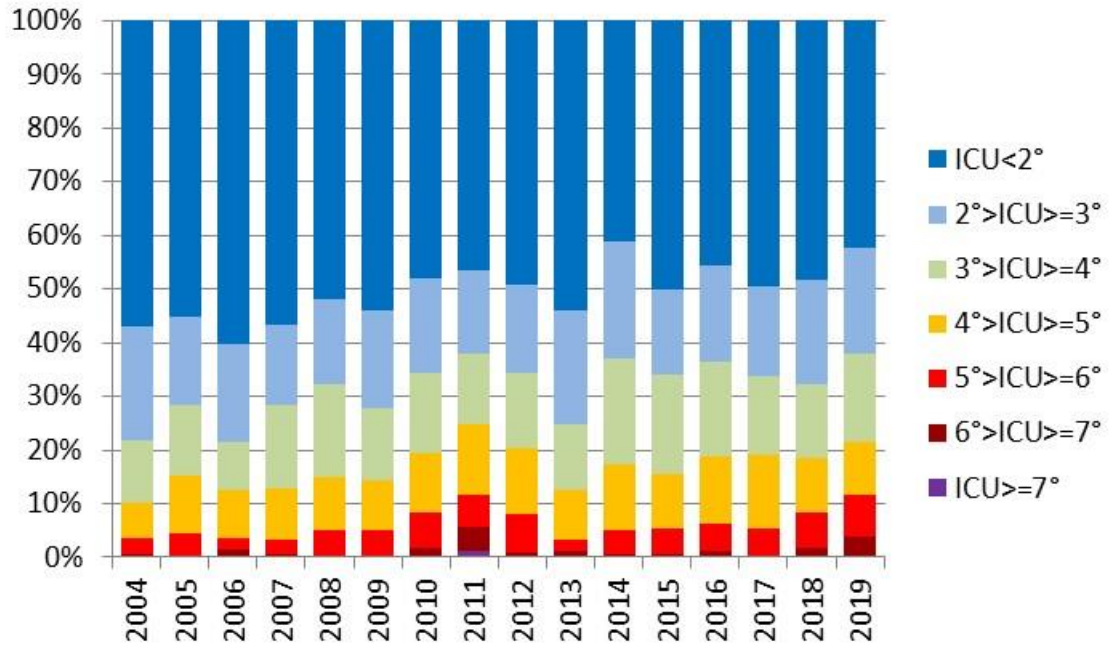


Figure 2. Fréquences annuelles des classes d'intensité d'ICU à Rennes de 2004 à 2019.

L'année 2019 s'inscrit donc avec celles de 2011 et de 2014 comme des années ayant connu le plus grand nombre de situations de fort ICU. 2011 et 2014 étaient des années record en termes de températures moyennes (12,9°C) et minimales (8,3°C pour les deux) : 2019 a été légèrement moins chaude mais elle a surtout été une année peu arrosée (seulement 424 mm de pluie de décembre 2018 à septembre 2019) et très ensoleillée (plus fort ensoleillement observé de février à septembre depuis 1989). Les situations radiatives ont donc prédominé et permis le développement de situations de fort ICU en été comme en hiver. Ainsi, parmi les quatre mois où l'ICU a été le plus marqué, on retrouve les mois d'été (juillet, août et septembre plutôt que juin) mais aussi le mois de février (Fig.3). Pour tous ces mois, le rythme diurne de l'ICU a été très marqué avec de faibles écarts pendant la journée mais avec plus de 3 degrés de différence en moyenne entre le centre-ville et la campagne pendant la nuit, des valeurs bien supérieures à celles observées lors des années antérieures (Dubreuil *et al.*, 2010).

ICU	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Moy.
J	2.0	1.9	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.8	1.3	0.8	0.5	0.5	0.6	0.5	0.8	1.3	1.6	1.7	1.9	2.0	1.9	1.8	1.9	**1.5**
F	3.1	3.1	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.9	2.8	1.7	0.9	0.3	-0.2	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.9	2.1	2.9	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	**2.0**
M	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	1.6	0.6	0.3	0.0	-0.1	-0.3	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.8	1.4	1.7	1.8	1.9	2.0	1.8	**1.1**
A	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.7	2.3	1.3	0.2	-0.3	-0.5	-0.3	-0.2	-0.8	-1.0	-0.8	-0.3	0.6	0.9	1.9	2.2	2.3	2.5	2.6	2.7	**1.3**
M	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	1.9	1.2	0.7	0.6	0.6	0.1	-0.1	0.0	0.2	0.1	0.3	0.3	0.7	1.4	1.9	2.2	2.4	2.5	2.5	**1.4**
J	2.2	2.3	2.1	2.1	1.8	1.7	0.8	0.4	0.4	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.8	0.8	0.7	0.8	1.1	1.3	1.7	2.1	1.9	2.1	2.0	**1.2**
J	3.4	3.5	3.4	3.6	3.4	3.1	1.8	1.2	0.7	0.0	0.2	-0.2	0.2	0.0	0.3	-0.5	0.3	0.6	1.5	1.8	2.3	2.8	2.7	3.3	3.2	**1.7**
A	3.4	3.7	3.8	3.9	3.7	3.7	2.6	2.2	1.1	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	0.4	-0.2	0.2	0.4	1.3	1.9	2.3	3.0	3.1	3.4	3.4	**1.9**
S	3.4	3.3	3.3	3.3	3.1	2.9	2.6	1.4	-0.2	-0.7	-0.6	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.4	1.1	2.1	2.5	2.7	2.8	3.0	3.3	3.5	**1.7**
O	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.5	0.8	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	1.3	1.7	2.0	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	**1.4**
N	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.7	1.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.5	0.5	0.8	1.3	1.7	1.7	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7	**1.3**
D	1.8	1.9	1.7	2.0	2.0	2.2	2.0	1.9	1.9	1.3	0.9	0.4	0.4	0.4	0.6	1.0	1.6	1.8	2.0	2.0	1.7	1.9	1.8	2.1	1.8	**1.6**
Moy.	**2.5**	**2.5**	**2.5**	**2.5**	**2.4**	**2.4**	**2.0**	**1.6**	**1.1**	**0.5**	**0.3**	**0.1**	**0.1**	**0.1**	**0.2**	**0.2**	**0.6**	**1.0**	**1.5**	**1.9**	**2.1**	**2.3**	**2.3**	**2.5**	**2.4**	**1.5**

Figure 3. Variabilité horaire et saisonnière de l'ICU à Rennes en 2019 : différence moyenne par heure (colonne) et par mois (ligne) entre la température de la station de référence rurale et celle du centre-ville (heures T.U.).

2.2. Une quasi-absence de gel au centre-ville en 2019 !

La situation hivernale est donc particulièrement intéressante, notamment au mois de février, marqué par des conditions quasi-printanières. Ce dernier mois a été particulièrement remarquable en termes d'ensoleillement (record historique de 145 heures sur le mois) et de températures maximales, deuxième valeur la plus élevée jamais enregistrée à Rennes.

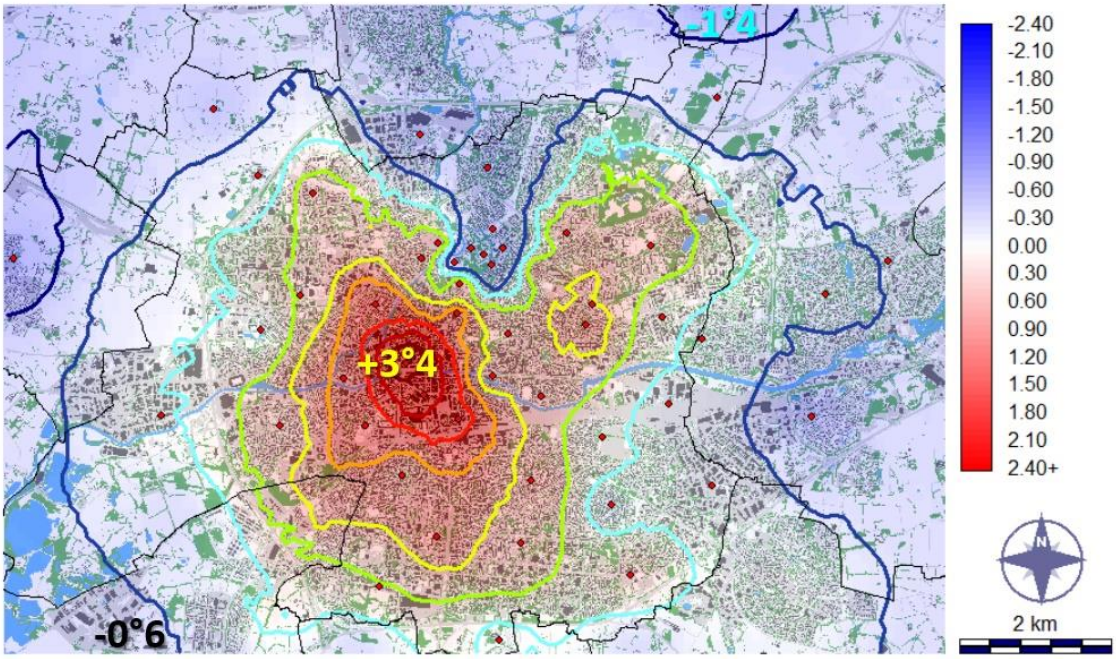


Figure 4. Températures minimales observées à Rennes le 12 février 2019. Isothermes à pas de 0,5°C, isotherme 0°C en bleu clair.

Plus généralement, la douceur hivernale et printanière est clairement renforcée en ville par la présence de l'ICU. La situation du 12 février 2019 est révélatrice à cet égard (Fig.4) : alors qu'il gelait à Saint-Jacques de la Lande et dans tout le bassin rennais, la température est restée largement positive en ville et la différence ville-campagne approchant les 5°C en matinée. Il n'a donc pas gelé en ville et ce phénomène a été récurrent tout au long de l'année. Le nombre de jours de gel sur l'ensemble de l'année 2019 a été de 23 à Saint-Jacques de la Lande et a atteint 31 dans les stations de référence rurales de cette étude, mais il est resté inférieur à 10 dans les stations du centre-ville et même une seule journée dans les deux stations de l'hyper centre servant de référence à cette étude : seule la journée du 31 janvier a connu une température

négative et de justesse (-0,2 et -0,9°C pour les deux stations urbaines centrales). Il est donc probable que le centre de Rennes connaîtra prochainement des hivers sans gel, accentuant la tendance à la baisse de la fréquence de ce phénomène déjà observée dans la région (Merot *et al.*, 2012) et dont les impacts sont déjà perceptibles sur la végétation (Quenol *et al.*, 2010).

2.3. Un bien bel été !

L'été 2019 a connu deux vagues de chaleur importantes en France au cours des mois de juin et juillet. A cette occasion, de nombreux records de maxima absolus ont été battus un peu partout et Rennes n'y a pas fait exception : ainsi, le record absolu d'août 2003 de 39,5°C a été dépassé par la mesure du 23 juillet 2019 atteignant 40,1°C ! A la fin du mois de juin, un premier épisode caniculaire avait déjà fait monter les températures à Rennes jusqu'à 35,7°C. Pour autant, les moyennes des minimales comme des maximales n'ont pas atteint des valeurs exceptionnelles : le mois le plus chaud a été juillet avec une moyenne de 21,1°C ce qui implique que, du point de vue de la classification de Köppen, l'année est restée de type Csb (c'est à dire le type le plus fréquent à Rennes) et pas Csa comme 2006 ou 2003 (Eveno *et al.*, 2016 ; Dubreuil *et al.*, 2018). Pourtant, en ville, la sensation de chaleur a souvent été plus forte, en raison du phénomène d'ICU, comme l'illustre la situation du 24-25 juillet (Fig.5).

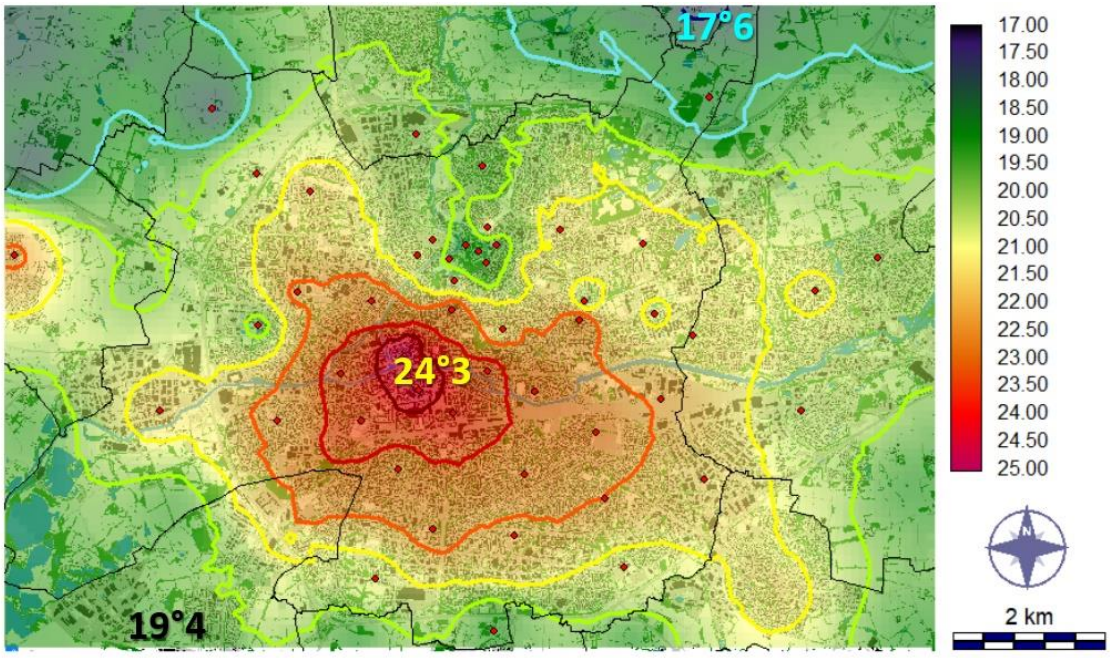


Figure 5. Températures minimales observées à Rennes le 25 juillet 2019 : l'intensité de l'Ilot de chaleur dépasse 7°C une bonne partie de la nuit du 24 au 25 juillet 2019 et s'établit à 6,7°C le matin. Isothermes à pas de 1°C.

Lors de cet épisode caniculaire, la température n'est pas descendue en dessous de 20°C dans le centre-ville pendant 4 jours, du 23 au 26 juillet : la plus forte intensité de l'ICU a été relevée pendant la nuit du 24 au 25 avec une amplitude sur les minimales de près de 7°C. La carte de la figure 5 montre dans le détail comment l'ICU a été modulé par la présence de zones végétalisées : c'est le cas de l'ensemble des espaces verts autour des prairies Saint Martin, au nord de la commune connues pour être une sorte d'îlot de fraîcheur à proximité immédiate du centre-ville (Nabucet, 2018 ; Foissard *et al.*, 2019) : le gradient observé y est souvent très important, supérieur à 4°C ce jour. C'est aussi le cas pour le Parc du Thabor, également proche du centre historique, dont la température est restée 2 degrés inférieure à celle du centre-ville pendant cette séquence.

Conclusion

Rennes aura connu en 2019 de fortes fréquences et intensités des îlots de chaleur urbain. De manière générale, au-delà des deux épisodes de canicule au demeurant assez brefs, ce sont les conditions de sécheresse qui ont permis des conditions favorables à la genèse des ICU. Ceci explique pourquoi les ICU ont pu se développer de nuit aussi bien l'été (situation classique) que l'hiver : leur développement même pendant la saison froide est remarquable et tend à rendre très rare (voire quasi inexistant) le gel dans le centre-ville de Rennes.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CAPES/COFECUB Sh 941/19, CiClAMEn (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies). Les recherches s'inscrivent également dans les dispositifs « Zone Atelier Armorique » et DIPEE (Dispositifs de partenariat en écologie et environnement) du CNRS.

Bibliographie

Amorim M. C. C. T., Dubreuil V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, (5), 91-104.

Dubreuil V., Quenol H., Foissard X., Planchon O., 2010. Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes, in P.Clergeau (dir.) *Ville et biodiversité: les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire*. Presses Universitaires de Rennes, 105-122.

Dubreuil V., Lamy C., Planchon O., 2018. Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur. *Actes du colloque Les risques naturels dans le contexte de changement climatique*, Cluj-Napoca, Roumanie, 14-17 mars 2018, 15-21.

Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V., Quenol H., 2016. Variabilité et changement climatique en France : analyses au moyen de la classification de Köppen et des « types de climats annuels ». *Climatologie* (13), 47-70.

Foissard X., Dubreuil V., Quenol H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29.

Masson V., *et al.*, 2019. City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate* (31), 100536.

Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : Évaluation, impacts, perceptions.* Rennes, Presses Universitaires de Rennes, Coll. Espaces et Territoires, 400p.

Nabucet J., 2018. *Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain.* Thèse de doctorat de géographie de l'Université Rennes 2.

Oke T. R., Mills G., Christsen A., Voogt J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge, Cambridge University Press, 546p.

Quenol H., Dubreuil V., Mimet A, Pellissier V., Aguejdad R, Clergeau P., Bridier S., 2010. Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. *La Météorologie*, (68), 50-57.

ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES

DUBUISSON B., BERNUS S., CORRE L., DROUIN A.

Météo-France, Direction de la Climatologie, et des Services Climatiques, France (brigitte.dubuisson@meteo.fr)

Résumé : *Caractériser les évolutions moyennes et extrêmes des précipitations en France est un enjeu sociétal primordial, notamment pour la production agricole. Des travaux récents ont mis en évidence une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements pluvieux extrêmes sur le pourtour méditerranéen au cours des dernières décennies. Observe-t-on aussi des tendances significatives sur le reste du territoire métropolitain ? Pour répondre à cette question, nous analysons un jeu de 274 séries quotidiennes de référence pour les précipitations sur la France qui permet d'établir un diagnostic de l'évolution des précipitations sur la période 1961-2012. Ces séries ont été sélectionnées sur des critères d'homogénéité temporelle et d'absence de données manquantes. Elles couvrent la quasi-totalité des départements. L'étude se base sur l'évolution de 11 indices standards recommandés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (Expert Team on Sector-Specific Climate Indices), parmi lesquels certains font l'objet d'une analyse plus détaillée.*
Les évolutions de l'intensité des précipitations moyennes et extrêmes sont respectivement caractérisées par le cumul des précipitations quotidiennes supérieures à 1mm et le maximum des cumuls de précipitations en une journée. L'évolution de la fréquence est examinée via le nombre de jours où le cumul quotidien dépasse un seuil donné. A l'échelle de la station, peu d'évolutions sont significatives et il est difficile de tirer des conclusions à plus grande échelle. Pour améliorer le rapport signal/bruit, nous calculons des tendances à l'échelle régionale. Nos résultats confirment le caractère singulier du pourtour méditerranéen, connu comme un « hot-spot » du changement climatique, et où l'augmentation des extrêmes de précipitations est particulièrement significative. Quel que soit l'indice considéré, l'intensité des précipitations est aussi à la hausse en Bretagne, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne – Rhône-Alpes.

Mots clés : *diagnostics du changement climatique ; évolution des précipitations ; précipitations France*

Summary: ***Rainfall evolution in metropolitan France during the recent decades.*** *Characterizing the average and extreme changes in rainfall in France is a key societal issue, particularly for agricultural sector. Recent studies have highlighted an increase in the intensity and frequency of extreme rainfall events around the Mediterranean in recent decades. Are significant trends also observed in the rest of the metropolitan territory? To answer this question, we analyse a set of 274 daily reference series for rainfall over France which enables a diagnosis of the evolution of rainfall over the period 1961-2012. These series were selected on criteria of temporal homogeneity and absence of missing data. They cover almost all French departments. The study focusses on the evolution of 11 standard indices recommended by the World Meteorological Organization (Expert Team on Sector-Specific Climate Indices), some of which are the subject of a more detailed analysis.*
The changes in the intensity of average and extreme rainfall are respectively characterized by the sum of daily rainfall greater than 1mm and the maximum daily amount of rainfall. The evolution of frequency is examined via the number of days where the daily amount exceeds a given threshold. Based on local (stations) analysis, few evolutions are significant and it is difficult to draw conclusions on a larger scale. In order to improve the signal-to-noise ratio, we calculate regional trends. Our results confirm the singular character of the Mediterranean rim, known as a "hot-spot" of climate change, and where the increase in precipitation extremes is particularly significant. Whatever the index considered, the intensity of precipitation is also on the rise in Bretagne, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté and Auvergne-Rhône-Alpes.

Key words: *climate change diagnostics; rainfall evolution; precipitation France*

Introduction

L'évolution des températures en France métropolitaine atteste d'un réchauffement sur les dernières décennies, quelles que soient la saison et l'échelle spatiale considérées (Gibelin *et al*., 2014). Le rôle du forçage anthropique sur ce réchauffement est, de plus, clairement établi. Sur les précipitations, la variabilité spatio-temporelle est très forte et rend l'analyse à l'échelle de la station très bruitée. Si l'évolution des précipitations moyennes dépend des saisons/régions, on s'attend en revanche à une accentuation des extrêmes en réponse l'augmentation de la température en lien avec la relation de Clausius Clapeyron (Ribes *et al*., 2018).

Plusieurs études ont cherché à caractériser l'évolution des extrêmes de précipitations en Europe (par exemple Scherrer *et al*., 2016, Brugnara *et al*., 2012), En France, des travaux récents ont mis en évidence une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements pluvieux extrêmes sur le pourtour méditerranéen au cours des dernières décennies (Ribes *et al*., 2018). L'objectif de cette étude est de caractériser l'évolution des précipitations à partir de données observées, issues de séries quotidiennes de référence.

1. Données et Méthodes

1.1. Données : séries quotidiennes de référence (SQR)

Pour analyser l'évolution d'indices climatiques, il est nécessaire de disposer de données d'observations homogènes. Afin de rendre les mesures comparables dans le temps et de ne pas biaiser les études d'évolution temporelle, les séries mensuelles sont homogénéisées (méthode HOMER, Mestre *et al*., 2013). Différents critères sont ensuite appliqués à ces séries (idem Moisselin et Dubuisson, 2006), et permettent de définir une sélection de séries quotidiennes de référence (SQR). Nous utilisons ici 274 SQR de précipitations définies sur la période 1961-2012 couvrant la métropole avec une densité spatiale hétérogène (voir Fig.1a).

1.2. Indices calculés

Différents indices caractérisant les précipitations sont calculés en utilisant l'outil CLIMPACT2 disponible sous R (Alexander et Hérold, 2015). Il permet de calculer plus de 60 indices climatiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM)/ ET-SCI et des experts de différents secteurs. L'analyse porte ici sur les indices de précipitations quotidiennes appliqués aux SQR (Tab.1).

Tableau 1. Définition des indices calculés sur les précipitations, regroupés en 4 catégories : intensité (jaune), fréquence (bleu), cumuls (vert) et autres (gris).

Indice	Définition
rx?day	Cumul du maximum annuel/saisonnier de précipitations quotidiennes sur ? jours (1, 3 ou 5)
R?mm	Nombre de jours annuel/saisonnier avec des cumuls quotidiens supérieurs à ? mm (1, 10, 20 ou 30 mm)
prcptot	Cumul annuel/saisonnier des précipitations quotidiennes supérieurs à 1 mm
sdii	Cumul moyen des précipitations quotidiennes = prcptot / r1mm
cdd	Nombre annuel maximum de jours secs consécutifs (précipitations quotidiennes < 1mm)
cwd	Nombre annuel maximum de jours humides consécutifs (précipitations quotidiennes ≥ 1mm)

1.3. Méthodes de diagnostics

Deux méthodes sont appliquées pour l'estimation des tendances, selon le type d'indice étudié. Pour les données de comptage (par exemple r10mm), un Modèle Linéaire Généralisé (GLM) avec une distribution de Poisson est utilisé. Pour les autres indices, nous calculons la tendance linéaire de Theil-Sen. La significativité de ces tendances est ensuite testée via le test non paramétrique de Mann-Kendall. Les tendances avec p-values <0,10 sont considérées significatives.

L'analyse des tendances à la station souligne le caractère bruité de l'évolution des précipitations sur la France. Pour améliorer le rapport signal/bruit et dégager des messages plus clairs, nous agrégeons l'information à l'échelle régionale, cette agrégation est ici réalisée par

comptage des tendances significatives. A noter, sur la région Corse, seules 4 SQR très proches les unes des autres sont disponibles, ce qui limite l'analyse à échelle régionale.

2. Résultats

Parmi la liste des indices (Tab. 1), trois sont ici analysés en détails pour illustrer l'évolution des cumuls moyens de précipitations (prcptot), l'intensité des précipitations extrêmes (rx1d) et la fréquence des jours de pluie (r1mm). Pour chaque indice, la carte pointée (référencée a) représente la tendance de l'indice en chaque station sur le période 1961-2012, et le graphe (référencé b) illustre les évolutions agrégées. L'axe des abscisses balaye les zones géographiques, illustrant d'abord les 13 régions administratives du nord vers le sud, puis les moitiés nord (NRD), sud (SUD), le pourtour méditerranéen (MED) et la France. Un rectangle correspond à une zone géographique (abscisse) et une saison (ordonnée). Chaque rectangle est divisé en deux : le triangle de gauche caractérise les tendances à la hausse, celui de droite les baisses. La couleur du triangle indique la proportion de tendances significatives, respectivement à la hausse (vert) ou à la baisse (marron), par rapport au nombre total (significatives ou non). Par exemple, pour prcptot à l'échelle de la France, 11 % des stations montrent une hausse significative des cumuls annuels (triangle vert à gauche) et seules 4 % une baisse significative (triangle grisé à droite).

2.1. Cumul de précipitations

Au pas de temps annuel, l'évolution de prcptot n'est pas uniforme sur l'ensemble du territoire, avec des tendances de signes opposés allant de -60 à +60 mm/10 ans (Fig.1a). 61 % des stations présentent des tendances à la hausse. Au-delà de 20 mm/ 10 ans, la plupart sont significatives mais les hausses significatives ne représentent que 11 % du total des tendances calculées. Elles concernent des stations situées notamment en Bretagne et sur un large quart Nord-Est. Sur le quart Sud-Ouest, les tendances sont majoritairement à la baisse mais peu sont significatives. Ailleurs, aucune évolution ne se dégage.

Au pas de temps saisonnier (Fig.1b), l'évolution de l'indice prcptot montre un contraste Nord-Sud en hiver, avec une baisse des cumuls dans le Sud et une hausse dans le Nord. En été, les tendances sont plutôt à la hausse à l'exception du pourtour méditerranéen. Au printemps, on ne note aucune évolution et en automne, seules quelques stations présentent une augmentation significative sur l'Est du pays, notamment en vallée du Rhône.
Notons que quel que soit le pas de temps considéré (annuel ou saisonnier), les résultats décrits ci-dessus sont cohérents avec l'évolution du cumul de précipitations calculé à partir de plus de 1000 séries mensuelles homogénéisées disponibles sur le territoire métropolitain (voir http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd).

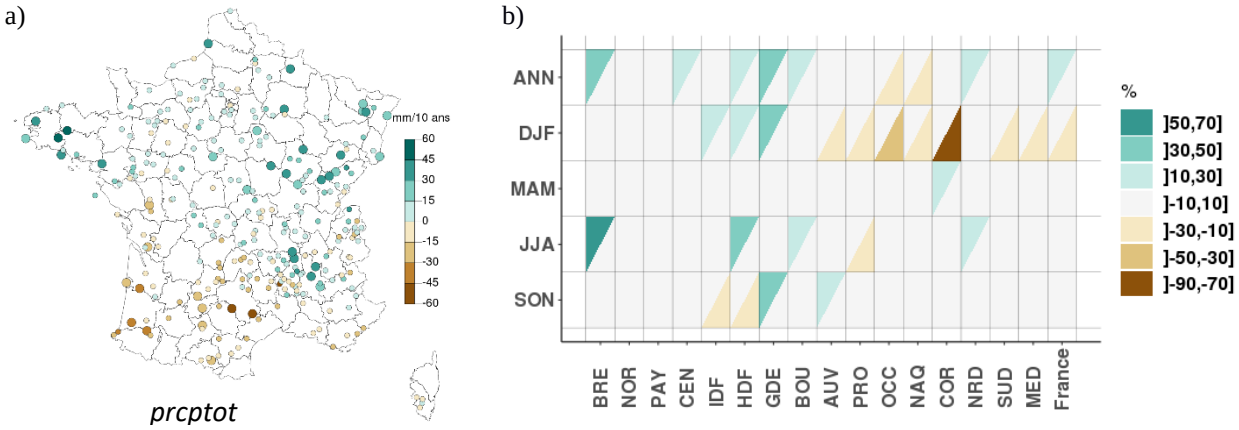


Figure 1. Tendances de *prcptot* sur la période 1961-2012 a) calculée annuellement sur les SQR, et b) agrégées par zones géographiques pour les tendances significatives sur les données annuelles et saisonnières.

2.2. Intensité des précipitations extrêmes

L'intensité des précipitations extrêmes est analysée via l'indice rx1day. Au pas de temps annuel, 15% des stations présentent une hausse significative (Fig.2). Elles sont situées notamment sur la vallée du Rhône et le pourtour méditerranéen, associées à une augmentation marquée en automne (Fig.2b). Elles concernent aussi la Bretagne, le quart Nord-Est et le Centre. En dehors du quart Sud-Est, l'évolution de rx1day n'est pas marquée : des stations voisines peuvent présenter des tendances de signe opposé. Sur le Sud-Ouest, on observe quelques baisses significatives à l'échelle de la station (3 % des stations de métropole).

Comme pour les cumuls moyens, l'évolution de rx1day présente un contraste nord-sud en hiver (Fig.2b) avec une augmentation au nord et une diminution (majoritairement non significative) au sud. Au printemps, les cas significatifs sont plutôt à la hausse. En automne, on observe une hausse sur le Sud-Est, et des baisses significatives localement ailleurs.

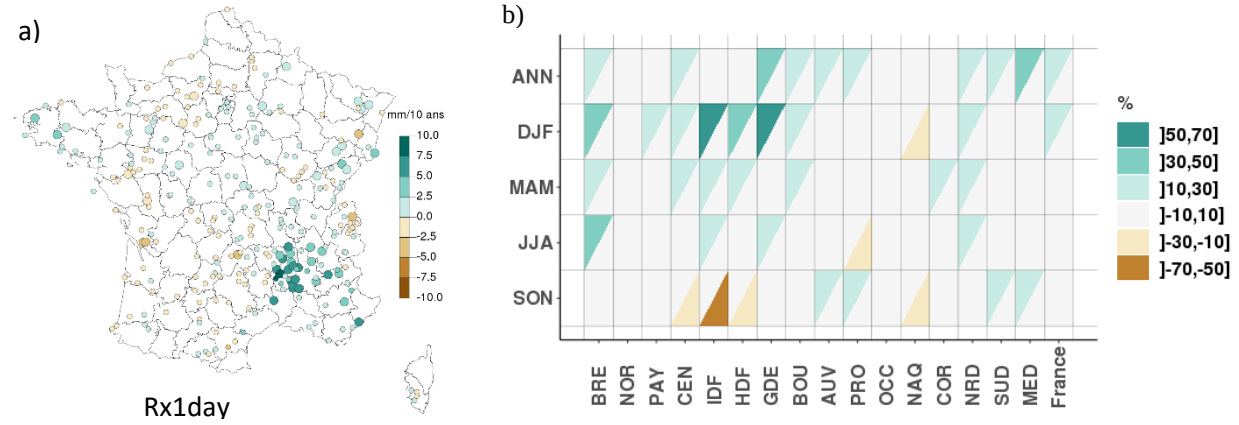


Figure 2. Tendances de *rx1day* sur la période 1961-2012 a) calculé annuellement sur les SQR, et b) agrégées par zones géographiques pour les tendances significatives sur les données de *rx1day* annuelles et saisonnières.

2.3. Fréquence des jours de pluie

Une majorité des stations montre une augmentation du nombre annuel de jours de pluie (61% et 12 % des stations en hausse significative, Fig.3). Elles concernent surtout le nord du pays. Sur la moitié sud, les tendances sont plus bruitées, en lien avec des évolutions saisonnières contrastées, notamment sur la vallée du Rhône. Le contraste nord-sud est très clair en hiver : une nette majorité des stations de la moitié nord attestent d'une augmentation du nombre de jours de pluie (77 %), et inversement dans la moitié sud. Au printemps, le nombre de jours de

pluie est plutôt à la baisse (80 % des tendances négatives et 10 % significatives). A l'inverse, en été et automne, le nombre de jours de pluie augmente (79 % et 16 % ; 89 % et 9 % d'augmentations significatives, respectivement), mais avec des répartitions spatiales variables : augmentation plus marquée sur le nord-ouest en été, sur l'est en automne.

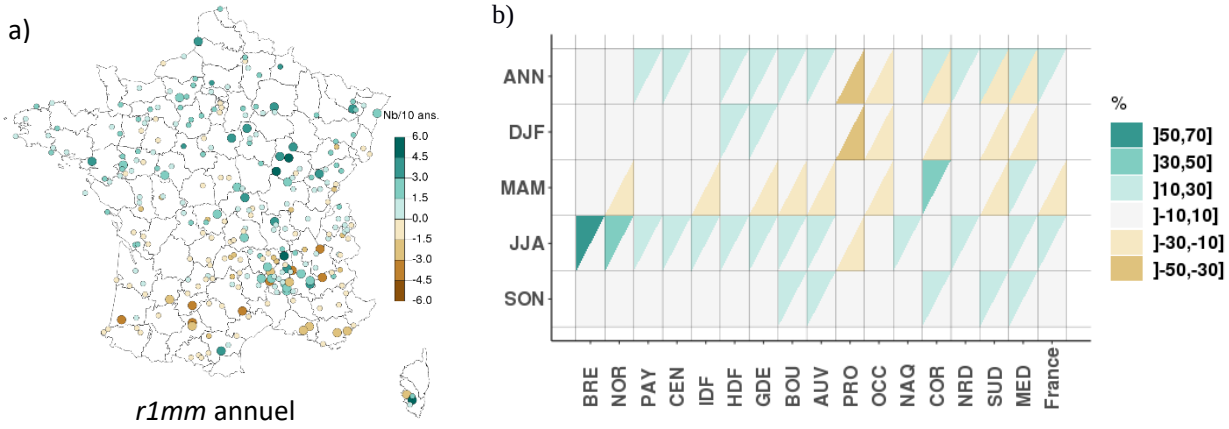


Figure 3. Tendances de *r1mm* a) annuel sur les données à la station SQR, et b) agrégées par zones géographiques pour les tendances significatives sur les données annuelles et saisonnières.

2.4. Ensemble des 11 indices

À l'échelle annuelle (Fig.4), sur la période 1961-2012, une majorité d'indices et de zones présentent des tendances à la hausse, en particulier sur la Bretagne pour la plupart des indices intensité, fréquence, et cumuls. Quant au pourtour méditerranéen, une baisse de la fréquence des événements de faibles cumuls est observée (jusqu'à 10 mm). À l'inverse, une hausse se produit pour l'intensité des événements extrêmes. Pour la Nouvelle-Aquitaine, tous les indices sont à la baisse.

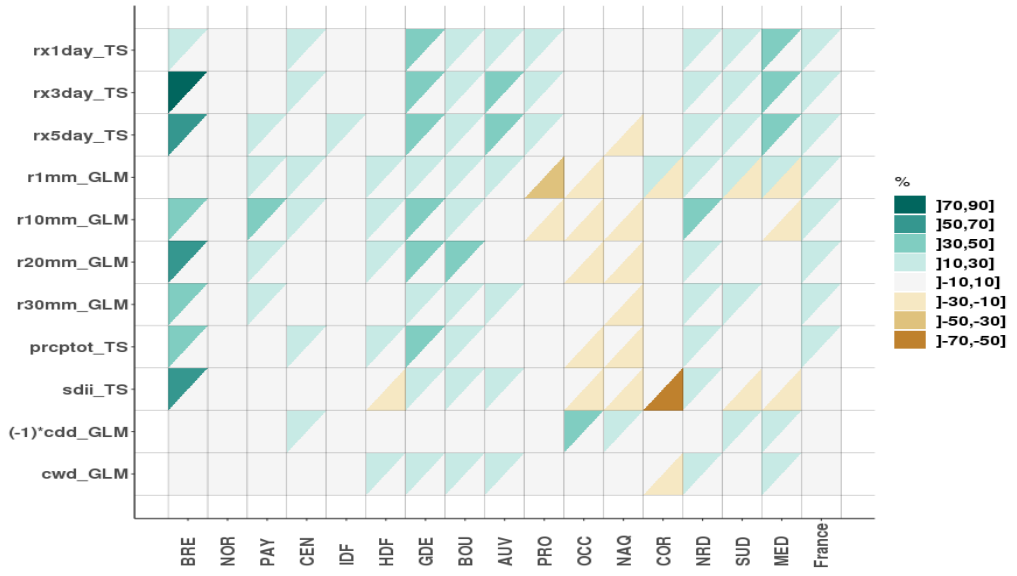


Figure 4. Evolution des 11 indices retenus agrégé par zones géographiques (proportion de tendances significatives) sur les données annuelles

À l'échelle saisonnière, l'évolution en hiver est caractérisée par un contraste nord-sud marqué : une majorité d'indices tant sur les cumuls moyens et extrêmes que sur les fréquences est en hausse sur la moitié nord du pays et en baisse sur le sud. En été, les indices sont

majoritairement en hausse sur le Nord et plutôt à la baisse sur le reste du pays, mais le contraste est moins net qu'en hiver. Au printemps, il n'y a pas d'évolution des cumuls de précipitations, mais le nombre de jours de pluie diminue sur de nombreuses régions hormis le pourtour Méditerranéen, et le cumul moyen des jours de pluie (*sdii*) augmente. En automne, on note à l'inverse une diminution du cumul moyen des jours de pluie (*sdii*) à l'exception du pourtour Méditerranéen.

Conclusions et Discussion

L'analyse détaillée de *prcptot*, *rx1day* et *r1mm* souligne une forte variabilité spatiale des tendances aux stations, et des évolutions contrastées selon les saisons. On rappelle que les résultats présentés peuvent être sensibles à la période étudiée (Brugnara *et al*., 2012). Cette analyse illustre également la nécessité d'agréger les tendances à une échelle spatiale plus large, ici une agrégation par comptage sur les 13 régions administratives de métropole. Elle nous a permis de dégager des messages à l'échelle de certaines régions. Nos résultats confirment le caractère singulier du pourtour méditerranéen, connu comme un « hot-spot » du changement climatique, et où l'augmentation des extrêmes de précipitations est particulièrement significative. Quel que soit l'indice considéré, l'intensité des précipitations est aussi à la hausse en Bretagne, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne – Rhône-Alpes. Des travaux sont en cours pour utiliser des méthodes d'agrégation spatiale telle qu'utilisée par Ribes *et al*., 2018 qui permettent d'estimer l'évolution moyenne à l'échelle régionale, et pourraient faire émerger des évolutions détectables en maximisant le rapport signal/bruit.

Bibliographie

Alexander L., Herold N., 2015. ClimPACTv2 Indices and Software. A document prepared on 586 behalf of the Commission for Climatology (CCl) Expert Team on Sector-Specific Climate 587 Indices (ET-SCI). URL: https://github.com/ARCCSSextremes/climpact2/blob/master/ClimPACTv2_manual.pdf

Brugnara Y., Brunetti M., Maugeri M., Nanni T. & Simolo C., 2012. High-resolution analysis of daily precipitation trends in the central Alps over the last century. *Int. J. Climatol*., 32, 1406–1422. Doi:10.1002/joc.2363.

Gibelin A.L., Dubuisson B., Corre L., Deaux N., Jourdain S., Laval L., Piquemal J.M., Mestre O., Dennetière D., Desmidt S., Tamburini A., 2014. Evolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence, *La Météorologie*, 87, 45-53. URL : http://hdl.handle.net/2042/54336 ; doi: 10.4267/2042/54336.

Mestre O., Domonkos P., Picard F., Auer I., Robin S., Lebarbier E., Böhm R., Aguilar E., Guijarro J., Vertachnik G., Klancar M., Dubuisson B., & Stepanek P., 2013. *HOMER: A homogenization software –Methods and applications*. Időjárás, 117, 47-67.

Moisselin J.-M., Dubuisson B., 2006. Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XXe siècle en France. *La Météorologie*, 54, 33-42.

Ribes A., Thao S., Vautard R., Dubuisson B., Somot S., Colin J., Planton S., Soubeyroux J.-M., 2018. Observed increase of extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*. Doi: 10.1007/s00382-018-4179-2 CLDY-D-17-00226.

Scherrer S. C., Fischer E. M., Posselt R., Liniger M. A., Croci-Maspoli M., & Knutti R., 2016. Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *J. Geophys. Res. Atmos*., 121, 2626–2637. Doi: 10.1002/2015JD024634.

CONSTRUIRE UN RÉSEAU DE MESURES ATMOSPHERIQUES EN TEMPS RÉEL, PREMIÈRE PHASE DES SERVICES CLIMATIQUES DE TOULOUSE MÉTROPOLE

DUMAS G.[1], MASSON V.[1], HIDALGO J.[2]

1 CNRM UMR 3589, Météo-France/CNRS, Toulouse, France (guillaume.dumas@]meteo.fr)
2 LISST UMR 5193, CNRS/UT2J, Toulouse, France

Résumé : *Depuis 2016, Toulouse Métropole déploie un réseau de station météorologiques semi-professionnelles. Le but est de disposer d'un observatoire dynamique pour réaliser des études de micro-climatologies comme la caractérisation et le suivi de l'ICU (Ilot de Chaleur Urbain) toulousain. Pour ce faire, elle s'est liée au CNRM[1] pour développer et déployer ce réseau. Contrairement à d'autres réseaux, celui-ci a pour particularité d'être directement pensé et intégré en tant que services climatiques pour la métropole tel que l'OMM[2] les définit. Nombreuses directions de la Métropole, au travers de leurs différents services ainsi que des partenaires tierces, ont donc été mobilisés pour définir les emplacements du réseau par rapports aux besoins et applications métiers. Cette présentation propose un retour sur cette co-construction avec un focus sur le monitoring de l'ICU. A la fois au travers des interventions avec les acteurs ainsi que les données mobilisées pour répondre à leurs besoins. Mais aussi en présentant la solution technique retenue : données relevées, fréquences et technologies employées.*

Mots clés : *IUWECS (Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services) ; ICU ; SigFox ; Davis instruments ; Toulouse*

Summary: ***Building a network of real-time atmospheric measurements, the first phase of Toulouse métropole's climatic services.*** *Since 2016, Toulouse Métropole has deployed a network of semi-professional weather stations. The goal is to have a dynamic observatory to carry out micro-climatology studies such as the characterization and monitoring of the Toulouse ICU (Ilôt de Chaleur Urbain). To do this, it linked up with the CNRM1 to develop and deploy this network. Unlike other networks, it has the particularity of being directly thought out and integrated as climate services for the local authority as defined by the WMO. Numerous departments of the Metropole, through their various services as well as third party partners were therefore mobilized to define the locations of the network in relation to specific needs and applications. This presentation offers a return on this co-construction with a focus on the UHI monitoring. Both through interventions with stakeholders and the data mobilized to meet their needs. But by presenting the technical solution chosen: data collected, frequencies and technologies used.*

Key words: *IUWECS (Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services); ICU; SigFox; Davis instruments; Toulouse*

Introduction

De nombreuses villes sont équipées de réseaux de mesures de températures pour étudier l'ICU (*Ilôt de Chaleur Urbain*, ou UHI en anglais, *Urban Heat Island*) (Muller *et al.*, 2013). Le réseau est souvent développé et pensé par une entité de recherche, comme un laboratoire ou une université, et intégré à un projet de recherche. Les données sont la plupart du temps recueillies manuellement *via* l'utilisation de dataloggers. Les services urbains ne sont pas forcément concertés, excepté pour obtenir des autorisations de poses. Avec la montée des services climatiques, soutenus par l'OMM à l'international, et par l'ADEME et Météo France à l'échelle nationale, des réseaux émergent en tant que services climatiques, financés par les villes mais gérés par le monde de la recherche (Chapman *et al*., 2015). Des réseaux existants se rapprochent même des villes pour être intégrés. La montée en puissance des "smart cities", des "IoT", permettent à ces réseaux de se placer sur des créneaux porteurs et de répondre à ces nouvelles demandes de la part des collectivités qui souhaitent avoir un regard actif sur leur environnement et produire leurs propres données (Grimmond *et al*., 2018).

Depuis 2016, Toulouse Métropole a donc déployé un réseau de stations météorologiques sur son territoire. Pour cela, un lien a été créée avec le CNRM pour apporter l'expertise et le conseil,

[1]Centre national de Recherches Météorologiques
[2]Organisation Mondiale de Météorologie

pendant que la Métropole fournissait les moyens financiers et humains. Cette présentation explique la conception de ce type de réseau. Sont présentés à la fois la prise en compte des critères de qualité définis et des besoins opérationnels à travers d'autres prismes (économiques, techniques et logistiques, etc.).

Après un bref retour sur le territoire d'étude, la solution technique développée est présentée. Le choix de chaque site de mesure est réalisé *via* l'utilisation de données et de cartes hiérarchisées et classées.

La deuxième partie explore la co-construction du réseau et la gestion des acteurs impliqués. Un regard est porté sur comment leurs besoins interagissent et modifient-ils la structure ou les fonctionnalités du réseau. Enfin nous montrons quelques résultats comme premières étapes pour évaluer notre réseau et terminer en discutant de l'expérience et de ses développements futurs.

1. Choisir des sites de mesures

1.1. Présentation du territoire

Toulouse Métropole (37 communes) se situe dans le sud-ouest de la France. La superficie du territoire est de 465,96 km². La topographie est peu prononcée, le point culminant est 217 m et le plus bas 110 m. Toulouse est située dans une grande vallée avec accumulation de terrasses fluviales à l'ouest et de petites collines à l'est, avec deux remarquables reliefs particuliers au sud et à l'est de la ville de Toulouse. On trouve une forêt à l'ouest (Bouconne) et la Garonne traverse la ville du sud au nord. Son climat est composite, sous l'influence méditerranéenne, continental et océanique (Fig.1).

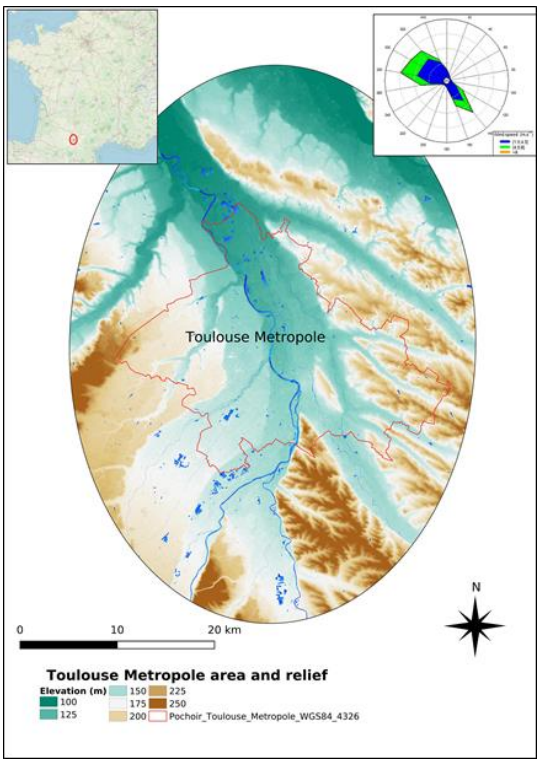


Figure 1. Toulouse métropole, reliefs, réseau hydrologique et rose des vents (Guillaume Dumas, 2020)

1.2. Présentation de la solution technique

Le réseau actuel dispose d'une soixantaine de stations et une dizaine de sous-stations. Une station dispose de capteurs de température, humidité, pression, force et direction des vents[3] . Une sous-station dispose uniquement de sondes de température et d'humidité. Les données sont transmises depuis la station vers un micro-ordinateur[4] disposant d'une carte de télécommunication qui transfert les données vers des serveurs internet de la métropole. Elles y sont mises en formes et rendues accessibles via la plate-forme d'open data[5] (Fig.2).

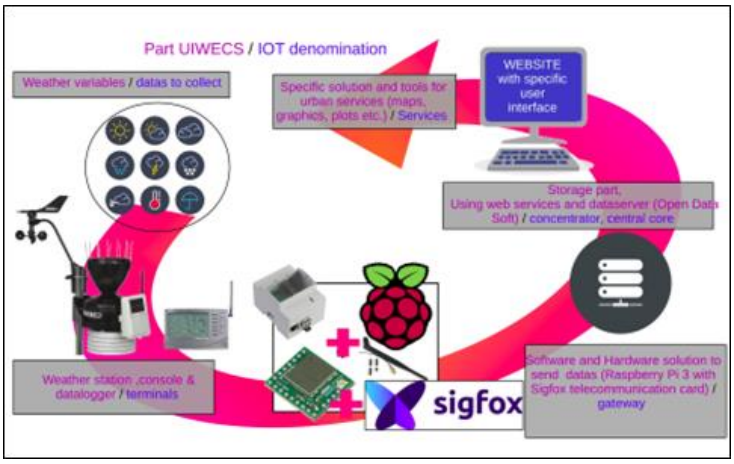


Figure 2. Solution technique (Source : Guillaume Dumas, 2020)

1.3. Choisir des emplacements : thèmes, transects et campagnes de mesures véhiculées

Une approche étape par étape est adoptée. Des points sont générés sur certaines thématiques ou études. Chaque point est classé selon un thème. Lorsque nous pouvons connecter des points du même thème avec une ligne invisible où toute station ajoutée sera de ce thème, alors cela s'appelle un transect. Par exemple, il y a un transect appelé « ICU est-ouest » et il y a un thème « parcs ». Au final, huit transects et sept thèmes sont créés.

Pour le transect d'amplitude thermique « ICU est-ouest », constitué de onze points, le début du travail est d'élaborer une liste de points considérés comme représentatifs des différents tissus urbains à l'aide d'une approche par LCZ (*Local Climate Zones*, Stewart et Oke, 2012). Cet écart est calculé en utilisant le point urbain hypothétique le plus chaud et le point des espaces verts les plus frais. Ces points sont sélectionnés et rattachés aux thèmes « point froid » et « point chaud ».

La même méthode est appliquée au transect « ICU nord-sud ». Il va au-delà de l'aire métropolitaine pour se connecter à un AWS Météo France. Le fleuve qui traverse la ville va conduire le transect d'amplitude thermique « Garonne », correspondant à une suite d'espaces verts le long du fleuve partant du nord. Le principal problème est que la rivière est contenue avec plus de dix mètres de digues de hauteur. Il est difficile de rechercher des endroits où l'altitude du sol n'est pas trop différente du niveau du fleuve. Une fois le réseau déployé, six sites sont en effet dédiés à la Garonne, qui traverse sur vingt-cinq kilomètres le territoire, avec un bon état de mesure. Dans le nord de la Métropole se succèdent des tissus industriels et d'activités (LCZ 8) parallèles à au fleuve. Il donne le transect « ICU nord-sud ».

[3]La station est le modèle DAVIS vantage pro 2 sans fil, sans rayonnement, et avec ventilation passive(6152EU). La sous station est le modèle DAVIS avec juste bouclier antiradiation pour température et humidité.
[4]Raspberry PI disposant d'un module télécomm SIGFOX de la SNOC (Société Nationale des Objets Connectés, société privée).
[5]https://data.toulouse-metropole.fr/explore/?sort=modified

Enfin, trois transects sont liés à des études de reliefs et de brises thermiques : « Reliefs Est » pour les coteaux à l'est, « Relief Côte Pavée » et « Relief Pech David » pour les deux reliefs principaux du territoire (figure 3a).

Pour chercher à observer des anomalies ou tout simplement des points “frais” ou “chauds” sur la Métropole, une campagne de mesure véhiculée a été réalisée. Plusieurs emplacements découlent directement de cette campagne de mesure réalisée sur 3 mois au printemps et comptant une vingtaine de parcours (Fig.3b).

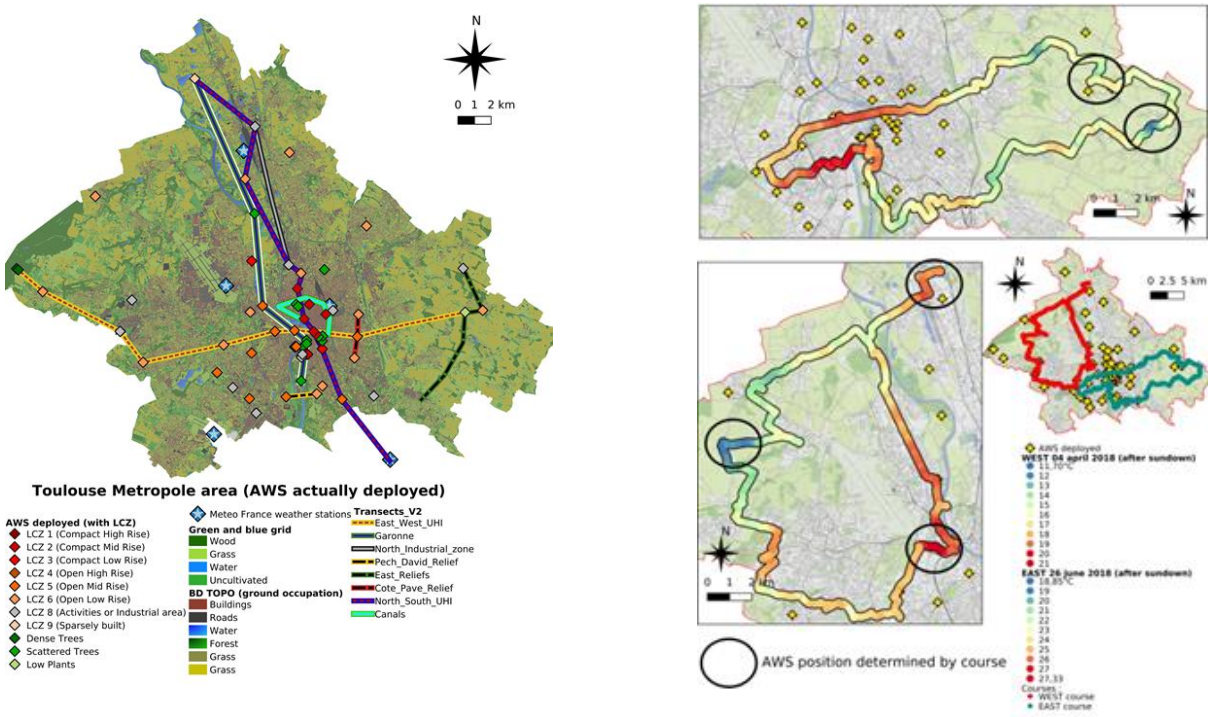


Figure 3. Transects (a) et exemple de mesures véhiculées (b). (Guillaume Dumas, 2020)

2. Co-construction avec les services urbains

Les services urbains sont ici employés en faisant référence à un groupe de personnes travaillant sur le même sujet dans le même département de la Métropole de Toulouse. En effet, la structure de Toulouse Métropole est construite en départements appelés « directions » subdivisés en services. Par exemple, il y a l'EED (Direction Environnement et Energie), où l'on peut trouver des services de plan climat, un service de qualité de l'air, un service de qualité sonore ou les services GEMAPI en charge des rivières et des structures hydrologiques autres que la Garonne et les canaux, tous deux gérés par un autre service dédié spécifique. Il n'y a pas de législation pour organiser une Métropole en France, juste une liste de compétences à posséder. L'objectif est de savoir où se situent les compétences dans chaque département. Pour voir quel type de données chaque service possède ou non et quelles sont leurs attentes pour le réseau, une discussion est construite. Parce qu'il existe des dizaines de services urbains, les plus importants avec lesquels travailler sont présélectionnés. Les autres sont simplement informés de l’existence du réseau et des résultats attendus mais il n’y a pas de travail direct avec eux.

Travailler avec les services crée un lien, un lieu d'échange et permet de donner vie au réseau non seulement comme un projet scientifique mais comme une technologie bien implantée dans les services urbains avec des besoins, des usages et des limites. Ce travail permet de manipuler

des données non climatiques comme des documents d'urbanisme, des documents juridiques et enfin de changer la façon de parler de notre discipline à l'aide d'autres types d'outils.

Ce type de dialogue avec des scientifiques et des non scientifiques ne peut se faire après la création du réseau parce que les personnes souhaitent être impliquées dans le processus de décision pour le considérer comme un futur outil pour elles. De plus, en tant que non spécialistes de la conception de la ville, les climatologues ne peuvent pas les remplacer pour définir plus tard les attentes et les besoins d'optimiser les usages du réseau. De cette façon, leur implication peut développer une certaine modification du réseau lui-même. Ils peuvent modifier sa taille, ses objectifs ou toute autre spécification.

C'est donc un essai avec cet exercice de créer une organisation de co-construction, avec une hiérarchisation des personnes correspondant à leur niveau de décision dans la conception du réseau, conduisant ainsi à l'élaboration de sa gouvernance (Fig.4).

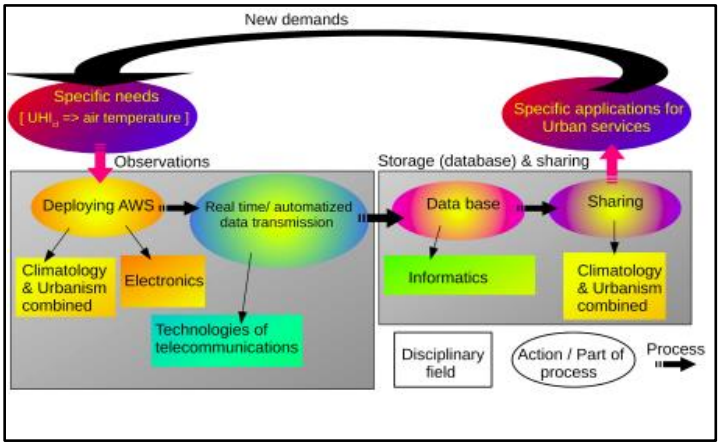


Figure 4. Le processus de co-construction (Guillaume Dumas, 2020)

Conclusions et Discussion

Les services climatiques sont une nouvelle façon d'aborder les réseaux de stations de mesures météorologiques en milieux urbains. Indépendants de projets de recherches mais connectés aux mondes scientifiques. Ces réseaux visent à être intégrés en tant qu'outils au sein des services de l'élaboration et de la conception de la ville. Ils sont pensés pour pouvoir fournir des données sur un temps long selon de larges spectres de thématiques et d'applications : les services d'infrastructures routières désirent surveiller les températures pour la gestion des gels et dégels ; les services d'aménagements (OAP, ZAC) sont soucieux de ne pas impacter l'ICU ; les espaces verts évaluent leurs parcs ; la qualité de l'air désire voir les écoulements d'airs et les brises urbaines ; les gestionnaires des réseaux d'eau souhaitent des quantités précises et localisées de précipitations. La liste des raisons de travailler sur le climat urbain est longue et le sujet peu mobilisé (Vaughan et Dessai, 2018). L'intérêt d'un réseau de mesures n'est donc pas à démontrer mais la validité de son insertion dans les différents services est l'une des clefs de son bon fonctionnement (Bigot *et al.*, 2017).

Les services climatiques sont cependant encore à leurs balbutiements, mais ils sont soutenus par une communauté scientifique forte (l'OMM), des structures historiques (Météo France, l'ADEME) et une bibliographie déjà développée pour un sujet si récent (guidelines de l'OMM) (WMO, 2019).

Le plus grand développement se situe aujourd'hui dans la construction du pont entre productions scientifiques à base des données des capteurs et le rendu pour les utilisateurs. Cela se traduit principalement par des ateliers avec les différents services au cours desquels des cas d'usages sont montés.

Bibliographie

Bigot S., Duché S., Madelin M., *et al.*, 2017. Étude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, Société Géographique de Liège, 68 (2017/1) - Climatologie, 68 (2017), 13-36.

Chapman L., Muller C. L., Young, Duick T., *et al.*, 2015. The Birmingham urban climate laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, no 9, 1545-1560.

Grimmond, C. S. B., Bouchet V.S., Molina L. T., *et al.*, 2018. Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services (IUWECS): WMO Guidance and Best Practice Cities Examples. *10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*. AMS.

Muller C. L., Chapman L., Grimmond C. S. B., *et al.*, 2013. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks. *International Journal of Climatology*, vol. 33, no 7, 1585-1600.

Stewart, I.D. and Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 1879-1900.

Vaughan C., Dessai S., 2014. Climate services for society: origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation framework. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 5, no 5, 587-603.

WMO. 2019. Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services.

EVALUATION DES PRODUITS TRMM ET GPM A PARTIR D'OBSERVATIONS AUX STATIONS ET DE RESULTATS D'UN MODELE DE QUANTIFICATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS SUR LE MOYEN-ATLAS, MAROC

EL BOUHALI A.[1,2], LEBAUT S.[2], QADEM A.[3], AMYAY M.[1], GILLE E.[2], COTONNEC A.[4]

1 LAGEA, Université de Fès, Fès, Maroc (abdelaziz.elbouhali@usmba.ac.ma)
2 LOTERR EA 7304, Université de Lorraine, Nancy, France
3 DPRP, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc
4 COSTEL UMR, Université de Rennes 2, Rennes, France

Résumé : *Les produits de précipitation issus des satellites, constamment améliorés depuis une vingtaine d'années, font l'objet d'une comparaison dans le Moyen-Atlas (Maroc), tant du point de vue stationnel que spatial à l'échelle d'un bassin-versant. Les résultats des comparaisons montrent une bonne adéquation entre les valeurs satellitales et celles issues d'observations aux stations, avec néanmoins une surestimation de l'ordre 20%. Même si les résultats sont moins bons dans le Moyen-Atlas plissés que dans le tabulaire il est donc possible d'utiliser ces valeurs issues des satellites dans le cadre de travaux sur le cycle de l'eau dans ce secteur.*

Mots clés : *précipitation ; Moyen-Atlas ; TRMM/GPM ; modèle ; Maroc*

Summary: ***TRMM and GPM products evaluation using stations observations and results of a spatial quantification model of rainfall over the middle atlas, Morocco.*** *Satellites precipitation products, constantly improved over the past twenty years, are compared in the Middle Atlas (Morocco), both from a stationary and spatial point of view on a basin scale -sided. The results of the comparisons show a good match between the satellite values and those from observations at the stations, with an overestimation of around 20%. Even if the results are less good in the pleated Middle Atlas than in the tabular it is therefore possible to use these satellite values in a work on the water cycle in this sector.*

Key words: *rainfall, Middle-Atlas, TRMM/GPM, model, Morocco*

Introduction

Les précipitations sont une des plus importantes variables météorologiques de forçage dans l'hydrologie en générale. Pour autant la pluviométrie est mal connue du fait de la faible densité des postes de mesure au sol. L'utilisation de valeurs de précipitations dérivées des mesures satellitales sont de plus en plus utilisées dans les travaux d'hydrologie du fait du manque, de l'absence ou de la difficulté à avoir des données suffisamment denses (Milewski *et al.*, 2009). Issues de différents satellites, ces grilles de données de précipitations ont une vocation globale et généraliste, et leurs performances peuvent varier d'une région à une autre. En conséquence, en préalable à toute utilisation, l'évaluation de ces produits avec des mesures fiables et indépendantes est nécessaire pour prendre en compte l'incertitude associée. Nous évaluons les données de précipitations dans le Moyen-Atlas, secteur stratégique du Maroc du point de vue de la ressource en eau.

Différents types de précipitations dérivées de satellites ont été développés comme the Climate Precipitation Center Morphing Method (CMORPH) (Joyce *et al.*, 2004), le Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), le Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) (Huffman *et al.*, 2007) et l´Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM) mission (IMERG) (Hou *et al.*, 2014). Plusieurs études comparatives à l'échelle du globe (Shimelis *et al.*, 2015) et plus spécifiquement sur le pourtour méditerranéen (Tramblay *et al.*, 2016) montrent que les précipitations TMPA présentent les meilleurs résultats. Le TRMM 3B42 est un des produits de TMPA (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis), qui a été lancé le 27 novembre 1997 par la NASA avec la collaboration de l'Agence Spatiale Japonaise (JXAX). Après 17 années de production TRMM a été arrêté le 8 avril 2015 et ont été

remplacées par les produits GPM. Ces produits ont fait l'objet d'évaluation dans différentes régions du monde, des milieux secs (Wang X., 2018), humides (Michot *et al.*, 2018) et ont montré le potentiel de cette nouvelle source de données. Cependant peu d'études ont été faites sur l'utilisation des pluies satellites dans la région méditerranéenne et plus spécifiquement au Maroc. On peut citer Milewski *et al.* (2015) qui ont travaillé à l'échelle de tout le Maroc mais sur des valeurs annuelles et Tramblay *et al.* (2016) qui ont travaillé sur le bassin du Loukkos sur des moyennes mensuelles et de manière indirecte sur validation de modèles hydrologiques. Un travail d'évaluation des précipitation TRMM a été mené plus au sud dans la zone semi-aride de l'amont du bassin de l'Oum Er Rbia (Ouatiki, 2017) et montre une bonne estimation des précipitations à l'échelle mensuelle et annuelle exceptée pour les régions montagneuses.

1. Données et Méthodes

1.1. Secteur d'étude

Dans sa définition géologique le Moyen-Atlas appartient au système intracontinental atlasique qui traverse l'Afrique du Nord d'ouest en est, de l'Atlantique jusqu'à la Méditerranée centrale selon le parallèle 34° de latitude nord (Fig.1).

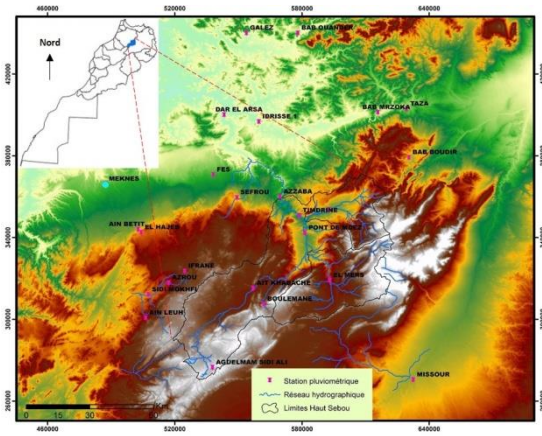


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

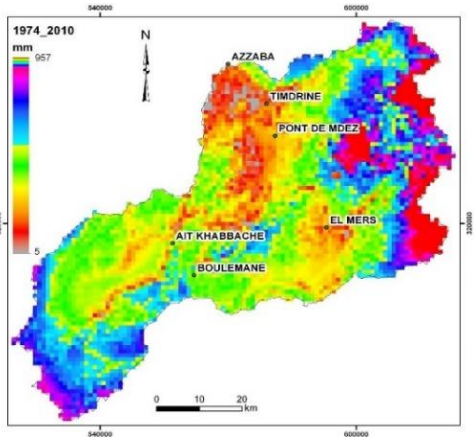


Figure 2. Pluies moyenne sur le Haut Sebou

Le Moyen-Atlas central, dont il s'agit ici, s'inscrit dans deux unités morphostructurales : un causse à l'ouest dont les altitudes sont de l'ordre de 1200m tandis que la partie est, plissée, est une succession de cuvettes synclinales et de lignes de crêtes anticlinales dont le point culminant dépasse 3000m. La région étudiée est donc marquée par un compartimentage morphostructural impliquant des contrastes pluviométriques marqués au sein du secteur caractérisé par un climat de type méditerranéen. On y trouve des secteurs appartenant à l'étage humide dans lequel les montant de précipitations annuelles atteignent plus de 1000mm (station d'Ifrane) et des secteurs abrités, situés dans l'étage semi-aride avec des précipitations observées inférieures à 300mm (station de Pont de Mdez) (Fig.2).

1.2. Données

Dans notre travail nous comparons les données issues de l'algorithme 3B42 dans sa dernière version (V7). Les données de précipitations TRMM et GPM sont disponibles sur la totalité de la surface terrestre comprise entre 50°S et 50°N de latitude. Ces données sont disponibles au pas de temps quotidien à une résolution spatiale de 0.25° pour les premières et 0.10° pour les secondes. Ces données sont téléchargeables sur le site https://pmm.nasa.gov/data-

access/downloads/. Ces données sont compilées au pas de trois heures puis disponibles en versions recherches au pas quotidien ou mensuel. Nous avons téléchargé les données mensuelles.

1.3. Méthodes

Nous évaluons les données annuelles et mensuelles TMPA GPM 3IMERGMV6 et TRMM 3B43V7 dans le Moyen-Atlas au Maroc à partir de deux types de données sur la période 2000-2017.

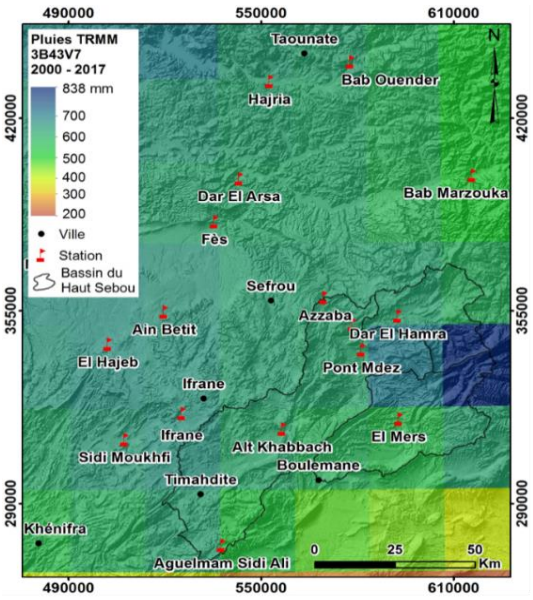


Figure 3. Précipitations TRMM – Moyenne sur 2000/2017

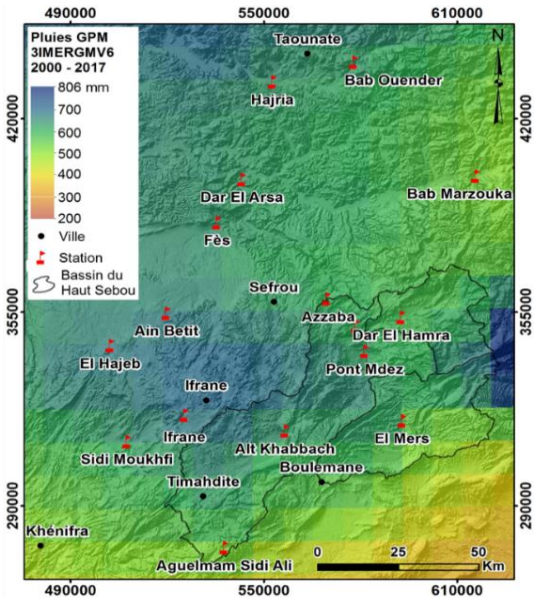


Figure 4. Précipitations GPM – Moyenne sur 2000/2017

Dans un premier temps les précipitations satellitaires sont comparées aux précipitations observées à 16 stations du réseau géré par l'Agence Hydraulique du Bassin du Sebou (ABHS). La comparaison des valeurs de précipitations GPM 3IMERGMV6 et TRMM 3B43V7 (Fig.3, 4), proposées sous forme de grilles de résolution respective 0.1° et 0.25° alors que les précipitations observées au sol sont ponctuelles, est de type directe NN. Dans un deuxième temps, puisque l'algorithme TMPA utilise des données observées aux stations, nous avons cherché à tester ses valeurs en dehors des stations. Pour cela nous nous sommes appuyés sur les résultats d'un modèle de quantification spatiale des précipitations sur le bassin amont du fleuve Sebou (4677 km²) situé dans un contexte pluviométrique homogène au sens du vecteur régional (Qadem, 2015). Le modèle statistique, mettant en relation les précipitations observées avec des prédicteurs principaux de type topographiques (une centaine) et secondaire (NDVI) explique jusqu'à 90% de la variance et constitue un autre type de données auxquel confronter ses grilles de précipitations satellitaires.

2. Résultats et discussion

Globalement les produits GPM, mieux résolus spatialement, présentent également de meilleurs coefficients de corrélation avec les valeurs enregistrées aux stations que les valeurs TRMM : en moyenne un R^2 de 0.8 contre 0.74 à l'échelle annuelle et 0.71 contre 0.7 à l'échelle mensuelle (Tab. 1, Fig.5). Pour ce qui concerne les valeurs de NRMSE et du biais, les valeurs sont comparables entre les deux jeux de données. Elles sont respectivement de l'ordre de 110mm et 25% à l'échelle annuelle et de 70mm et 25% à l'échelle mensuelle. Comme cela a déjà été démontré dans d'autres régions du globe (Mou et Harrif, 2017 ; Tramblay *et al.* 2016),

le premier constat est qu'il est préférable d'utiliser les produits GPM pour caractériser les précipitations sur le Moyen-Atlas.

Tableau 1. Statistiques comparatives des valeurs de précipitations GPM et TRMM

	ANNUEL									MENSUEL								
		GPM 3IMERGMV6				TRMM 3B43V7					GPM 3IMERGMV6				TRMM 3B43V7			
Stations	**P. MOY. (mmm)**	**R**	**R²**	**NRMSE**	**PBIAS**	**R**	**R²**	**NRMSE**	**PBIAS**	**P. MOY. (mm)**	**R**	**R²**	**NRMSE**	**PBIAS**	**R**	**R²**	**NRMSE**	**PBIAS**
Aguelmam Sidi Ali	441,09	0,79	0,63	83,9	18,2	0,62	0,39	106,7	21,3	36,76	0,77	0,6	71,7	18,2	0,64	0,41	90,9	21,3
Dar El Arsa	465,49	0,94	0,88	103	35,7	0,94	0,88	91,6	31,2	38,79	0,95	0,9	50	35,7	0,94	0,89	46,4	31,2
Azzaba	371,96	0,84	0,71	207,4	62,9	0,86	0,74	221,8	67,9	31	0,82	0,67	100,3	62,9	0,82	0,68	101,5	67,9
Ain Bettit	548,9	0,94	0,88	82,5	23,9	0,93	0,86	69,8	18,9	45,97	0,93	0,87	47,8	23,3	0,94	0,88	41,5	18,3
Fès (ABHS)	438,76	0,91	0,82	116,6	46,2	0,87	0,76	110	41,5	36,57	0,91	0,82	64,6	46,1	0,9	0,81	63,7	41,4
El Hajeb	599,67	0,96	0,92	59,8	16,3	0,95	0,91	55,3	14,7	49,97	0,9	0,82	49,9	16,3	0,91	0,83	44,1	14,7
Hajria	682,22	0,89	0,79	47,8	-6,9	0,89	0,8	49,8	-8,5	56,85	0,93	0,87	37,1	-6,4	0,93	0,86	39,8	-8,5
Dar El Hamra	485,69	0,88	0,77	90,1	21,1	0,76	0,58	128,1	28,8	40,47	0,86	0,73	60,7	21,1	0,86	0,74	64,9	28,8
Ifrane	1008,89	0,95	0,91	91	-32,3	0,91	0,82	96,9	-34	84,07	0,93	0,86	57,8	-32,3	0,88	0,77	63,7	-34
Ait Khabbach	385,49	0,88	0,78	249,6	64,1	0,87	0,75	223	57,8	32,12	0,65	0,42	139	64,1	0,58	0,33	133,8	57,8
Pont Mdez	340,93	0,86	0,74	201,9	84,7	0,81	0,66	198,5	82,1	25,97	0,46	0,21	194,5	103,9	0,76	0,58	145,7	94,7
El Mers	440,19	0,86	0,73	103,4	27	0,74	0,55	107,9	25,8	36,68	0,8	0,64	79,2	27	0,74	0,55	82,5	25,8
Bab Marzouka	558,72	0,83	0,69	55,8	-5,4	0,82	0,67	58,9	-8,2	46,56	0,87	0,76	50,5	-5,4	0,87	0,76	50,9	-8,2
Sidi Moukhfi	532,42	0,9	0,81	65,3	20,2	0,9	0,81	67,1	21,2	44,37	0,83	0,68	58,3	10	0,8	0,65	61,4	21,2
Bab Ouender	702,49	0,95	0,91	44,7	-10,3	0,95	0,91	44,5	-11,1	58,54	0,94	0,88	38,7	-10,3	0,93	0,87	39,6	-11,1
Ain Timdrine	409,01	0,94	0,88	198,5	49,5	0,87	0,75	216,3	52,7	34,65	0,83	0,68	91,6	47,1	0,81	0,65	98	50,2

Néanmoins les relativement fortes valeurs de NRMSE et du biais suggèrent de ne pas utiliser telles quelles ces valeurs du fait d'une surestimation de l'ordre de 25%. On constate également une disparité spatiale dans la qualité des résultats. En effet les ils sont très bons pour les stations de Bab Merzouka, Hajria, El Hajeb et dans une moindre mesure Bab Ouander et Ifrane.

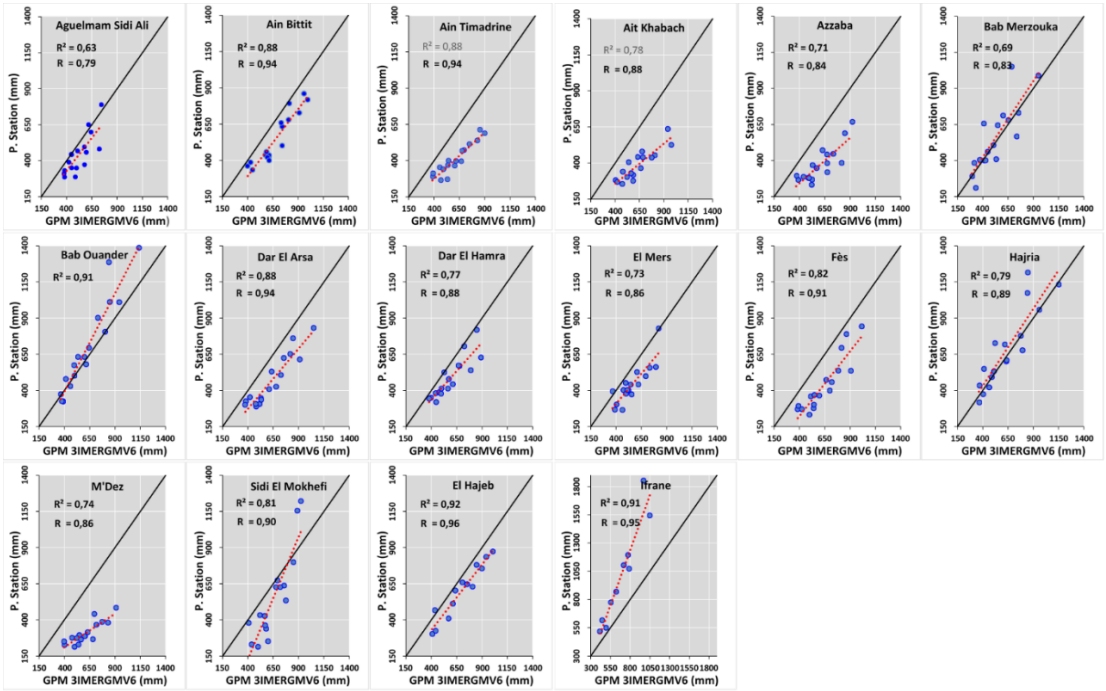


Figure 5. Régression valeurs mesurées / valeurs GPM annuelles pour 16 stations du Moyen-Atlas

Ces stations sont situées sur la partie occidentale du domaine investigué. Par contre les valeurs les moins en phase sont celles aux stations d'Aguelmam Sidi Ali, Azzaba, El Mers et M'Dez et dans une moindre Dar El Hamra, localisées dans une topographie complexe au cœur du Moyen-Atlas plissé.

Ceci laisse penser que les valeurs enregistrées à ces stations n'ont qu'une portée locale et sont donc peu extrapolables au-delà du site de la mesure. Ceci est confirmé par la station d'Ifrane dont le biais négatif de 34% peut-être lié à une mauvaise estimation de la neige. Ces caractéristiques annuelles sont renforcées à l'échelle mensuelle (Fig.6) : les stations dans des situations topographiques complexes comme Aï Khabach, El Mers et M'Dez ont des R^2 de l'ordre de 0.5 seulement.

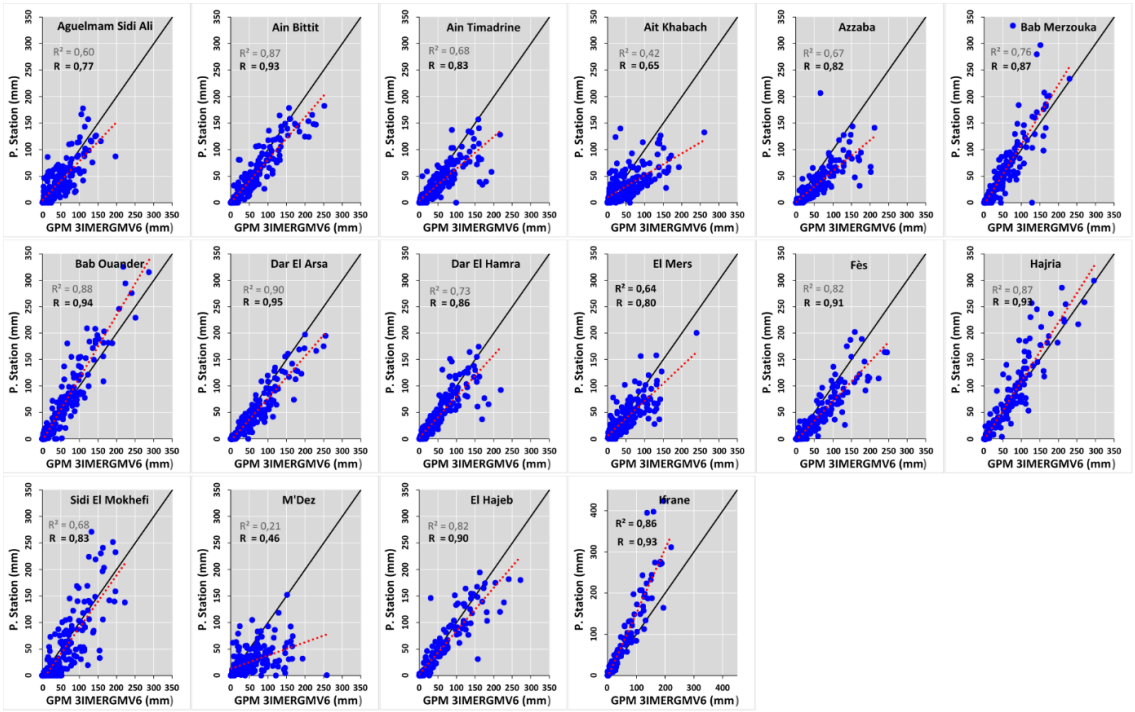


Figure 6. Régression valeurs mesurées / valeurs GPM mensuelles pour 16 stations du Moyen-Atlas

On peut donc affirmer que l'accord entre les deux jeux de données est meilleur pour les stations du Moyen-Atlas tabulaire que celles du Moyen-Atlas plissés. Ceci soulève le problème de la capacité à spatialiser les précipitations à partir des observations au sol dans des topographies complexes.

A cet égard, la comparaison entre les données du modèle de quantification des précipitations et les résultats issus des précipitations satellites vont dans le même sens que les observations faites au niveau stationnel. Globalement, à l'échelle du bassin total du Haut Sebou les types de données, GPM et issues du modèle, s'accordent bien avec un R^2 de 0.92 et un biais un peu moins fort qu'en stationnel, de 20% (Fig.7). De la même façon les résultats pour les oueds Maasser et Zloul, inscrits dans le Moyen-Atlas plissé sont moins bons.

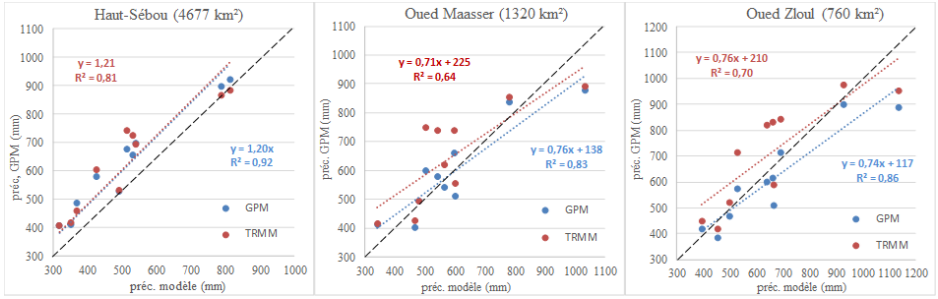


Figure 7. Régression valeurs modèles / valeurs GPM annuelles pour 3 bassins versants du Moyen-Atlas

Conclusion

Pour conclure, ces résultats aux stations comme ceux de la comparaison spatiale à partir des sorties du modèle confirment la possibilité d'utiliser les données 3IMERGMV6 pour des applications hydrologiques par exemple. Il convient néanmoins de noter que les valeurs issues des satellites sont supérieures d'environ 20% sur le Moyen-Atlas.

Bibliographie

Hou A.Y., Kakar R.K., Neeck S., Azarbarzin A.A., Kummerow C.D., Kojima M., Oki R., Nakamura K., Iguchi T., 2014. The global precipitation measurement mission. Bull. Am. *Meteorol. Soc*., 95, 701–722.

Huffman G.J., Bolvin D.T. Nelkin E.J., Wolff D.B., Adler R.F., Gu G., Hong Y., Bowman K.P., Stocker E.F., 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol*., 8, 38–55.

Joyce R.J., Janowiak J.E., Arkin P.A., Xie P., 2004. CMORPH : A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J.Hydrometeorol*., 5, 487–503.

Michot V., Vila D., Arvor D., Corpetti T, Ronchail J., Funatsu B.M., Dubreuil V., 2018. Performance of TRMM TMPA 3B42 V7 in Replicating Daily Rainfall and Regional Rainfall Regimes in the Amazon Basin (1998–2013). *Remote Sensing*, 10, 1879. Doi :10.3390/rs10121879.

Milewski A., Sultan M., Yan E., Becker R., Abdeldayem A., Soliman F., Gelil K.A., 2009. A remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. *J. Hydrol*. 9, 373, 1–14.

Milewski A., Elkadiri R., & Durham M., 2015. Assessment and comparison of TMPA satellite precipitation products in varying climatic and topographic regimes in Morocco. *Remote Sensing*, 7, 5697– 5717. Doi: 10.3390/rs70505697.

Mou L.T., Harrif S., 2017. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmosphric Research* 202, 63-76. Doi: doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006.

Ouatiki H., Boudhar A., Tramblay Y, Jarlan L., Benabdelouhab T., Hanich L., El Meslouhi M.R., Chehbouni A., 2017. Evaluation of TRMM 3B42 V7 Rainfall Product over the Oum Er Rbia Watershed in Morocco. *Climate*, 5, 1. Doi : 10.3390/cli5010001.

Qadem, 2015. *Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc)*. Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, France, 272p.

Shimelis B., Tena A., Broder J.M., Assefa M.M., 2015. Performance of High Resolution Satellite Rainfall Products over Data Scarce Parts of Eastern Ethiopia. *Remote Sens*.7, 11639-1166. Doi :10.3390/rs70911639.

Tramblay Y., Thiemig V., Dezetter A., Hanich L., 2016. Evaluation of satellite-based rainfall products for hydrological modelling in Morocco, *Hydrological Sciences Journal*, 61 :14, 2509-2519. Doi: 10.1080/02626667.2016.1154149.

Wang X., Ding Y., Zhao C., Wang J., 2018. Validation of TRMM 3B42V7 Rainfall Product under Complex Topographic and Climatic Conditions over Hexi Region in the Northwest Arid Region of China. *Water*, 10, 1006.

A LA RECHERCHE D'INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MAROC : ANALYSE SPATIALE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES DES SÉDIMENTS DE SURFACE MARINS ET CONTINENTAUX AU SUD DU MAROC

EL HAWARI J.[1], EL GHACHI M.[1], REDDAD H.[1], KOELLING M.[2], GROENEVELD J.[2], BOUIMETARHAN I.[2]

1 Laboratoire de dynamique des paysages-risques et patrimoine, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc (jawad.elhawari@gmail.com)
2 Marum-Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen, Bremen, Germany

Résumé : *A l'instar d'autres régions du Maroc, le sud du Maroc est soumis à de grave sécheresse, à la désertification et stresse socio-économique. Les études sur les changements climatiques, le paysage et la végétation ont principalement focalisés sur les régions du nord du pays. À l'inverse, l'histoire du climat et de l'environnement au sud du pays est largement inconnue. Pour le cas de notre étude, nous avons choisi la caractérisation du sud du Maroc à partir des paramètres géochimiques (les éléments majeurs et traces). Les échantillons continentaux et marins ont été prélevés le long du sud du Maroc. Les concentrations d'éléments chimiques ont été obtenues par Scanner à fluorescence X (XRF) à l'université de Brême afin de définir les effets du changement climatique et des précipitations sur l'environnement local et les ressources naturelles. L'intégration des différents résultats nous a permis de reconstituer les changements climatiques, océaniques et environnementaux. Et ceci dans l'objectif de fournir des données pour les corrélations terre/océan.*

Mots clés : *Sud du Maroc; sédiments; caractéristiques géochimiques; analyse spatiale; apports terrigènes*

Summary: ***In search of indicators of climate change in Morocco: spatial analysis of the geochemical characteristics of marine and continental surface sediments in southern Morocco.*** *Like other regions of Morocco, southern Morocco presently subject to severe drought, desertification and socio-economic stress. Studies on climate change, landscap and vegetation have mainly focused on the northern regions of the country. In contrast, the climate and environment history in the south of the country is largely unknown. For the case of our study, we have chosen the characterization of southern Morocco based on geochemical parameters (major and trace elements). Continental and marine samples were collected along the south of Morocco. The concentrations of chemical elements were obtained by X-ray fluorescence scanning (XRF) at the University of Bremen in order to define the effects of climate change and rainfall on the local environment and natural resources. The integration of the different results allowed us to reconstruct climate, ocean and environmental changes. That has enabled us to provide data for Land-Ocean correlations.*

Key words: *Southern Morocco; sediments; geochemical characteristics; spatial analysis; terrigenous input*

Introduction

L'océan Atlantique reçoit une quantité importante de matériel terrigène du continent africain (Peucker-Ehrenbrink, 2009). Dans notre zone d'étude, les sédiments terrigènes sont transportés vers la côte atlantique soit par l'action fluviale ou éolienne, qui est sensibles aux changements climatiques (Miller *et al.*, 1992). Les changements de l'aridité, du vent, des précipitations continentales (Engelstaedter et al, 2006) affectent la quantité et la trajectoire des sédiments transportés vers l'océan.

Les composants chimiques terrestres ont été largement utilisés pour identifier la source de matière terrestre dans l'océan. Selon, Peterson *et al.*, (2000) les concentrations accrues de titane (Ti) et de fer (Fe) ont été interprétées comme une augmentation des apports en matière siliciclastique d'origine fluviale. Parallèlement, Yarincik *et al.*, 2000 et Kuhlmann *et al.*, (2004) ont utilisé le potassium (K) comme indicateur des apports fluviaux marocains qui reflètent les conditions terrestres humides. En effet, dans la plupart des sédiments marins, les fractions de sédiments grossiers sont enrichies en Ti (Schütz *et al.*, 1982;), ils sont liés à de l'altération chimique dans des conditions humides (Bonatti *et al.*, 1973). Tandis que, le Si existe dans tous les minéraux argileux, en particulier dans les grains de quartz (Moore *et al.*, 1970). D'autres

études considèrent que les rapports chimiques des éléments sont plus utiles que des éléments individuels (Weltje *et al.*, 2008). Les rapports tels que Ti/Al, Si/Al, Ti/Ca, Fe/Ca, Zr/Al, Al/Ti, Mg/Al, K/Al, K/Ca et Rb/Al sont les plus couramment utilisés pour la reconstruction des apports terrigènes. Par exemple, les rapports Ti/Al, Si/Al et Zr/Al ont été utilisés comme traceur de poussières éoliennes (Yarincik *et al.*, 2000) et le Fe/Ca, Ti/Ca, Mg/Al, K/Al, K/Ca et Rb/Al en tant qu'indicateurs d'humidité relative (Schutz *et al.*,1982).

1. Matériels et Méthodes

1.1. Matériels

L'échantillonnage continental a été réalisé lors de la campagne d'échantillonnage ECHo dans le cadre de programme Maroc-allemand pour la recherche scientifique PMARS III. Ces échantillons ont été prélevés à partir de cinq sites localisés sur différents tributaires et cours d'eaux au sud du Maroc (Fig.1). Tandis que, l'échantillonnage marin a été réalisé lors de la campagne océanographique METEOR cruise M 45/5, cruise M 37/1 et cruise M 58/2. Les sites marins étudiés se situent au sud du Maroc (Fig.1).

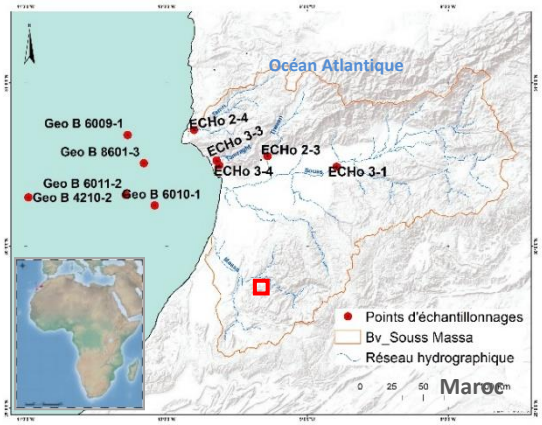


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnages mentionnées dans cette étude

1.2. Méthodes de fluorescence des rayons X (XRF)

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode XRF pour déterminer la composition chimique de toutes sortes de sédiments de surface. Le scanneur XRF est situé à l'Université de Brême (Allemagne), il s'agit d'un système d'analyse d'éléments extrêmement précis et non destructif des sédiments de surface. Le spectromètre à fluorescence X est de réglages du tube (logiciel contrôlé, tension maximale 50 KV et max. 3 Ma max. Puissance du tube 15 w). Il est couramment utilisé pour tous les matériaux en différents états : solides, liquides, en poudre, filtrés ou autres.

2. Résultats

2.1. Distribution des éléments majeurs et traces des sédiments continentaux

Les tableaux ci-dessous, montrent la distribution des éléments chimiques des sédiments continentaux. On observe dans l'échantillon ECHo 2-3 a une forte teneur de Si, suivis par des valeurs moyennes de Ca, Al, Fe, K et Mg et de faibles teneurs de Ti et nulles pour le Na. De même pour l'échantillon ECHo 2-4 la teneur le plus élevée est celle de Si, une teneur importante en Ca avec la présence des teneurs moyennes des éléments, tels que, le Al, Fe, K, Mg et Ti. Dans 1'échantillon ECHo 3-1, on trouve aussi une forte teneur de Si qui atteint des valeurs plus élevées, suivis par teneur plus moins important en Ca par rapport aux autres échantillons. L'Al

représente une valeur élevée aussi. Les autres éléments Mg, Fr sont aussi présents dans cet échantillon à une teneur modérée. On ne peut pas négliger la présence des autres éléments comme le Ti et Na, même si leurs teneurs sont faibles. Ensuite, l'échantillon ECHo 3-3 est relativement similaire à l'échantillon ECHo 2-4. La teneur plus élevée est celle de Si, suivie de la teneur en Ca, puis l'Al. Les éléments tels que le Fe, K, Mg et Ti représentent des teneurs moyennes respectivement. Enfin, dans 1'échantillon ECHo 3-4, on constate une forte teneur de Si, suivie par la teneur de Ca. Par ailleurs, Les teneurs moyennes pour l'Al, le Fe Mg et des faibles teneurs pour le K et le Ti. Les teneurs des éléments traces dans les cinq échantillons tels que Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr varient généralement entre faibles à très faibles (Tab.2).

Tableau 1. Distribution des composants des éléments majeurs (en mg/kg) dans les sédiments continentaux.

Échantillons	Rivière	Al	Ca	Fe	K	Mg	Si	Ti	Na
ECHo 2-3 a 1	Tiween	54592	128239	26799	18898	17048	139062	3194	0
ECHo 2-4 a 1	Tamri	49868	114662	20943	15674	13196	156322	3194	0
ECHo 3-1 a 1	Souss	48783	68408	20856	15053	21975	178675	3251	1067
ECHo 3-3 a 1	Tamraght	42455	107238	19096	13732	15267	157170	2889	0
ECHo 3-4 a 1	Assrssif	30858	132561	14260	9548	12299	149712	2162	0

Tableau 2. Distribution des composants des éléments traces (en mg/kg) dans les sédiments continentaux.

Échantillons	Rivière	V	Zn	Ba	Mn	P	S	Sr	Zr	Cr	Cu	Ni	Pb	Rb
ECHo 2-3 a 1	Tiween	95	42	282	356	177	917	203	125	70	24	28	10	69
ECHo 2-4 a 1	Tamri	70	36	212	247	133	914	204	156	46	21	20	5	53
ECHo 3-1 a 1	Souss	58	53	514	478	198	654	129	236	33	23	18	9	51
ECHo 3-3 a 1	Tamraght	70	36	231	270	93	982	196	208	41	17	16	4	48
ECHo 3-4 a 1	Assrssif	69	32	164	175	356	686	181	170	40	16	12	0	31

2.2. Distribution des éléments majeurs et traces des sédiments marins

Les tableaux 3 et 4, impliquent la distribution des composants des éléments majeurs et traces des sédiments marins. Nous observons, en premier lieu, une distribution très identique aux éléments terrigènes (Ca, Al, Fe, Ti, Si, Mg) avec des valeurs relativement élevées, puis une distribution clairement variée de Ca (Tab.3). Le Ca présente des teneurs plus faibles près de la marge continentale et des teneurs plus élevées plus loin à l'intérieur des terres. Les teneurs faibles en Ca parallèlement à de fortes teneurs d'éléments terrigènes, en particulier près de la marge continentale (à l'embouchure des Oueds). En effet, la distribution en Ca des sédiments de surface de la côte atlantique marocaine suit la distribution de la teneur en carbonates de l'Atlantique (Balsam *et al.*, 1987). La majeure partie du Ca dans les sédiments de surface de l'Atlantique peut être attribuée aux carbonates, probablement d'origine marine, comme l'ont montrés des études antérieures. Les teneurs des éléments terrigènes sont élevées près à la marge continentale marocaine. Donc, ces résultats indiquent une empreinte claire des apports terrigènes sur les composants chimiques des sédiments marins de surface.

Les autres éléments traces Zr, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, V, Zn, Ba, Mn, P, S, et Sr sont généralement faibles dans ces échantillons marins, avec des intensités élevées de S, P, Mn et Ba, mais les autres éléments traces sont très faibles et/ou nuls comme pour le Pb et le Ni (Tab.4).

Tableau 3. Distribution des composants des éléments majeurs (en mg/kg) dans les sédiments marins

Échantillons	Al	Ca	Fe	K	Mg	Si	Ti	Na
Geo B 8601-3	62406	81896	32519	20697	16749	157737	3456	24258
Geo B 6009-1	56808	113244	29284	18934	16752	155064	3385	26731
Geo B 6011-2	46545	134088	24297	14659	14429	126151	2743	25456
Geo B 4210-2	46579	147632	23920	15091	13070	119481	2645	14512

Geo B 6010-1	25266	167945	20917	8566	10557	102813	1824	17557

Tableau 4. Distribution des composants des éléments traces (en mg/kg) dans les sédiments marins

Échantillons	Ba	Mn	P	S	Zr	Cr	Cu	Sr	Ni	Pb	Rb	V	Zn
Geo B 8601-3	418	281	804	1948	112	69	26	314	37	19	89	91	76
Geo B 6009-1	357	251	733	1973	131	72	23	454	29	17	79	82	68
Geo B 6011-2	298	510	615	1825	99	41	24	600	26	10	59	62	60
Geo B 4210-2	431	667	418	1300	80	39	29	732	26	3	64	75	56
Geo B 6010-1	205	124	366	1344	191	29	11	590	7	0	39	43	40

3. Discussion

3.1. Les éléments géochimiques en tant que données indirectes du climat terrestre

Tous les sites situés le long des marges continentales marocaines présentent des teneurs relativement élevées d'éléments terrigènes (Tab.1, 2), avec une teneur faible en Ca. Les teneurs de Ca sont interprétées en tant que représentant de la composante carbonatée déposée, étant donné que les faibles valeurs sont situées près la zone d'upwelling du Cap Ghir hautement productif, elles représentent probablement la productivité marine (Kuhlmann *et al.*, 2004). On note ici que, le rapport élémentaire de Ca ne reflète pas clairement la quantité de matière terrigène déposée sur le fond marin, il reflète plutôt une quantité importante des apports terrigènes par rapport au contenu marin. Parce que la concentration de Ca dans les sédiments dépend de la productivité et la dissolution des carbonates marins. Le K est généralement associé à des siliciclastiques terrestres tels que les argiles illites et le feldspath potassique (Martin *et al.*, 1998). D'une part, le potassium est fréquemment utilisé pour d'étudier les changements climatiques (arides/humides) dans une région source (Kuhlmann *et al.*, 2004) et d'autre part, pour d'identifier les régions d'origine des poussières éoliennes. Il existe des valeurs élevées de potassium dans la région d'upwelling de Cap Ghir, ce qui explique les fortes concentrations de K, car cette région est située à l'embouchure de plusieurs rivières du sud Marocain (Fig.1). La distribution des teneurs en Al montre des valeurs élevées au Cap Ghir (Tab.3). Les valeurs les plus basses sont enregistrées dans l'océan ouvert loin du continent (Tab.3, Fig.1). De nombreuses études antérieures ont lié l'Al à l'altération chimique intense, produisant de la kaolinite et des argiles smectites (Zabel *et al.*, 2001). Le potassium (K) et l'aluminium (Al) sont tous prolifiques dans les minéraux argileux, avec une contribution moindre des feldspaths et des zéolithes, et le potassium est principalement présent dans l'illite tandis que l'aluminium est abondant dans tous les minéraux argileux (Boyle, 1983). L'illite est généralement un produit d'altération dans des climats arides où l'altération physique est forte, puisque l'altération chimique est faible, la kaolinite est généralement un produit de l'altération chimique dans les climats tropicaux et humides (Yarincik *et al.*, 2000). Les concentrations de Fe représentent également des valeurs relativement élevées dans la même région (Cap Ghir) et pour la distribution de K et Al, dans ce cas, ce pourrait être sous forme d'oxy-hydroxydes de fer. De plus, le Ti reflète des valeurs élevées le long des marges continentales et des valeurs faibles loin d'eux. Le Ti étant beaucoup moins sensible à la diagenèse que le Fe. En outre, le Mg et le Rb ont enregistré des valeurs élevées en particulier au site de Cap Ghir, cette région recevant des matériaux provenant principalement des fleuves du sud du Maroc, ce qui explique l'augmentation du Mg et du Rb dans cette région. Enfin, les valeurs élevées de Si (Tab.3) sont enregistrées aux sites situés le long de la marge continentale marocaine, notamment près de l'embouchure des fleuves et relativement aux marges des Canaries. Ces zones sont caractérisées par une productivité marine élevée (McGregor *et al.*, 2007 ; Kuhlmann *et al.*, 2004), ce qui explique les concentrations élevées de Si dans ces sédiments. Ils sont donc situés dans une région à forte productivité siliceuse et reçoivent un apport important.

3.2. Les rapports chimiques des sédiments marins représentent un autre traceur des apports terrestres

Nous présentons dans cette étude les rapports chimiques suivants : K/Ca, K/Al en tant qu'indicateurs d'humidité relative et Si/Al et Ti/Al comme traceurs de poussières sahariennes.

La distribution spatiale de K/Ca montre des valeurs les plus élevées dans la région de Cap Ghir. On suppose que l'augmentation des apports fluviaux de matières terrigènes joue un rôle important dans cette région. Cette interprétation est appuyée par des études montrant que les sédiments sont déversés dans l'océan Atlantique prés de l'embouchure de la rivière de Souss (Wynn *et al.*, 2000). De plus, les analyses granulométriques d'échantillons de surface dans cette région sont en accord avec ces résultats (Holz *et al.*, 2004). Ces auteurs ont montré que la fraction à grains fins représentant la boue de source fluviale est confinée à la zone située au large du cap Ghir, où elle constitue jusqu'à 90% de la composition relative des sédiments. La teneur en illite des sédiments marins reflète avec une manière impressionnante le pourcentage et la distribution des particules terrigènes transportées par le transport fluvial, les valeurs du rapport K/Al des sédiments de surface augmentent significativement. Les valeurs du rapport K/Al les plus élevés se trouvent à la côte au sud du Maroc (en particulier entre 31°N et 30,5°N). Il est suggéré que deux mécanismes de transport différents (éolien et/ou fluvial) peuvent être responsables de la manière de distribution observée. Les caractéristiques géologiques dans la zone d'étude jouent également un rôle important dans l'interprétation des résultats de K/Al. Les valeurs élevées du rapport Ti/Al observées dans certains échantillons indiquent l'influence de la poussière provenant des déserts, peuvent être pauvres en illite.

La distribution du rapport Ti/Al dans la zone d'étude montre des valeurs faibles, ces régions sont dominées par l'apport de matières en suspension le long de la zone côtière où le drainage des montagnes de l'Atlas et de l'Anti-Atlas (rivières Tamri, Tamraght, Souss et Draa) se produit. La distribution de Ti/Al représente en général des valeurs faibles au large du Cap Ghir et des valeurs relativement élevées au nord des îles Canaries. Des valeurs élevées de Ti/Al indiquent une contribution accrue de l'apport de poussière par rapport à l'apport de matières en suspension. On suppose que le modèle de distribution observé peut être lié à la différence entre l'assemblage minéral provenant des basaltes volcaniques et des gabbros des îles (Kuss *et al.*, 1999) et des sources sahariennes potentielles (principalement minéraux argileux, calcite et quartz). Par conséquent, les échantillons de surface des îles proches de la côte du Cap Ghir sont caractérisés par des valeurs inférieures. En effet, les valeurs du rapport Ti/Al des échantillons de surface assez relativement élevés, cette distance croissante conduisant à la prédominance de la poussière saharienne, le matériel lithogène du continent africain augmente proportionnellement avec la distance de la zone côtière. Ainsi que, l'advection latérale doit être prise en compte peut être, il est possible que les courants de fond entraînent un transport des grains les plus lourds vers les océans plus profonds (Plewa *et al.*, 2012). Il est important de noter que la distribution du rapport Ti/Al pourrait révéler les différentes régions sources. De plus, le schéma de distribution de ces rapports représente les différents mécanismes de transport, les types du climat, la géologie et les compositions du sol (Plewa *et al.*, 2012).

Conclusion

L'analyse spatiale des composants chimiques des sédiments marins et continentaux reflètent des compositions terrigènes relativement cohérentes. La concentration des éléments majeurs et traces dans les sédiments marins est affectée par le transfert continental (fluvial et éolien). L'ensemble des composants chimiques utilisées montrent des changements dans la composition élémentaire des sols terrestres et des sédiments de surface marins selon les latitudes, ce qui reflète la diversité à petite échelle des sites d'échantillonnages et des milieux associés (les sédiments des rives, les dépôts de crue, les charges en suspension et sols). De nombreux facteurs

influents sur leur répartition, tels que la géologie, la topographie et la diagénétique. Donc, pour appliquer ces rapports chimiques pour reconstruire les caractéristiques climatiques passées, il faut tenir compte de ces facteurs.

Bibliographie

Archer D. E., 1996. An atlas of the distribution of calcium carbonate in sediments of the deep sea, *Global Biogeochem. Cycles*, 10(1), 159-174.

Balsam W. L., McCoy Jr. F. W., 1987. Atlantic sediments: Glacial/interglacial comparisons. *Paleoceanography*, 2(5), 531-542.

Bonatti E., Gartner S., 1973. Caribbean climate during Pleistocene ice ages. *Nature*, 244(5418), 563-565.

Boyle, E. A. 1983. Chemical accumulation variations under the Peru Current during the past 130,000 years. *J. Geophys. Res*., 88, 7667-7680.

Engelstaedter S., Tegen I. & Washington R., 2006. North African dust emissions and transport. *Earth Sci. Rev*., 79(1-2), 73-100.

Futterer D.K., 2000. The solid phase of marine sediments. *Marine Geochemistry*, Springer, Berlin Heidelberg, 1-22.

Holz C., Stuut J.-B. W., & Henrich R., 2004. Terrigenous sedimentation processes along the continental margin off NW Africa: Implications from grain-size analysis of seabed sediments. *Sedimentology*, 51(5), 1145-1154.

Jullien E., *et al.*, 2007. Low-latitude "dusty events" vs. high latitude "icy Heinrich events". *Quat. Res*., 68(3), 379-386.

Kuhlmann H., Meggers H., Freudenthal T., Wefer G., 2004. The transition of the monsoonal and the N Atlantic climate system off NW Africa during the Holocene. *Geophysical Research Letters* 31, L22204.

Kuss J., Kremling K., 1999. Spatial variability of particle associated trace elements in near-surface waters of the North Atlantic, derived by large volume sampling. *Mar. Chem*., 68, 71-86.

McGregor H.V., Dima M., Fischer H.W., Mulitza S., 2007. Rapid 20th-Century increase in coastal upwelling off northwest Africa. *Science 315*, 637-639.

Martín J. A., Barceló C. & Pawlowsky V., 1998. Measures of difference for compositional data and hierarchical clustering methods. *Proceedings of the Fourth Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology*, edited by Buccianti A., Nard G., and Potenza R., 526-531.

Miller J. R., G. L. Russell., 1992. The impact of global warming on river runoff. *J. Geophys. Res.*, 97(D3), 2757-2764.

Milliman J. D., & Syvitski J. P. M., 1992. Geomorphic/ tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *J. Geol*., 100(5), 525-544.

Moore B. R., & Dennen W. H., 1970. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments. *J. Sediment. Res.*, 40(4), 1147-1152.

Peterson L. C., Haug G. H., Hughen K. A., & Rohl U., 2000. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 290(5498), 1947-1951.

Peucker-Ehrenbrink B., 2009. Land Sea database of river drainage basin sizes, annual water discharges, and suspended sediment fluxes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 14p.

Plewa K., Meggers H., Kuhlmann H., Freudenthal T., Zabel M., Kasten S., 2012. Geochemical distribution patterns as indicators for productivity and terrigenous input off NW Africa. *Deep-Sea Research* I 66, 51-6.

Schutz L., & Rahn K. A., 1982. Trace-element concentrations in erodible soils, *Atmos. Environ*, 16, 171-176.

Weltje G. J., & Tjallingii R., 2008. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 274(3-4), 423-438.

Yarincik K. M., Murray R. W., Peterson L. C., 2000. Climatically controlled eolian and hemipelagic deposition in the Cariaco Basin, Venezuela: Results from Al/Ti and K/Al. *Paleoceanography*, 15, 210-228.

Zabel M., Schneider R. R., Wagner T., Adegbie A. T., Kolonic S., 2001. Late Quaternary climate changes in Central Africa as inferred from terrigenous input to the Niger Fan. *Quat. Res.*, 56(2), 207-217.

COMPARAISON DES DONNÉES DE PRÉCIPITATION SATELLITAIRES AVEC LES DONNÉES MESURÉES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED OUM ER RBIA EN AMONT DU BARRAGE AHMED EL HANSALI (MAROC)

EL ORFI T.[1,2], EL GHACHI M.[1], LEBAUT S.[2]

1 Laboratoire "DPRP" USMS, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc (elorfitarik@gmail.com)
2 Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine, Nancy, France

Résumé : *Le climat marocain est caractérisé par une forte irrégularité spatiale et temporelle des précipitations. Au niveau du bassin versant de l'oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali, cette irrégularité constitue avec la rareté des stations climatiques un défi majeur pour la gestion des ressources en eau. Ces dernières années, le suivi des précipitations à l'aide des satellites est devenu une réalité, et les produits de certaines missions sont disponibles depuis l'année 1998.*
La performance des données de précipitation TRMM et GPM est évaluée par rapport aux données des précipitations mesurées à partir des indices statistiques de validation RMSE, coefficient de corrélation et biais relatif. Généralement les corrélations entre les données des précipitations mensuelles mesurées et les données des précipitations mensuelles des quatre produits satellitaires montrent un accord raisonnable à différentes échelles de temps.

Mots clés : *TRMM ; GPM ; Précipitation ; oued Oum Er Rbia ; Maroc*

Summary: ***Comparison of remote sensing rainfall data with measured data in the watershed area of the Oued Oum Er Rbia upstream of the Ahmed el Hansali dam (Morocco).*** *The Moroccan climate is characterized by a strong spatial and temporal irregularity of rainfall. At the level of the Oum Er Rbia watershed upstream the Ahmed El Hansali dam, this irregularity constitutes, with the scarcity of climate stations, a major challenge for the management of water resources. In recent years, satellite monitoring of rainfall has become a reality, and the products of some missions have been available since 1998.*
The performance of the TRMM and GPM precipitation data is evaluated against the measured precipitation data from the RMSE validation statistical indices, correlation coefficient and relative bias. Generally the correlations between the measured monthly precipitation data and the monthly precipitation data of the four satellite products show a reasonable agreement at different time scales.

Key words: *TRMM; GPM; rainfall; Oum Er Rbia rive; Morocco*

Introduction

Dans un bassin versant, les stations climatiques fournissent des mesures continues des précipitations dans le temps, mais ces mesures restent ponctuelles et ne peuvent pas être représentatives de la totalité du bassin., Depuis les années 90 les techniques de télédétection ont été largement utilisées dans le domaine du climat, et plus particulièrement pour mesurer les précipitations (Huffman et Bolvin, 2015). Il existe différents types de données de précipitations produites à partir des satellites. Plusieurs études comparatives à l'échelle du globe (Ringard J. *et al.*, 2015 et Alijanian M. *et al.*, 2017) et plus spécifiquement sur le pourtour méditerranéen (Tramblay *et al.*, 2016) concluent que les valeurs TRMM/GPM sont les plus proches de celles mesurées au sol.

La mission TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), lancée par la NASA et la JAXA en 1997, utilise des instruments à micro-ondes actifs et passifs pour mesurer les précipitations entre les latitudes 50° nord et sud. S'appuyant sur le succès de la mission TRMM, les deux pôles d'exploration spatiale américaine et japonaise ont décidé de lancer la mission GPM (Global Precipitation Measurement). Le concept GPM est centré sur le déploiement d'un satellite "Core" transportant un système radar/radiomètre avancé pour mesurer les précipitations et servir de référence pour unifier les mesures de précipitations provenant d'une constellation de satellites de recherche.

Le but de cette contribution est d'évaluer et de comparer les différentes données de précipitation TRMM et GPM par rapport aux données des précipitations mesurées entre 2000-01 et 2016-17, et ceci à des pas de temps différents.

1. Données et Méthodes

1.1. Zone D'étude

Le bassin versant étudié fait partie du plateau central et du Moyen Atlas au Maroc et représente la partie amont du grand bassin versant de l'oued Oum ErRbia. Il est délimité par le bassin de la Moulouya à l'Est, le bassin du Sebou au Nord, et le bassin du Bouragreg à l'Ouest. Nous retenons comme exutoire la station hydrométrique d'Ahmed El Hansali (Fig.1).

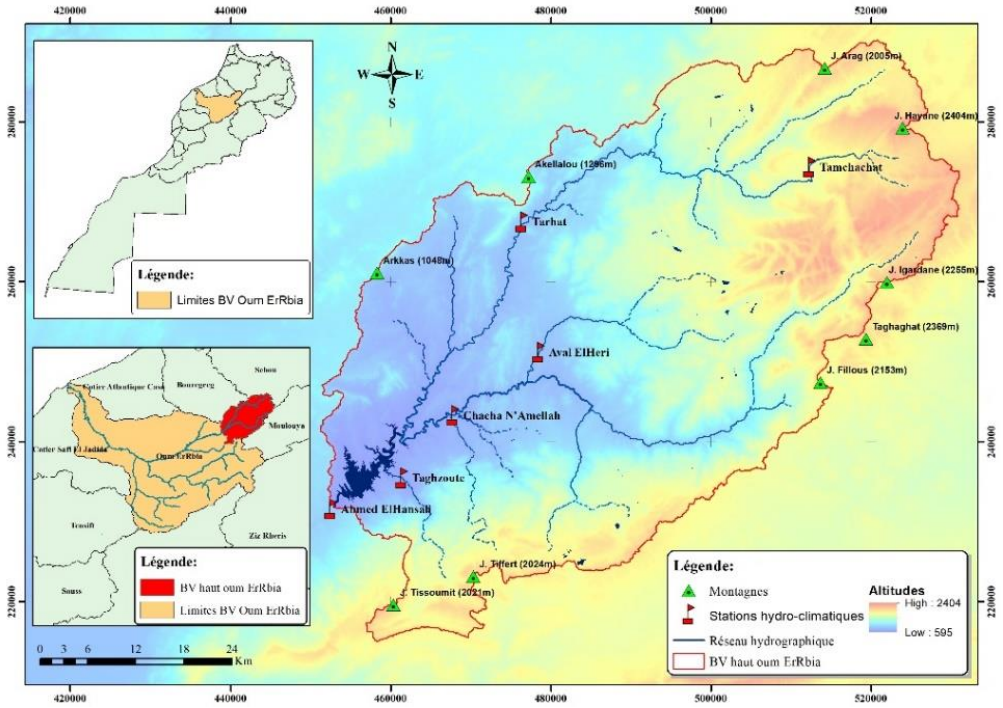


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude et emplacement des stations de mesure

Il s'étend sur une superficie de 3380km², six stations climatiques sont gérées par l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia (ABHOER). Le contexte climatique est de type semi-aride, avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 524mm à l'aval (station de Taghzoute), et 722mm à l'amont (station de Tamchachat) sur la période 2000-01 / 2016-17.

À la limite avec le bassin du Sebou, on trouve le jbel Hayane dont l'altitude est de 2404m et à la limite avec le bassin de la Moulouya le jbel Taghaghat (2369m) et le jbel Igardan (2255m)

1.2. Données

Pour évaluer et comparer les produits TRMM et GPM, les données pluviométriques mensuelles des six stations situées dans la zone d'étude ont été retenues sur la période 2000-01 / 2016-17. Les données originales fournies par l'ABHOER et les autres agences des bassins hydrauliques voisins ont été traitées par la méthode "vecteur régional. Ces données montrent une bonne homogénéité qui se traduit par un coefficient de corrélation compris entre 0.70 et 0.97.

Des différents produits fournis par les deux missions TRMM et GPM dans cette étude, nous en estimons quatre (Tab.1).

Tableau 1. Caractéristiques des produits issus de la télédétection estimant les précipitations

	Nom produit	*Rés. tempo*	*Rés. spati*	*Date*
TRMM_3B42_Daily V7	« Précipitation Rate: TRMM_3B42_Daily V7 »	Journalier	25km	1998-01-01
TRMM_3B43_V7	« Précipitation Rate: TRMM_3B43_V7 »	Mensuelle	25km	1998-01-01
GPM_3IMERGM v05	« Merged satellite-gauge precipitation estimate »	Mensuelle	10km	2014-03-01
GPM_3IMERGM v06	« Merged satellite-gauge precipitation estimate »	Mensuelle	10km	2000-06-01

Les produits ont été téléchargés à partir du site officiel de la NASA, sous forme d'images NetCDF avec une résolution temporelle mensuelle sur la période 2000-01 / 2016-17.

1.3. Méthode

Compte tenu de l'importance que revêtent les données satellitaires dans le suivi et la gestion des ressources en eau surtout dans les bassins non contrôlés par des stations climatiques, plusieurs chercheurs ont évalué ces différents produits à l'échelle mondiale. Au Maroc, Adam Milewski *et al.* (2015) ont évalué quatre produits satellitaires (3B42 : V6, V7temp, V7, RTV7), et en 2017, Hamza Ouatiki *et al.* ont évalué les données des précipitations « TRMM 3B42 V7 » sur l'ensemble du bassin versant d'Oum Er Rbia.

Dans cette étude, nous visons l'évaluation et la comparaison des données pluviométriques des pixels des quatre produits satellitaires correspondants aux stations avec les données des précipitations ponctuelles mesurées. Cette comparaison s'appuie sur les résultats d'une analyse statistique basée sur :

Le coefficient de corrélation : $r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - \acute{Obs}).(TRMM_i - \acute{TRMM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - \acute{Obs})^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(TRMM_i - TRMM)^2}}$

L'erreur quadratique moyenne : $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - TRMM_i)^2}{n}}$

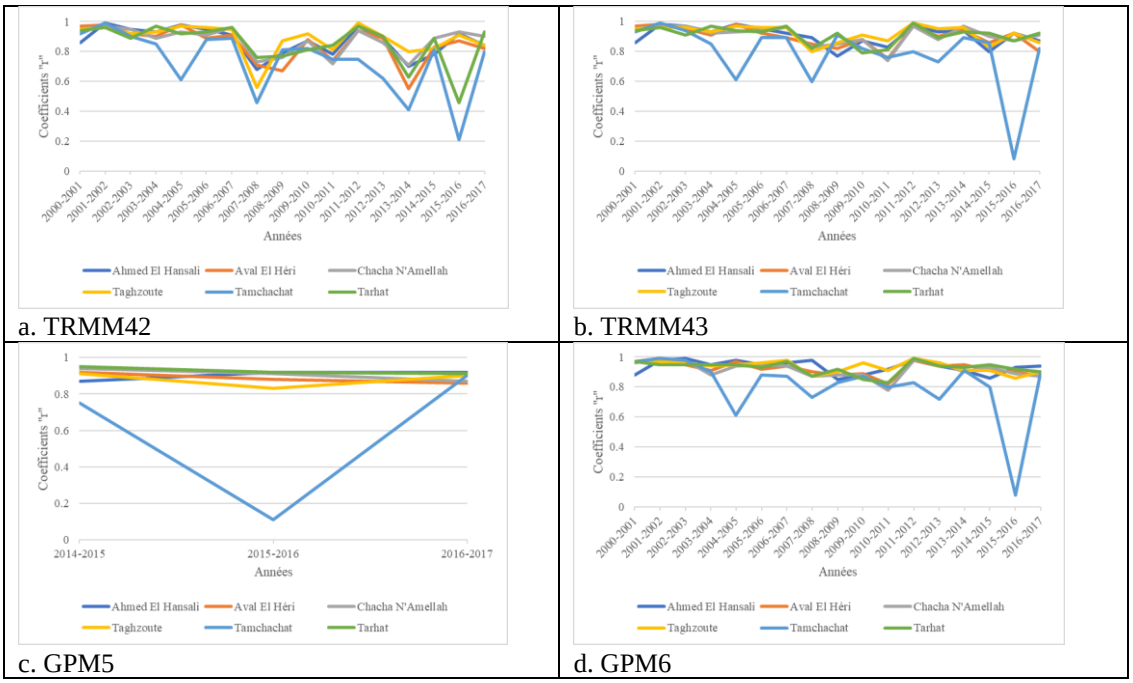
Le biais relatif : $Bias = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} TRMM_i - \sum_{i=1}^{n} Obs_i}{\sum_{i=1}^{n} Obs_i}\right) X100$

2. Résultats

2.1. Évaluation au pas de temps annuel

À l'échelle annuelle, il existe une relation linéaire globale raisonnable entre les précipitations mesurées et les différents produits satellitaires puisque les coefficients de corrélation (r) sont respectivement pour les produits TRMM42, TRMM43, GPM5 et GPM6 de 89%, 97%, 94% et 98%. La qualité de la relation est néanmoins variable en fonction des années et peut être mauvaise pour certaines années. Notons que les faibles coefficients r coïncident avec les années sèches.

Ce sont les produits de dernière génération GPM6 qui présentent les coefficients (r) les plus importants : ils varient entre 0.78 et 0.99 pour toutes les stations sauf pour la station de Tamchachat qui a toujours les plus faibles coefficients de corrélation (Fig.2).



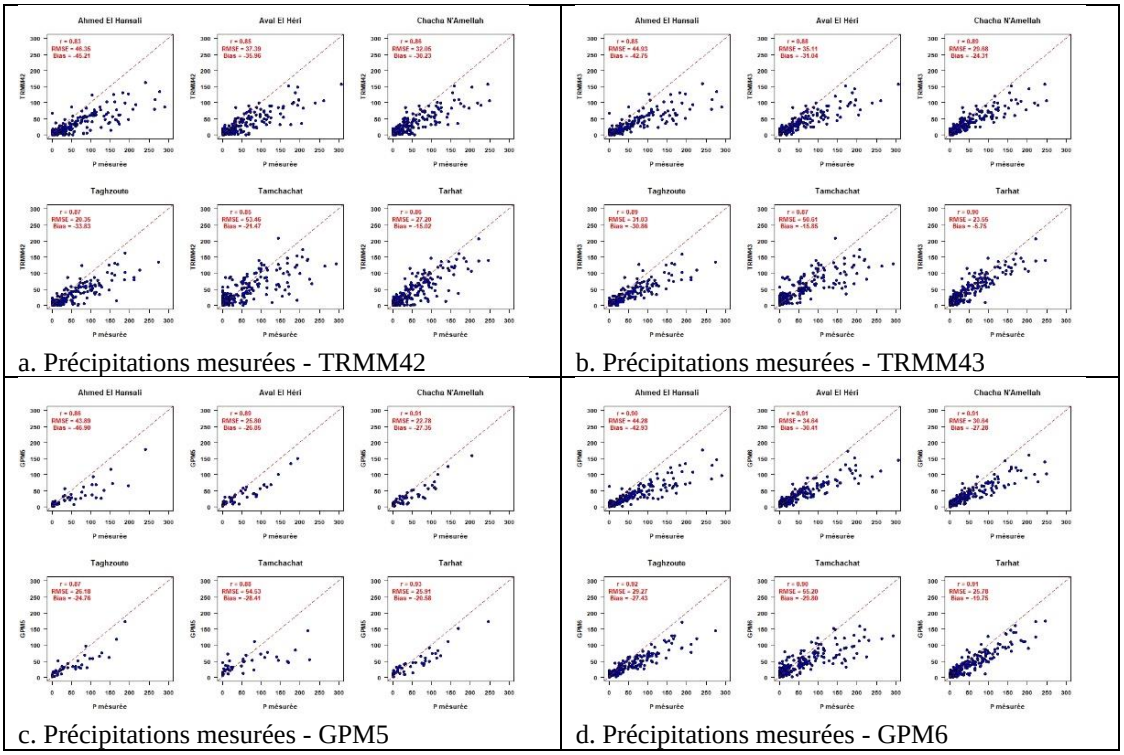
a. TRMM42 b. TRMM43

c. GPM5 d. GPM6

Figure 2. Coefficients de corrélation annuels (année hydrologique : de septembre à août) entre les précipitations mesurées et les précipitations issues des produits satellitaires

2.2. Évaluation au pas de temps mensuel

Au pas mensuel, on note globalement une bonne adéquation entre les précipitations satellites et celles observées aux stations. Les coefficients de corrélation r varient entre 0.83 et 0.93 c'est néanmoins le produit GPM6 qui enregistre les meilleurs résultats avec un r moyen à partir des 6 stations de 0.91 (Fig.3).



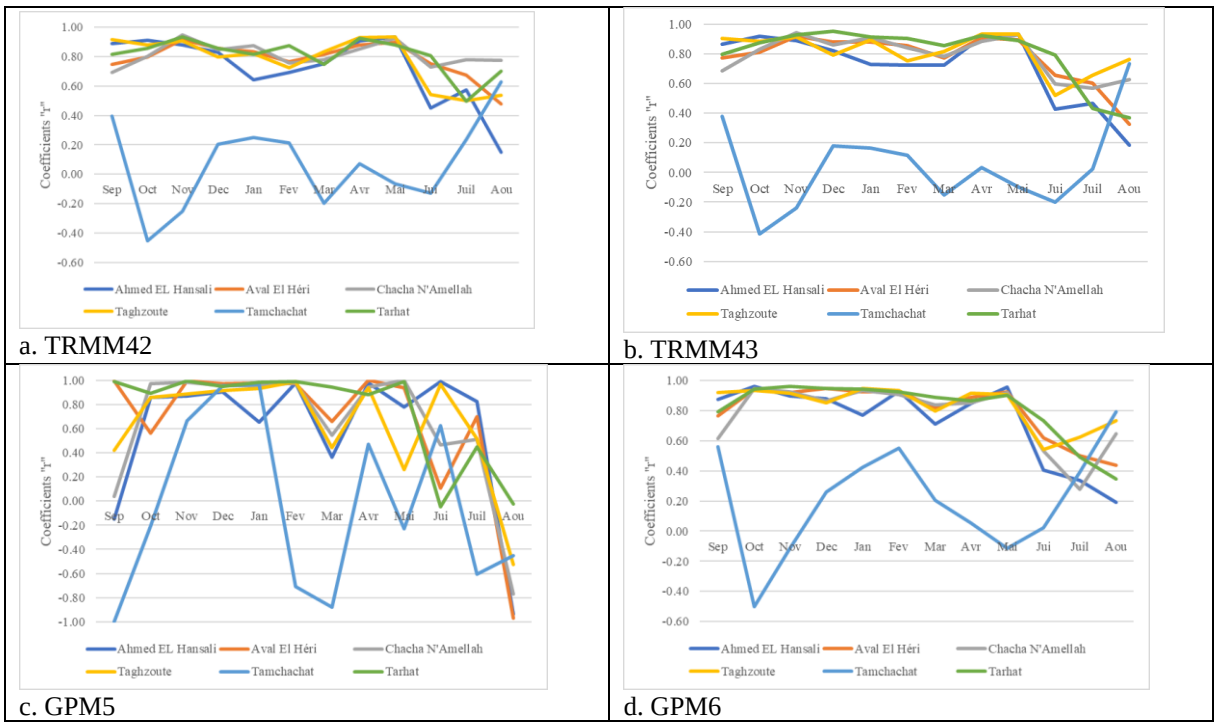
a. Précipitations mesurées - TRMM42 b. Précipitations mesurées - TRMM43

c. Précipitations mesurées - GPM5 d. Précipitations mesurées - GPM6

Figure 3. Corrélation entre les précipitations mesurées et les précipitations issues des produits satellitaires

Néanmoins ces forts coefficients r masquent des écarts pouvant être important entre les deux jeux de données comme l'illustre les RMSE comprises entre 25mm (station de Tarhat) et 50mm (station de Tamchachat) (Fig.3). Ces valeurs s'expliquent par un biais relatif négatif pouvant être fort : de -5 à la station de Tarhat, il atteint -46 à la station d'Ahmed El Hansali (Fig.3).

La pertinence du coefficient de corrélation change au cours de la saison hydrologique, on remarque que les mois de juin, juillet, et août présentent les (r) les plus faibles pour les : TRMM42, TRMM43 et GPM6, ceci est dû essentiellement aux évènements orageux caractérisant la zone d'étude, et les données des GPM5 témoignent des perturbations pendant tous les mois. Concernant les stations, les résultats de corrélation sont généralement bons sauf à la station de Tamchachat qui présente des valeurs anormalement faibles (Fig.4).



a. TRMM42 b. TRMM43

c. GPM5 d. GPM6

Figure 4. Coefficients de corrélation mensuels entre les précipitations mesurées et les précipitations issues des produits satellitaires

Conclusions et Discussion

L'ensemble de nos résultats va dans le sens d'une bonne estimation des précipitations sur le domaine d'étude par les produits satellitaux TRMM et GPM.

À l'échelle mensuelle, les produits satellitaires fournissent de bonnes estimations des précipitations sur toute la chronique, ce qui se traduit par un coefficient de corrélation (r) moyen variant entre 0,85 pour les TRMM-42 et 0,91 pour les GPM-v6, une erreur quadratique moyenne (RMSE) varie entre 38,15 mm pour les TRMM-42, et 33,18 mm pour les GPM-v5, et un biais relatif moyen variés entre -30,29 pour les TRMM-42 et -25.09 pour les TRMM-43. À l'échelle annuelle, mis à part la station de Tamchachat qui est caractérisée par une grande altitude et de l'abondance de neige, les résultats sont pertinents surtout pour le GPM v6 avec un (r) moyen variant entre 0,78 et 0,99.

Compte tenu de l'analyse qui précède et de sa meilleure résolution spatiale, les données pluviométriques GPM v6 peuvent être utilisées pour le suivi et la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali.

Bibliographie

Alijanian M., Rakhshandehroo G.R., Mishrab A.K., Dehghania M., 2017. Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran. *International journal of climatology*, 37, 4896-4914.

Chen S., Zhang L., She D., & Chen J., 2019. Spatial Downscaling of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Annual and Monthly Precipitation Data over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin, China. *Water*, 11(3), 568p.

Fang J., Yang W., Luan Y., Du J., Lin A., & Zhao L., 2019. Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmospheric Research*, 223, 24-38.

Huffman G., & Bolvin D., 2015. TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation. *Environmental Science*, 46.

Milewski A., Elkadiri R., & Durham M., 2015. Assessment and Comparison of TMPA Satellite Precipitation Products in Varying Climatic and Topographic Regimes in Morocco. *Remote Sensing*, 7(5), 5697-5717.

Nair S., Srinivasan G., & Nemani R., 2009. Evaluation of Multi-Satellite TRMM Derived Rainfall Estimates over a Western State of India. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87(6), 927-939.

Ochoa A., Pineda L., Crespo P., et Willems P., 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3179-3193.

Ouatiki H., Boudhar A., Tramblay Y., Jarlan L., Benabdelouhab T., Hanich L., El Meslouhi M., & Chehbouni A., 2017. Evaluation of TRMM 3B42 V7 Rainfall Product over the Oum Er Rbia Watershed in Morocco. *Climate*, 5(1), 1.

Park N.-W., 2013. Spatial Downscaling of TRMM Precipitation Using Geostatistics and Fine Scale Environmental Variables. *Advances in Meteorology*, 1-9.

Ringard J., Becker M., Seyler F., Linguet L., 2015. Temporal and Spatial Assessment of Four Satellite Rainfall Estimates over French Guiana and North Brazil. *Remote Sens*. 2015, 7, 16441–16459. Doi:10.3390/rs71215831.

Rozante J., Vila D., Barboza Chiquetto J., Fernandes A., & Souza Alvim D., 2018. Evaluation of TRMM/GPM Blended Daily Products over Brazil. *Remote Sensing*, 10(6), 882p.

Shukla A., Ojha C., Singh R., Pal L., et Fu D., 2019. Evaluation of TRMM Precipitation Dataset over Himalayan Catchment : The Upper Ganga Basin, India. *Water*, 11(3), 613p.

Tao H., Fischer T., Zeng Y., & Fraedrich K., 2016. Evaluation of TRMM 3B43 Precipitation Data for Drought Monitoring in Jiangsu Province, China. *Water*, 8(6), 221p.

Tramblay Y., Thiemig V., Dezetter A., Hanich L., 2016. Evaluation of satellite-based rainfall products for hydrological modelling in Morocco, *Hydrological Sciences Journal*, 61:14, 2509-2519. Doi: 10.1080/02626667.2016.1154149.

Wang J., & Wolff D. B., 2012. Evaluation of TRMM Rain Estimates Using Ground Measurements over Central Florida. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 926-940.

Wu Y., Zhang Z., Huang Y., Jin Q., Chen X., & Chang J., 2019. Evaluation of the GPM IMERG v5 and TRMM 3B42 v7 Precipitation Products in the Yangtze River Basin, China. *Water*, 11(7), 1459p.

ETUDE DES TENDANCES PLUVIOMETRIQUES RECENTES DANS LA PLAINE DE CHAOUIA (MAROC)

ESSALEK B.[1], NAHLI A.[2]

1 Laboratoire des Sciences d'éducation et sciences Humaines et langues (SESHUL), Département de Géographie, Ecole Normale Supérieure, Université Mohammed V de Rabat, Rabat, Maroc (bouchaibessalek@yahoo.fr)
2 Laboratoire d'Ecologie et d'Environnement (LEE), Hassan II University of Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'sik, Casablanca, Maroc

Résumé : *Ce travail vise l'étude des tendances pluviométriques récentes dans la plaine de Chaouia entre 1976 et 2016 (41 ans). Cette étude intègre les données des précipitations journalières, mensuelles et annuelles de 4 stations météorologiques de la Direction de la Météorologie Nationale de la plaine. L'analyse statistique des séries chronologiques de précipitations au niveau des stations étudiées a montré la présence de ruptures, révélées uniquement par le test de Lee et Heghinian, en 1995 pour Casablanca, 2007 pour Mohammedia et 1979 pour Settat. En effet, entre 1976 et 1994, la plaine de Chaouia a connu une régression continue des précipitations. A partir de 1995, les tendances pluviométriques ont démontré une progression significative des moyennes pluviométriques dans l'ensemble de la plaine, ce qui témoigne d'un retour vers une possible phase humide. Cette tendance progressive des précipitations a été confirmée par une augmentation importante des années humides par rapport aux années normales dans l'ensemble de la plaine.*

Mots clés : *précipitations ; tendance pluviométrique ; sècheresse ; indice pluviométrique standardisé ; plaine de Chaouia*

Summary: ***Study of recent rainfall trends in the Chaouia plain (Morocco).*** *This work aims studying the recent rainfall trend sin the Chaouia plain between 1976 and 2016 (41 years). This study integrates daily, monthly and annual rainfall data from 4 meteorological stations of the National Meteorological Directorate. Statistical analysis of the time series of precipitation at the sites studied showed the presence of ruptures, revealed only by the Lee and Heghinian test, in 1995 for Casablanca, 2007 for Mohammedia and 1979 for Settat. Indeed, between 1976-1994, Chaouia plain experienced a continuous regression of precipitation. Since 1995, precipitation trends showed a significant increase in average precipitation throughout the plain, indicating a return to a possible wet phase. This progressive precipitation trend was confirmed by a significant increase in wet years compared to normal years.*

Key words: *precipitation; rainfall regime; drought; standardized precipitation index; Chaouia plain*

Introduction

Dans le bassin méditerranéen, le climat est généralement caractérisé par l'insuffisance et la variabilité intra et interannuelle des précipitations. En fait, la pénurie en eau dans ce bassin n'est pas récente et était toujours liée aux précipitations. Cette liaison entre les ressources en eau et les précipitations a suscité plusieurs études scientifiques, particulièrement dans les zones arides et semi-arides (Abdou *et al.*, 2008).

Au Maroc, la sécheresse climatique a touché l'ensemble du Royaume avec des conséquences dramatiques sur les ressources en eau et les systèmes humains et naturels dans plusieurs régions, notamment les plaines à forte productivité agricole. Néanmoins, les études récentes montrent que la sécheresse climatique ne fait que s'étendre et devient de plus en plus sévère à partir de la rupture de 1975 (Sebbar *et al.*, 2011). Cette avancée de la sécheresse climatique menace l'équilibre hydrique fragile et la sécurité alimentaire du pays.

En revanche, le retour de quelques années récentes fortement pluvieuses, dans les pays du Sahel et le Nord Afrique (Panthou *et al.*, 2014), a poussé plusieurs auteurs à le considérer comme un signe d'un retour progressif à des conditions pluviométriques plus favorables et que la zone touchée par la sécheresse se réduit dans plusieurs régions. C'est dans ce contexte que cette étude vient pour vérifier l'hypothèse formulée sur le retour d'une phase humide au Maroc à la fin des années 90. Ainsi, ce travail se propose d'étudier les tendances récentes des précipitations dans la plaine de Chaouia entre 1976 et 2016 (41 ans), réputée par ses vastes

plaines et sa forte production agricole. En fait, cette étude intègre les données des précipitations journalières, mensuelles et annuelles de 4 stations météorologiques de la Direction de la Météorologie Nationale, appartenant à cette plaine. Les ruptures et les tendances pluviométriques ont été caractérisées par l'application d'un ensemble de tests statistiques de détection de ruptures (Pettitt, 1979 ; Buishand, 1984 ; Lee et Heghinian, 1977 ; Hubert et Carbonnel, 1987) sur les séries pluviométriques étudiées. En outre, la détermination du caractère humide ou sec des années agricoles a été réalisée par le calcul de l'indice pluviométrique standardisé (IPS) (Mckee *et al.*, 1993).

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation de la zone d'étude

La plaine de chaouia fait partie de la région de Casablanca-Settat, métropole économique du Royaume, caractérisée par la diversification de ses potentialités et ses atouts économiques. Cette région (Fig.1) était toujours une région à vocation essentiellement agricole (Asslouj, 2007) et représente un des principaux pôles de l'activité agricole du Royaume.

Le climat de la plaine de Chaouia est influencé par la latitude, l'altitude (entre 0 et 392m) et de l'éloignement de l'océan. Ce climat est caractérisé par sa diversité du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest. La pluviométrie est variable d'une année à l'autre et évolue dans l'ensemble de la plaine entre 220 et 760mm.Sur le plan hydrologique, le réseau hydrographique du bassin Chaouia est composé des oueds côtiers atlantiques et des oueds drainant le plateau des phosphates qui prennent naissance à l'intérieur de la plaine de Berrechid.

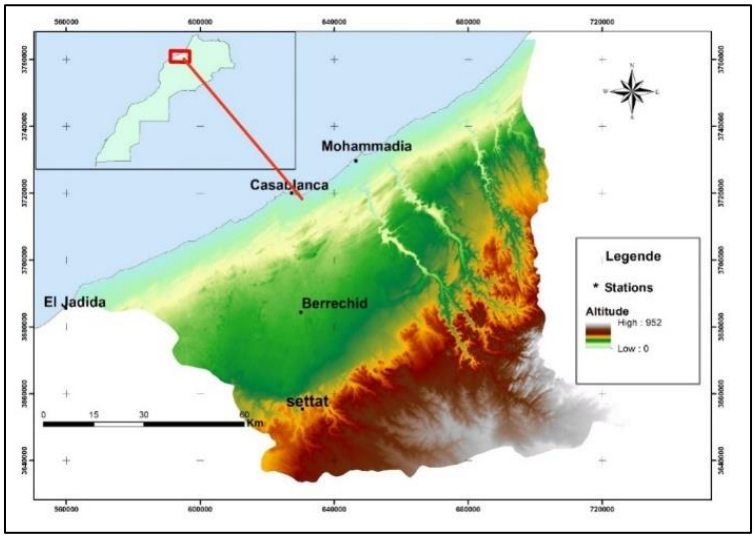


Figure 1. Carte de la plaine de Chaouia

1.2. Base de données

La base de données utilisée pour ce travail provient de la Direction de la Météorologie Nationale. Elle se compose de cumuls pluviométriques journaliers, mensuels et annuels des quatre stations (Casablanca, Mohammedia, Settat et El Jadida) couvrants la zone étudiée, de 1976 à 2016 (41 ans). La station de Casablanca est considérée pour cette étude comme une station de référence pour l'ensemble de la plaine. Ceci est lié aux caractéristiques des données de cette station, dirigée directement par la Direction de la Météorologie Nationale. Elle offre la plus longue série climatique du Maroc, connu par son faible taux de lacunes (et aucune lacune pendant la période étudiée) et son homogénéité. Néanmoins, les lacunes détectées dans certaines séries ne dépassent pas 3 ans ; elles ont été comblées en utilisant la technique développée par Laborde et Mouhous (1998).

1.3. Détection de ruptures et étude de tendances au sein des séries pluviométriques

La détection des ruptures dans une série chronologique fait appel à une série de tests statistiques robustes après un test d'homogénéité. En fait, une rupture dans une série chronologique est définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de cette série à un instant donné, le plus souvent inconnu (Ardoin-Bardin, 2004). La détection d'éventuelles ruptures dans les séries pluviométriques annuelles, liée à une non-stationnarité, a été réalisée à l'aide du logiciel KhronoStat (Boyer, 1998). Ce logiciel comporte différents tests statistiques de détection de ruptures : test Pettitt, statistique U de Buishand, méthode bayésienne de Lee et Heghinian et méthode de segmentation de Hubert. Les tendances linéaires (à la hausse ou à la baisse) ont été évaluées par le test de Mann-Kendall sur une série chronologique.

1.4. Indice Pluviométrique Standardisé (IPS)

L'indice IPS traduit un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée en comparaison avec la pluviométrie moyenne de la période d'étude (Abdou *et al.*, 2008). Il met également en évidence l'intensité du déficit ou de l'excès pluviométrique. En effet, les pluies annuelles obtenues ont étés utilisées pour calculer l'indice pluviométrique annuel pour chaque station, défini comme une variable centrée réduite, selon la formule suivante :

$$IPS = \frac{(\mathrm{Pa} - \mathrm{Pm})}{\sigma \mathrm{P}}$$

Avec :

IPS : indice pluviométrique standardisé de l'année ;Pa : pluviométrie de l'année ;Pm : pluviométrie annuelle moyenne sur la période d'étude ; σP : écart-type de la pluviométrie sur la même période.

L'analyse statistique et le calcul de IPS ont été effectués sur les cumuls de pluie de l'année agricole qui débute au premier septembre de l'année(i) et finit le 31 août de l'année(i+1). Dans un contexte méditerranéen caractérisé par une saison pluvieuse qui commence en septembre, avec un maximum pluviométrique enregistré en hiver (novembre, décembre et janvier), cette année agricole reflète la réalité naturelle.

2. Résultats et discussion

2.1. Variabilité relative des précipitations annuelles dans la plaine de Chaouia

Les cumuls annuels des précipitations des stations étudiées varient dans un intervalle de 333,06 et 403,43 mm calculés respectivement pour la station de Settat et El Jadida (Tab.1). Le coefficient de variabilité (%CV) des précipitations fluctue entre 34% noté pour la station d'El Jadida et 37,03% calculé pour la station de Casablanca avec une moyenne globale pour l'ensemble de la plaine de 35,51% (Tab.1).

Tableau 1. Caractéristiques des stations étudiées (CV : coefficient de variation ; Pa : pluie annuelle moyenne pour la période 1976-2016).

	Longitude	***Latitude***	***Altitude (m)***	***Pa (mm)***	***Ecart type***	***CV (%)***
Casablanca	7° 67'	33° 57'	62	398,95	147,72	37,03
Aljadida	8°,52'	33°,23'	28	403,43	137,18	34,00
Mohammedia	7°,4'	33°,72'	29	381,78	136,65	35,79
Settat	7° 62'	33° 00'	375	333,06	117,35	35,23

Ainsi, cette étude statistique descriptive révèle que la variabilité des pluies dans les différentes stations étudiées est relativement comparable. Toutefois, les plus faibles précipitations annuelles de la plaine sont enregistrées au niveau de la station de Settat, qui est plus éloignée

des influences océaniques par rapport aux autres stations (Casablanca, Mohammedia et El Jadida) et subit les effets de la continentalité (Fig.1, Tab.1).

2.2. Détection de ruptures et étude des tendances pluviométriques

L'analyse du caractère aléatoire de l'ensemble des séries pluviométriques des stations étudiées par le test de corrélation sur le Rang révèle, au seuil de confiance de 99%, une indépendance significative entre les termes successifs de ces séries pluviométriques. En outre, ce caractère aléatoire des séries chronologiques étudiées est confirmé par la variable U du test de Pettitt, avec l'absence d'une rupture à un seuil de confiance de 99%(Tab.2). Néanmoins, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian révèle une rupture dans la série pluviométrique de Casablanca en 1995, Mohammedia en 2007 et Settat en 1979(Tab.2). La rupture notée au niveau de la série pluviométrique de Casablanca, considéré comme une station de référence, stipule une certaine tendance à l'augmentation des précipitations à partir du milieu des années 90dans l'ensemble des stations étudiées (Tab.3).

Tableau 2. Tests de détection de ruptures dans les séries pluviométriques étudiées

	Test de corrélation	***Test de Pettitt***	***U max de Buishand***	***Test de Lee Et Heghinian***	***Segmentation Hubert***
Casablanca	Aléatoire	Absence de rupture	Absence de rupture	1995	Absence de rupture
Mohammedia	Aléatoire	Absence de rupture	Absence de rupture	2007	Absence de rupture
El Jadida	Aléatoire	Absence de rupture	-	-	Absence de rupture
Settat	Aléatoire	Absence de rupture	Absence de rupture	1979	Absence de rupture

Ces tendances progressives des précipitations, évaluées par le test Mann-Kendall (alpha= 0,05), se montrent significatives à partir de l'année 1995 pour l'ensemble des séries pluviométriques étudiées, à l'exception de la station de Settat, où l'augmentation des précipitations est statistiquement non significative (Tab.3).

Tableau 3. Test de tendance de Mann-Kendall (période 1976-2016) et taux d'augmentation (%) des précipitations entre les deux périodes de 1976-1994 et 1995-2016. (+ : significative ; - : non significative)

	Test de Mann-Kendall alpha= 0,05	**Tendance**	**Taux d'augmentation (%)**
Casablanca	0,002	+	18,80
Mohammedia	0,002	+	10,08
EL Jadida	0,002	+	16,04
Settat	0,798	-	11,44

En effet, l'application de la méthode de la moyenne mobile centrée (sur 5 ans) pour la recherche des tendances des précipitations révèle des fluctuations d'ampleur et durée différentes d'une station à une autre (Fig.2). Globalement, ces moyennes mobiles tendent à augmenter à partir de l'année 1995, notamment pour les stations de Casablanca et El Jadida. Le calcul de la moyenne régionale sur les deux périodes de 1976-1994 et 1995-2016 confirme cette évolution progressive des précipitations dans l'ensemble des stations à partir de 1995 et passe de 381,14 mm à 406,33 mm avec des taux d'augmentation variant entre 10,08 et 18,80 %, respectivement calculé pour la station de Mohammedia et Casablanca (Tab.3).

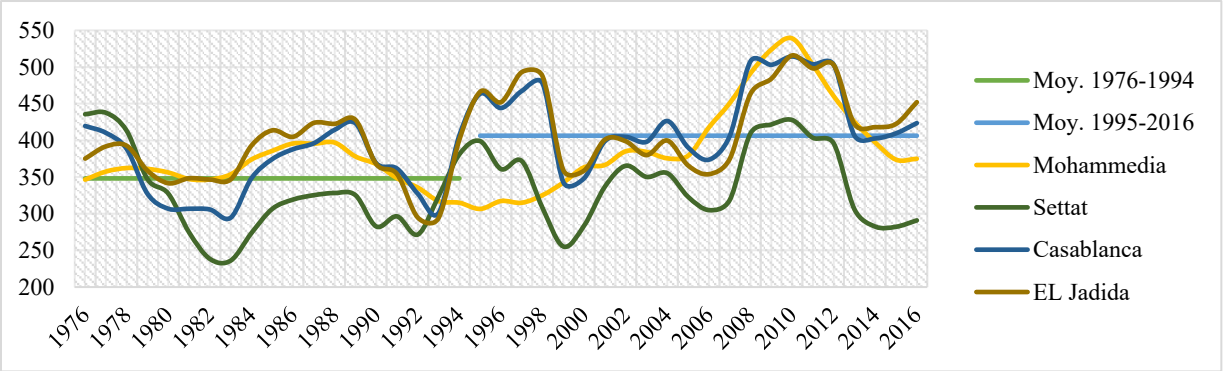


Figure 2. Variabilité des précipitations annuelles en moyenne mobile (5ans) pour les stations de Casablanca, Mohammedia, Settat et EL Jadida. *(Moy. 1976-1994 et Moy. 1995-2016 : Moyennes pluviométriques des 4 stations étudiées pour les deux périodes de1976-1994 et 1995-2016)*

2.3. Indice pluviométrique standardisé (IPS)

La comparaison entre le nombre d'années sèches, humides et normales, après et avant l'année 1995, révèle une hausse très sensible (+73,53%) du nombre moyen des années humides après la rupture dans l'ensemble des stations de la plaine de Chaouia, avec une baisse du nombre moyen des années normales (-54,34%) (Fig.3). Au même moment, les années sèches montrent une légère augmentation à une moyenne de +32,25% pour l'ensemble de la plaine.

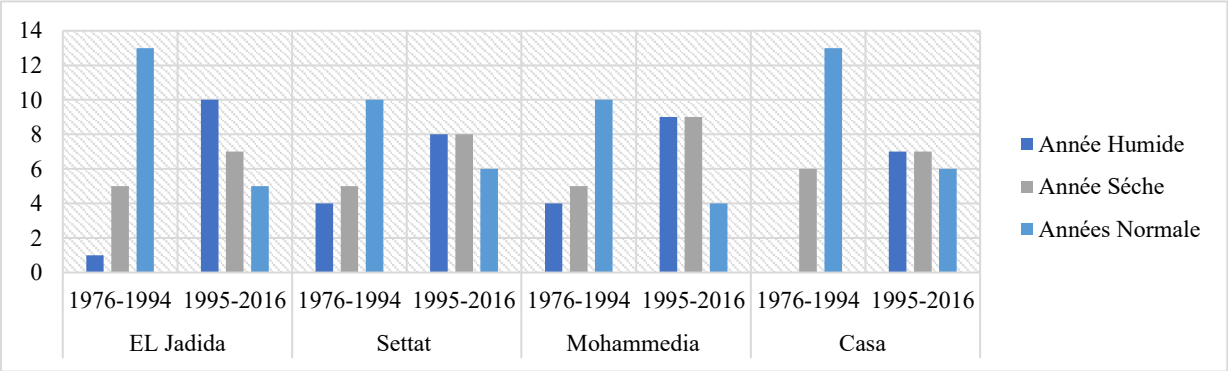


Figure 3. Nombre des années humides, sèches et normales pour les périodes 1976-1994 et 1995-2016

Ainsi, l'augmentation du nombre des années humides et sèches en parallèle dans la plaine de Chaouia et la régression des années normales prouvent une intensification des extrêmes pluviométriques dans la région. Toutefois, la tendance pluviométrique progressive reste dominante et reflète le retour d'une possible phase humide comme celle qui était observée avant 1975 (Sebbar *et al.*, 2011 ; Hanchane, 2013).

Conclusion

Ce travail a intéressé l'étude des tendances pluviométriques récentes dans la plaine de Chaouia entre 1976 et 2016 (41 ans) sur la base des données de précipitations journalières, mensuelles et annuelles de 4 stations météorologiques de la Direction de la Météorologie Nationale. Le suivi de la variabilité relative des précipitations annuelles dans la plaine de Chaouia a révélé une certaine homogénéité relative du régime pluviométrique et que les précipitations annuelles diminuent avec l'éloignement des influences océaniques. L'étude statistique des séries pluviométriques a dévoilé la présence d'une rupture en 1995 au niveau de la station référence de Casablanca. Ainsi, l'évaluation des tendances pluviométriques à partir de cette année de rupture (1995) a démontré une progression significative des pluies dans l'ensemble de la plaine de Chaouia à partir du milieu des années 90, ce qui témoigne d'un retour

vers une possible phase humide. Ce retour des conditions humides serait lié à une inversion de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA), pendant plusieurs années après 1995 (NOAA/CDC), exerçant une grande influence sur les précipitations hivernales marocaines et nord africaines. Néanmoins, l'augmentation des années humides par rapport aux années sèches et la régression des années normales signalent une extrême variabilité pluviométrique caractérisant la plaine de Chaouia.

Bibliographie

Abdou A., Thierry Lebel T.L. & Abou A., 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sècheresse* (19), 227-235.

Ardoin-Bardin S., 2004. *Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de l'Université Montpellier II, France, 440p.

Asslouj J., Kholtei S., Amrani-Paaza N. & Hilali A., 2007. Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Rev. Sci. de l'eau*, 20 (3), 309–321.

Bodian A., Dacosta H. & Dezetter A., 2011. Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 5, 116-133.

Boyer J.F., 1998. Khronostatstatistical timeseries analyses software. Montpellier : UMR 5569 Hydrosciences, IRD-Maison des sciences de l'eau.

Buishand T.A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58, (1-2), 11-27.

Buishand T.A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 73 (1), 51-69.

Delannoy H., 1982. Introduction à l'étude des relations entre les températures des eaux océaniques et les précipitations côtières marocaines. *Norois*, 116, 535-545.

Hanchane M., 2013. Méthodologie de régionalisation spatio-temporelle pour une analyse des précipitations (1961-1992) : application au Maroc atlantique. *Actes du Deuxième Colloque international « Eau & Climat : Regards croisés Nord/Sud »*, 27-28 novembre 2013, Fès, Maroc, 31-39.

Hubert P. & Carbonnel J.P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95 (1), 165-183.

Laborde J.P. & Mouhous N., 1998. Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Nice : Equipe de gestion et valorisation de l'environnement.

Lee A.F.S. & Heghinian S.A., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independant normal random variables. A Bayesian approach. *Technometrics*, 19 (4), 503-506.

McKee T.B., Doeskenet N.J. & Kleist J.,1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, 17-22 January 1993, Anaheim, California. Boston, American Meteorological Society, 179–184.

Panthou G., Vischel T. & Lebel T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34, 3998-4006.

Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28 (2), 126-135.

Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A.& Badri W., 2011. Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004). *Sécheresse*, 22, 139-48.

Zerouali A., Lakfifi L., Larabi A. & Ameziane A., 2001. Modélisation De La Nappe De Chaouia Côtière (Maroc). First International Conference on Salt wáter Intrusion and Costal Aquifers-Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25.

DYNAMIQUE SPATIALE ET EROSION PLUVIALE DANS LE DOUBLET PORTO-NOVO-AKPRO MISSERETE AU BENIN

ETENE C.G.

Laboratoire Pierre Pagney Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin (cyr_gervais_etene@hotmail.com)

Résumé : *L'urbanisation rapide, la croissance démographique et les changements climatiques observés les trois dernières décennies sont considérés comme des facteurs amplificateurs de l'érosion pluviale dans les milieux urbains. La présente étude vise à analyser les effets de la dynamique spatiale sur la dégradation de l'environnement urbain du doublet Porto-Novo-Akpro Missérété par l'érosion pluviale. Les données topographiques, cartographiques et démographiques ont été utilisées pour apprécier la dynamique spatiale et la dégradation des terres. La statistique descriptive et l'indice de risque des catastrophes ont été utilisés. Il résulte de cette étude que les mois de juin (21 %), juillet 16 %) et août (14 %) sont les plus agressifs en termes d'érosivité de pluie dans le doublet Porto-Novo et Akpro Missérété.*

Mots clés : *Porto-Novo-Akpro Missérété (Bénin) ; dynamique spatiale ; érosion ; dégradation du sol*

Summary: ***Spatial dynamics and rain erosion in the Porto-Novo and Akpro- Misserete doublet in Benin***. *Rapid urbanization, population growth and climate change observed over the past three decades are considered to be factors amplifying rainfall erosion in urban environments. The purpose of this study is to analyze the effects of spatial dynamics on the degradation of the urban environment of the Porto-Novo-Akpro Missérete by rainfall erosion. Topographical, cartographic and demographic data were used to assess spatial dynamics and land degradation. Descriptive statistics and the Disaster Risk Index were used. This study shows that the months of June (21%), July 16%) and August (14%) are the most aggressive in terms of rain erosivity in the double Porto-Novo and Akpro-Missérete.*

Key words: *Porto-Novo-Akpro Missérété (Benin); spatial dynamics; erosion; land degradation*

Introduction

L'urbanisation rapide, la croissance démographique et les changements climatiques observés ces trois dernières décennies ont contribué à la dégradation des villes des pays tropicaux. Ces modifications ne demeurent pas sans conséquence sur le milieu physique et les activités anthropiques. En effet, l'Afrique qui était jusque-là considéré comme le continent le moins urbanisé (40 %) en 2014 devrait atteindre 55,9 % en 2050 (ONU, 2014). Les prévisions montrent un doublement de la population urbaine de l'Afrique subsaharienne en 25 ans, passant de 324 millions à 730 millions (Dembele, 2017). Au Bénin, les grandes villes comme Porto-Novo, Cotonou et Parakou font partie de ce lot de villes africaines qui connaissent une croissance urbaine sans précédent.

Dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété, les populations étaient respectivement de 264 320 et de 127 249 habitants en 2013 selon INSAE (2013). Le taux d'accroissement démographique s'élève à 1,49 % pour Porto-Novo et à 5,08 % pour Akpro-Missérété (INSAE, 2013). Porto-Novo, capitale politique du Bénin, s'étale et se densifie dont les conséquences immédiates sont l'occupation des zones à risque, l'extension de Porto-Novo sur Akpro-Missérété, le développement de quartiers spontanés non viabilisés, l'insuffisance des ouvrages de drainage des eaux pluviales ce qui expose ces différents territoires aux risques d'érodibilité des terres. La présente recherche vise à analyser l'impact de la dynamique spatiale et de l'érosion pluviale dans le doublet Porto-Novo-Akpro-Missérété au Bénin en Afrique de l'Ouest surtout dans une perspective de développement urbain durable.

1. Présentation de cadre géographique

Situé dans le sud-est du Bénin, le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété est compris entre 6° 25’ et 6° 40’ de latitude nord et 2° 30’ et 2°40’ de longitude est (Fig.1).

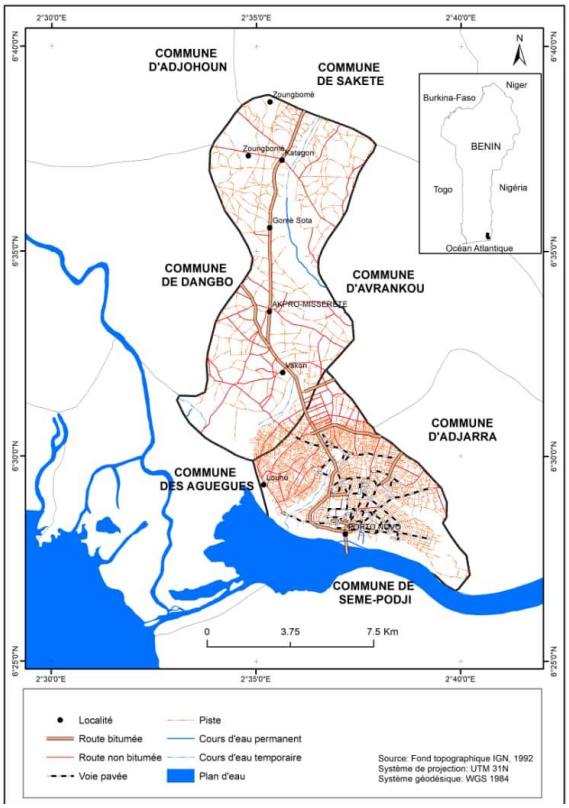


Figure 1. Situation géographique de doublet Porto-Novo-Akpro-Missérété

D’une superficie respectivement de 52 km^2 et 79 km^2, ces deux territoires sont situés sur les plateaux Porto-Novo-Sakété-Pobè avec une altitude moyenne variant entre 60 et 100 m, entaillés par une série des plaines inondables et des dépressions marécageuses.

Du point de vue topographique, le milieu d’étude est caractérisé par des pentes allant de 1 à 8 %, ce qui favorise le drainage des eaux fluviales vers le plan d’eau de la lagune et les dépressions marécageuses environnantes (Avocevou, 2016). Ce relief présente par endroits des entailles. La simplicité du relief va favoriser une occupation intégrale de l’espace ; ce qui constitue l’un des facteurs de la dynamique et de l’extension spatiale. Sur le plan climatique, le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété est caractérisé par un climat subéquatorial avec une moyenne annuelle d’environ 1200 mm de pluie. Ce climat favorable d’une part à l’installation humaine et d’autre part c’est un facteur responsable des phénomènes érosifs dans le milieu d’étude.

2. Données et méthodes

Cette étude repose sur des données démographiques, cartographique et infrastructurelles. Ainsi, les investigations en milieu réel ont permis d’interroger plus de 225 personnes afin de voir leur degré de perception sur le phénomène d’érodibilité des terres dans le secteur d’étude. Les indices pluviométriques (I) ont été analysés pour montrer la variabilité interannuelle des précipitations. Ils ont été calculés avec la formule: I = (Xi - Xmoy) /s, où Xi est la hauteur de pluie pour une année, Xmoy la pluviométrie moyenne et s est l’écart-type de la période étudiée. Lorsque I > 0, l’année est considérée comme humide et quand I < 0, l’année est considérée comme sèche. Pour estimer l’érosivité des pluies, l’indice d’agressivité climatique a été calculé selon la formule de Fournier (1993) : $F = \frac{p^2}{P}$, avec p, la pluviométrie mensuelle la plus élevée, et P, la moyenne pluviométrique annuelle.

Des méthodes de cartographie diachronique de l’occupation des terres ont été utilisées. Ainsi, le mosaïquage des quatre scènes d’images deux à deux avec le logiciel Erdas Imagine 14.00 et des améliorations radiométriques pour rehausser la lisibilité des images à l’aide du logiciel Envi 5.1 ont d’abord été effectués. L’interprétation numérique des images Landsat 5 TM de 1990 et des images Landsat 8 OLI-TIRS a été réalisée selon la méthode de classification supervisée à l’aide du logiciel Envi 5.1. Les aires d’entrainement ont été délimitées au pixel près sur l’ensemble des unités d’occupation des terres. Pour le contrôle-terrain, 80 points GPS ont été relevés dans les différentes unités d’occupation des terres.

3. Résultats et discussion

3.1. Facteurs et manifestations de la dynamique démographique et spatiale dans le doublet Porto-Novo-Akpro-Misserete

Plusieurs facteurs expliquent l'extension spatiale du milieu d'étude. Les figures 2, 3 et 4 présentent l'évolution démographique, la densité de la population et le mode d'occupation du sol dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété.

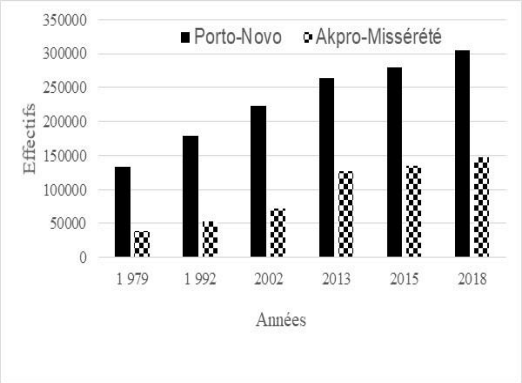


Figure 2. Evolution démographique à Porto-Novo et Akpro-Missérété entre 1979 à 2018

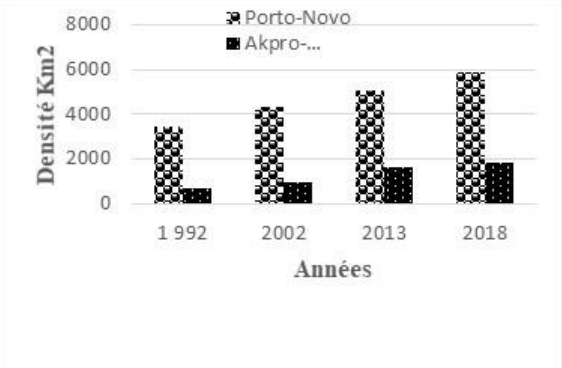


Figure 3. Evolution de la densité dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété entre 1992 à 2018

La figure 2 montre la dynamique démographique dans les deux communes. Selon les recensements généraux de la population et des habitations (RGPH) au Bénin, les deux communes ont connu une évolution démographique très importante. D'une population de 133168 en 1979 et 305153 habitants en 2018, la commune de Porto-Novo a connu une croissance de 171985 en 39 ans. Quant à la commune de Akpro-Missérété, d'une population de 39291 habitants en 1979 et 146893 habitants en 2018 soit une croissance de 107602 en 39 ans. Cette augmentation de la population ne demeure pas sans conséquence en matière de demande des terres habitables, agricoles et infrastructurelles.

De l'analyse de la figure 3, il ressort que dans les deux communes, la densité de la population a connu une évolution significative dans le temps. De 3445 habitants au Km^2 en 1992, cette densité a atteint 5868 hbts/km^2 en 2018 dans la commune de Porto-Novo. A Akpro-Missérété, cette densité passe de 669 hbts/km^2 en 1992 à 1859 hbts/km^2 en 2018.

L'analyse de la dynamique de l'occupation des sols (Fig.4) révèle qu'en 1990 le territoire du doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété est dominé par les formations telles que la forêt et savane marécageuse (1462,73 ha), les plantations (5,09 ha), les cultures et jachères (6205,08 ha), les cultures et jachères sous palmier à huile (3030,968 ha), les agglomérations (1814,66 ha), etc. Ces différentes unités d'occupation du sol ont connu tantôt une régression soit une progression.

De 1814,66 ha en 1990, 4604,89 ha en 2005 et 630914 ha en 2017, les agglomérations ont progressé respectivement de 39 % et 73 % entre 1990 à 2005 et 2005 à 2017 dans le milieu d'étude. Par contre les formations telles que les cultures et jachères, les cultures et jachères sous palmier à huile ont connu des régressions respectivement de l'ordre 288 % et 182 % entre 1990-2005 et de 72 % et 121 % ente 2005-2017. Au total, le territoire du doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété a connu d'importants changements surtout une forte reconversion de milieu naturel en milieu anthropisé. Ces genres de changements ont pour conséquences la destruction du couvert végétal rempart contre l'érosion hydrique, augmentation de surface imperméabilisée, la densification du ruissellement et le faible taux d'infiltration.

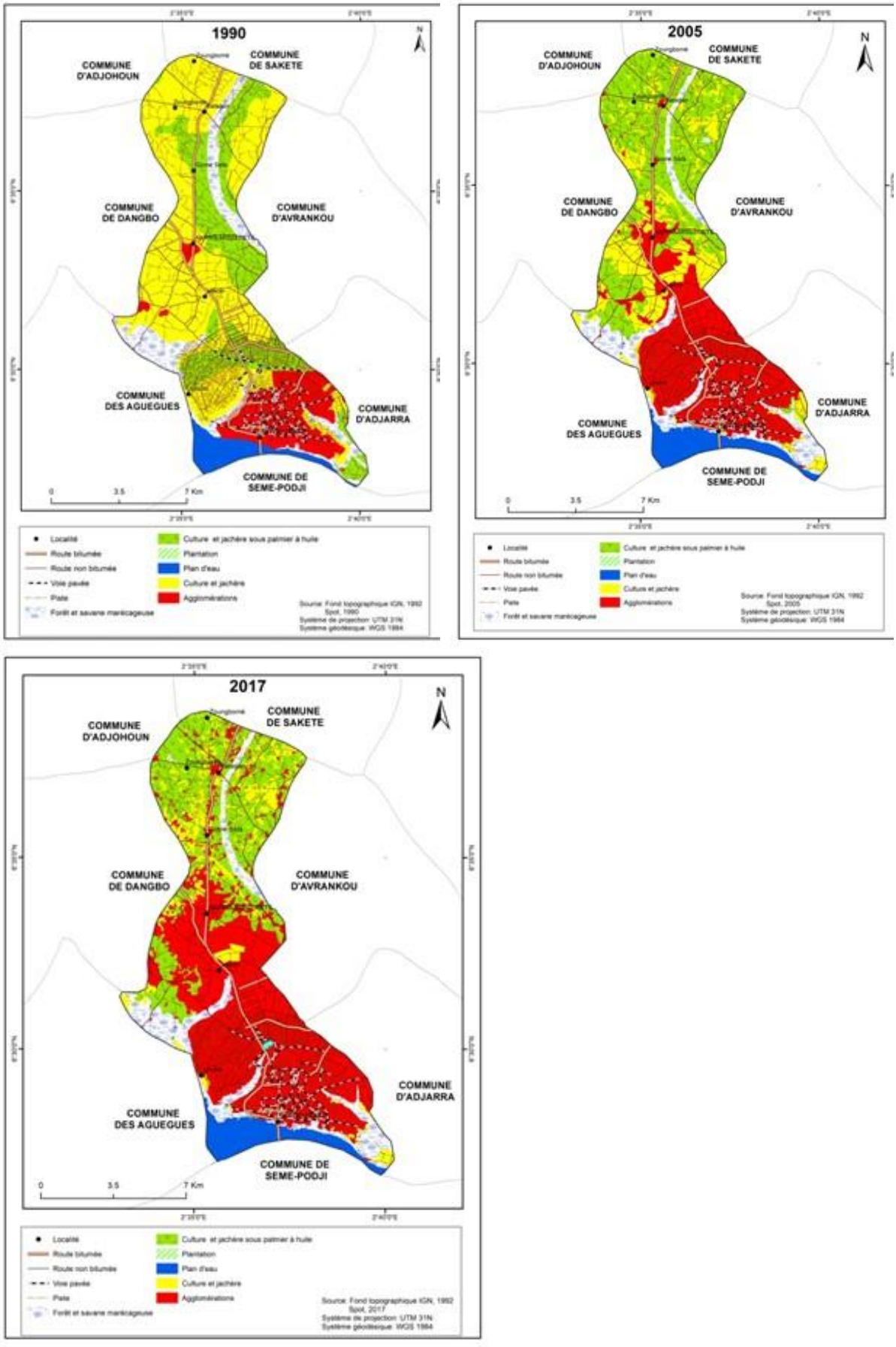


Figure 4. Occupation du sol en 1990, 2005 et 2017 dans le secteur d'étude

3.2. Effets de l'érosion pluviale dans le doublet Porto-Novo-Akpro-Missérété

La transformation de l'espace naturel en milieu anthropisé et associé à l'érosivité des pluies explique bien le phénomène de l'érosion pluviale observé dans la région d'étude. Les figures 5 et 6 indiquent la variation interannuelle des indices pluviométriques et d'agressivité des pluies dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété.

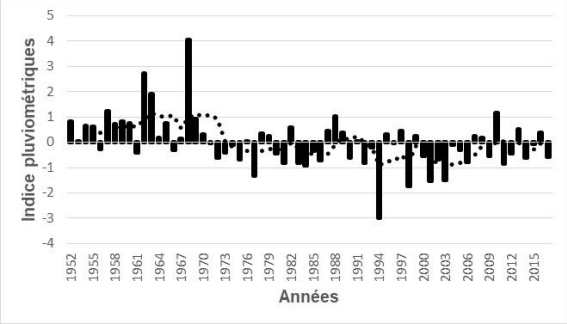


Figure 5. Variation interannuelle des indices pluviométriques à Porto-Novo (1952 – 2017)

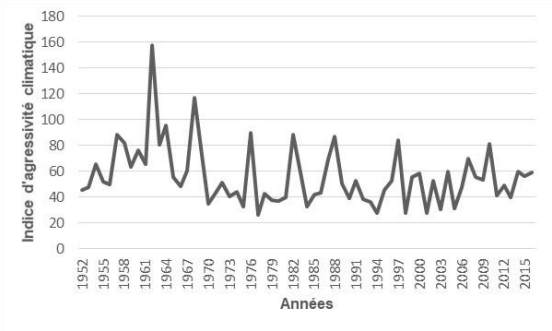


Figure 6. Variation interannuelle de l'indice d'érosivité à Porto-Novo (1952-2017)

La figure 5 présente l'indice pluviométrique et la moyenne mobile lissée sur 5 ans à Porto-Novo. Ainsi, il se dégage deux périodes à savoir : la période humide de 1952 à 1970 qui est caractérisée par des précipitations et des ruissellements très important (fort taux d'érodibilité) et la période sèche allant de 1971 à 2017 intercalée par les années humides est caractérisée par des faibles précipitations, mais associé avec les surfaces imperméabilisées induise par la dynamique spatiale explique également l'importance de l'érosion pluviale dans le milieu d'étude.

Par contre la figure 6 montre la variation interannuelle de l'indice d'agressivité climatique dans le secteur d'étude. Ainsi, les années 1962 (158 %), 1968 (117 %), 1982 (89 %), 1988 (87 %), 1997 (84 %), 2007 (70 %) et 2014 (60 %) sont considérés comme les années ou l'activité érosive est très importante à Porto-Novo et à Akpro-Missérété. Mais cette dégradation touche surtout les différentes infrastructures urbaines (Fig.7).

Figure 7. Ruelle détruit par une ravine à Tanto Porto-Novo (à gauche) et déchaussement d'un système de protection par l'érosion à Vakon Akpro-Missérété (à droite) (Clichés : Eténé, juin 2019*)*

Pour 60 % des personnes interrogées, l'érosion n'affecte pas de la même manière les deux communes. Ainsi, à Porto-Novo on enregistre des ravines dont la profondeur varie de 0 à 300 m et à Akpro-Missérété, les ravines de profondeur de 0 à 200 m. Ces ravines de tracé linéaire sont en train de menacer sérieusement plus de 300 habitations dans le secteur d'étude. Au total, le développement de l'urbanisation, le croît démographique et le fort d'érosivité dans la zone expliquent l'importance du phénomène érosif observé.

3.3. Discussion

L'analyse de la dynamique spatiale et de l'érosion pluviale dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Missérété montre que le croît démographique, la densité et la crise de logement sont des facteurs amplificateurs de la dynamique spatiale des villes dans le secteur d'étude. Une observation similaire sur les deux communes a été faite par Avocevou (2016 et 2019) et Aboudou (2010). Cette dynamique spatiale se traduit par les différents modes d'occupation du milieu. Ainsi, certaines unités d'occupation telles que les agglomérations qui ont connu une évolution spatiale très significative (39 % et 73 % entre 1990 à 2005 et 2005 à 2017) au détriment des champs et jachères. Ce résultat est près qu'identique avec ceux de Avocevou (2019) et Kouatonou (2017). Cette transformation de l'espace naturel en un espace anthropisé ne demeure pas sans conséquence en termes de risque d'érosion de sol. Dans le doublet Porto-Novo-Akpro-Missérété, la dynamique spatiale et les perturbations climatiques ont contribué à l'amplification du phénomène érosif. Ainsi, les habitations et les infrastructures urbaines sont déchaussées et ravinées. Ce résultat est confirmé par les travaux de Eténé *et al*. (2017) et Houndakinou (2006).

Conclusion

L'étude de la dynamique spatiale et de l'érosion pluviale dans le doublet Porto-Novo et Akpro-Misserete a permis de comprendre les liens qui existent entre les modifications du milieu et le phénomène érosif. Ainsi, la dynamique démographique et la crise foncière ont contribué à l'extension des agglomérations sur les espaces naturels. Les impacts induits par ce changement sont l'augmentation des surfaces imperméabilisées, le fort taux de ruissellement et les faibles taux d'infiltration, qui sont des facteurs déclencheurs de l'érosion pluviale dans le milieu d'étude.

Bibliographie

Avocevou R. Y., 2019. *Urbanisation et problèmes d'aménagement sur le plateau Sakété Pobè (sud-bénin) : espace témin de la commune d'Akpro Misserete.* Thèse de doctorat en géographie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 346p.

Avocevou R. Y., 2016. *Urbanisation et problèmes d'aménagement dans la ville d'Akpro-Missérété.* Mémoire de DEA de géographie, FLASH/UAC, 110p.

Aboudou Y. M. A. R., 2010. *Dynamiques des périphéries urbaines à Parakou : manifestations et incidences socio-économiques et environnementales.* Thèse de Doctorat Unique en Géographie, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 330p.

Dembele, 2017. *Dynamique socio-spatiale de la ville de Bamako et ses environs*, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, France, 357p.

Eténé C. G., Issa, S. M., Chabi B. A. P.H., Koussinou E., Soukossi R., 2017. Érosion pluviale et dégradation des établissement humains à Adjarra au Bénin. *Revue Ivoirienne de sciences et de la technologie*, 180-197.

Fournier J., 1993. Agressivité climatique et risques érosifs dans la région de Dschang-Ouest Cameroun. Document technique du projet Santchou, 12p.

Houndakinnou G. R., 2006. *Fréquence des événements pluvieux extrêmes et impacts environnementaux dans la ville de Cotonou.* Mémoire de DEA / EDP/ FLASH/ UAC, 60p.

INSAE., 2013. Cahier des villages et quartiers de villes. Département de l'Ouémé, 28p.

INSAE., 2013. Recensement général de la population et des habitations, 33p.

Kouatonou A., 2017. *Dynamique urbaine du sol et problème de logement dans la commune de Porto-Novo*. Mémoire de maîtrise en géographie, FLASH-UAC, 82p.

ONU., 2014. L'état des villes africaines. Gouvernance, inégalités et marchés fonciers urbains.

REPARTITION DES PARTICULES FINES ET ULTRAFINES (PM_{10} ET $PM_{2,5}$) DANS L'AGGLOMERATION DE SFAX (TUNISIE)

EUCHI H.[1], DAHECH S.[2]

1 *Université de Sfax, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, Sfax, Tunisie (euchihamdi@hotmail.fr)*
2 Université de Paris Diderot, UMR PRODIG, Paris, France (salem.dahech@gmail.com)

Résumé *: L'objectif du présent papier est de quantifier la pollution de l'air particulaire dans trois points de l'agglomération de Sfax à partir de campagnes de mesures semi-itinérantes, réalisées par des capteurs portables de particules fines et ultrafines PM_{10} et $PM_{2,5}$, en dehors des heures de pointe du trafic routier et par même type temps. Le but, ici, est d'éviter la hausse des concentrations des PM_{10} et $PM_{2,5}$, induites par les émissions issues des sources mobiles, pour faire ressortir l'effet des poussières, dégagées par les chantiers de construction ou celles soulevées du sol suite aux passage des véhicules. L'environnement des sites retenus est représentatif : il est distingué par l'abondance des poussières, faciles à soulever par le trafic routier et le vent. Les résultats des campagnes de mesures montrent que les poussières, soulevées suite à des effets parfois conjugués des véhicules et des travaux du chantier ou tout simplement par le vent, provoquent d'importante pollution particulaire (PM_{10} et $PM_{2,5}$). En fait, les niveaux maximaux des particules fines et ultrafines, mesurées, ont atteint 728 µg/m^3 pour les PM_{10} et 311 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$ /30 secondes et environ 300µg/m^3 pour les PM_{10} et 180 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$/heure.*

Mots clés : *campagnes de mesures de PM_{10} et $PM_{2,5}$; poussières ; Sfax*

Summary: ***The distribution of fine particles (PM_{10} and $PM_{2.5}$) of natural orgin in the agglomeration of Sfax (Tunisia).****The objective of this paper is to quantify particulate air pollution in three points of the Sfax conurbation, using semi-itinerant, measurement campaigns carried out by portable sensors of fine and ultrafine particles PM_{10} and $PM_{2.5}$, outside peak hours of road traffic and in the same type of weather. The aim here is to avoid the increase in PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations, induced by emissions from mobile sources, to bring out the effect of dust released by construction sites or those raised from the ground following the passage of vehicles. The environment of the selected sites is representative : it is distinguished by the abundance of dust, easy to lift by road traffic and wind. The results of the measurement campaigns show that the dust, raised following the sometimes combined effects of construction site vehicles or simply by the wind, causes significant particulate pollution (PM_{10} and $PM_{2.5}$). In fact, the maximum levels of fine and ultrafine particles, measured, reached 728 µg / m3 for PM_{10} and 311 µg / m^3 for $PM_{2.5}$ / 30 second and around 300 µg / m^3 for PM10 and 180 µg / m^3 for $PM_{2.5}$ / hour.*

Key words: *PM_{10} and $PM_{2.5}$ survey; dust; Sfax*

Introduction

La dégradation de la qualité de l'air, provoquée principalement par les polluants particulaires (PM_{10}, $PM_{2,5}$ et PM_1), constitue un déterminant majeur de la santé humaine (Host, 2012 ; Yang et Schwartz, 2012 ; Michelot, 2014 ; OMS, 2019). En effet, l'exposition à court et à long terme aux particules fines et ultrafines peut contribuer, en partie, au développement des symptômes de plusieurs maladies respiratoires et cardiovasculaires, potentiellement dangereuses telles que le cancer du poumon, l'asthme chronique, l'infarctus du myocarde, les troubles du rythme cardiaque (OMS, 2019). Dans ce contexte, une étude récente, menée par Santé Public France en 2016 (SBF), a montré que la pollution particulaire est responsable de 48 000 décès par an, soit 8% de la mortalité en général (https://www.santepubliquefrance.fr).

Située en Tunisie centrale, l'agglomération de Sfax (600 000 habitants-INS, 2014) se distingue par l'importance des émissions polluantes, notamment particulaires (Euchi et Dahech, 2019). Dans cette agglomération, en plus des sources anthropiques fixes et mobiles des polluants particulaires, le vent fort et le trafic routier soulèvent les poussières qui sont abondantes sur la chaussée et près des chantiers des travaux de construction. En raison de la faiblesse de la densité du réseau de mesure fixe de la qualité de l'air, dans l'agglomération de Sfax (deux stations uniquement), cette pollution particulaire, notamment d'origine naturelle, est difficile à cerner.

La présente étude vise à quantifier la pollution particulaire (PM_{10} et $PM_{2,5}$), mesurée sur le trottoir d'une route principale loin des grands croisements du centre-ville et près d'un chantier de travaux public (construction d'un pont d'étagement). Les mesures sont réalisées dans trois sites à Sfax par des capteurs de types PCE-MPC-10[1]. Nous avons évité les heures de pointe afin d'échapper à la hausse des concentrations des PM_{10} et $PM_{2,5}$, induite par les émissions issues des sources mobiles, pour faire ressortir l'effet des poussières, dégagées par les chantiers de construction ou celles soulevées du sol suite aux passage des véhicules ou uniquement par le vent.

1. Données et méthodes

Les campagnes de mesures de PM_{10} et $PM_{2,5}$ ont été réalisées le 22/01/2020 par des capteurs de type PCE-MPC-10, dans trois sites à Sfax, durant des moments de faible circulation routière et par temps anticyclonique (1025 hPa) avec un vent modéré de 7 m/s pouvant favoriser ponctuellement le chasse sable. Le vent synoptique soufflant des secteurs E à SE prédomine durant le 22/01/2020 (Fig.1). La visibilité est bonne et atteint 10 km. Les deux premières campagnes de mesures de PM_{10} et $PM_{2.5}$ sont réalisées instantanément par deux équipes entre 10 et 12 h sur les accotements recouverts de poussières au niveau de la route de Soukra à Sfax, dans deux sites. Le premier est situé à 1 km du centre-ville à proximité du stade de Taïeb-Mehir et le deuxième se trouve sur la même route à 3 km du centre-ville, devant l'École Nationale des Ingénieurs de Sfax (ENIS - Fig.2). Cette voie routière dessert deux quartiers populaires (El Bahri et El Habib) très denses (Dahech et Bouaziz, 2016).

Les mesures de PM_{10} et $PM_{2,5}$ ont été effectuées de manière discontinue, soit toutes les 30 secondes pour arriver à totaliser 120 enregistrements de $PM_{2,5}$ et PM_{10} (soit 240 mesures). Tout au long des mesures, les capteurs sont placés à environ 1,5 m de la surface au niveau de l'appareil respiratoire. La troisième campagne de mesure a été effectuée dans l'après-midi du 22/01/2020 entre 14h30 et 15 h, à proximité d'un chantier (construction d'un pont d'étagement), au niveau du croisement de la route de Tenouir et du canal Bourguiba (rocade du km 4 -Fig.2). Dans ce site, 60 mesures de PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont réalisées (une toutes les 30 secondes). Les dépôts sableux et poussiéreux accumulés sont ainsi susceptibles d'être facilement soulevés par le vent, le trafic routier et les travaux des chantiers.

[1]Les capteurs portables de types PCE-MPC-10 ont été obtenus suite à une collaboration avec l'Université de Paris Diderot et LabExDynamTe. Ils disposent de ventilateurs qui permettent le renouvellement de l'air.

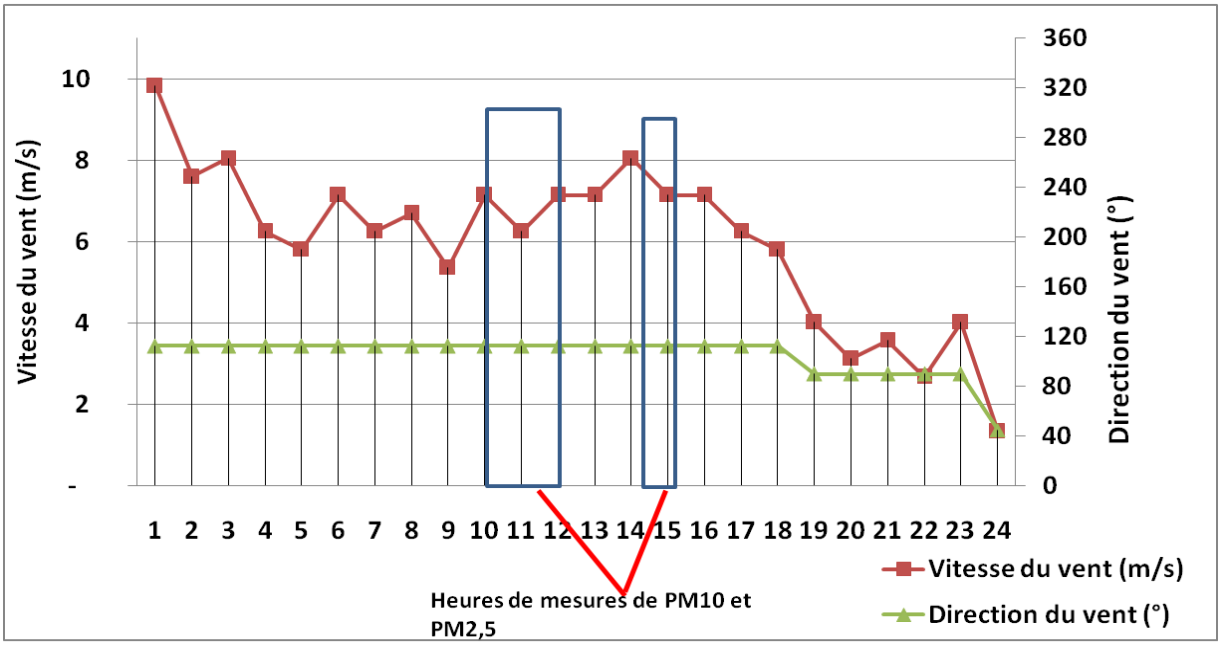


Figure 1. Vitesse et direction du vent le 22/01/2020 (INM, 2020)

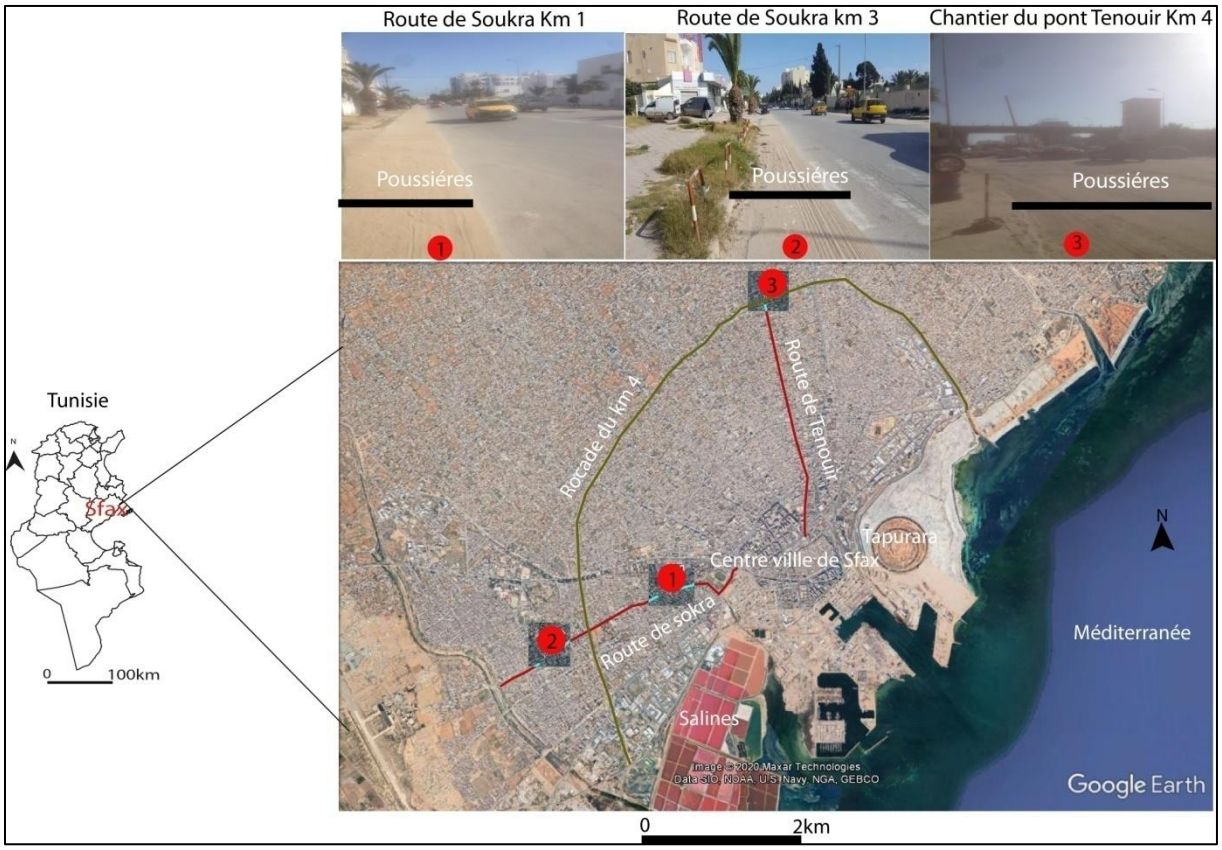


Figure 2. Localisation des campagnes de mesures de la pollution de l'air (PM_{10} et $PM_{2,5}$) dans l'agglomération de Sfax. (Source image : Google Earth, 2020)

2. Campagnes de mesures des particules fines au bord d'une route le 22/01/2020 entre 10 h et 12 h

Les niveaux des particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$), soulevés par le trafic routier à proximité des trottoirs sur les accotements recouverts de couches sableuses fines, sont inégalement

répartis aux sites de mesures retenus. En effet, dans le premier point de mesure, situé sur la route de Soukra à 1 km du centre-ville, les concentrations moyennes de PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont respectivement de l'ordre de 49 et 25 µg/m^3 (moyenne des 120 mesures, soit une prise de mesure toutes les 30 secondes entre 10 et 12 h - Fig.3B) alors qu'elles atteignent 58 µg/m^3 et 31 µg/m^3 au deuxième point. Dans ce dernier, les valeurs sont plus dispersées. En effet, l'étendu atteint 587 µg/m^3 pour les PM_{10} et 217 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$ contre 145 µg/m^3 et 85 µg/m^3 au premier point (Fig.3B). Les valeurs maximales élevées au deuxième point s'expliquent par la quantité plus abondante des poussières, déposées sur les accotements. Les écarts interquartiles, tout comme le taux des valeurs au-dessus du percentile 90, sont légèrement plus élevés au deuxième point. En effet, le percentile 90 de la série des 240 mesures de pollution particulaire (l'ensemble des mesures sur les deux sites) correspond à 86 µg/m^3 pour les PM_{10} et 44 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$. Ils sont dépassés dans 12% des cas au deuxième point contre 8% au premier. Ces dépassements sont liés principalement à une densification de la circulation routière. Cette situation s'est traduite par la multiplication des coups de voulant, succédés souvent par plusieurs freins secs soulevant les poussières qui ensevelissent la chaussée. Quant aux concentrations restantes de PM_{10} et $PM_{2,5}$, dont les concentrations sont inférieures aux percentiles 90, elles ont été observées par circulation routière de faible débit, à moins de 250 véhicules par heure. De plus, ils s'associent au fait que certains véhicules roulent, de manière appropriée, sur le tronçon revêtu de la route évitant la chaussée, envahie par des poussières dont la granulométrie est très fine.

Dans le deuxième site, distant d'environ 2 km du premier, la pollution particulaire au niveau de ce site est parue plus intense que celle révélée dans le premier site car les concentrations moyennes des deux polluants mesurées sont plus importantes. Ces niveaux moyens de PM_{10} et $PM_{2,5}$ sont respectivement de 58,23 µg/m^3 et 31,98 µg/m^3 (Fig.3A). De plus, dans ce site, les dépassements des percentiles 90 sont moyennement plus élevés (soit une part relative de 14% pour le cas des deux polluants). Notons que les variations des concentrations de particules fines et ultrafines, enregistrées dans ce site, sont liées aux mêmes facteurs, présentés pour le cas du premier point de mesure. De surcroit, les fortes concentrations de particules fines PM_{10}, comprises entre 100 µg/m^3 et 609 µg/m^3 (17/240 observations pour les deux sites de mesures), correspondent aux passages de véhicules lourds (bus et camion). De même, certaines voitures, roulant à une vitesse relativement élevée à proximité du trottoir, soulèvent les poussières sur les accotements. Quant aux $PM_{2,5}$, la concentration la plus élevée a atteint 230 µg/m^3. Elle s'explique par les mêmes facteurs qui sont décrits précédemment.

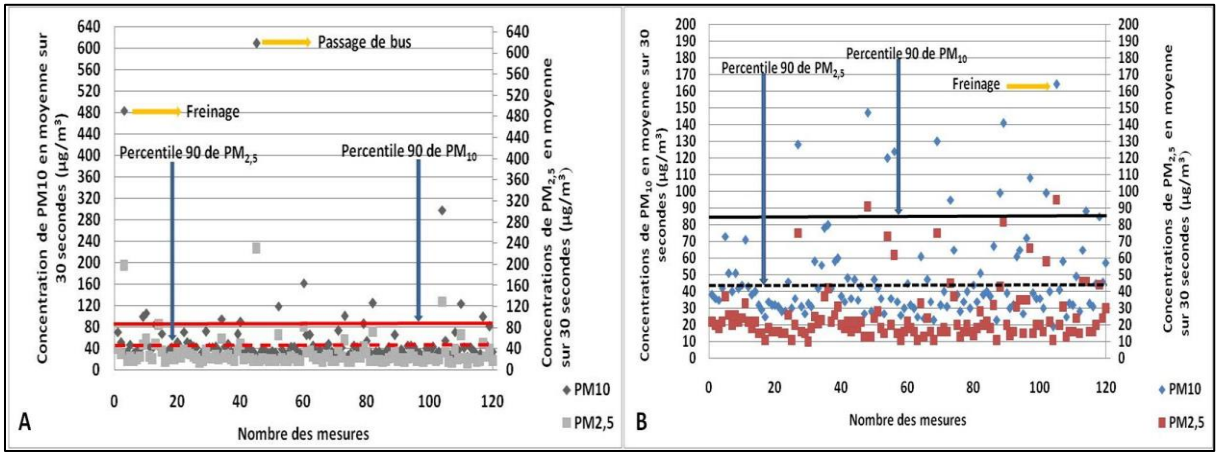


Figure 3. Concentrations de PM_{10} et $PM_{2,5}$, mesurées au niveau des deux points sur le trottoir bordant la route de Soukra au sud-ouest du centre-ville ; (A) et (B) (données personnelles enregistrées par des capteurs de PM_{10} et $PM_{2,5}$ de type PCE-MPC-10le 22/01/2020 entre 10 h et 12 h)

3. Campagnes de mesures des particules fines (PM_{10} et $PM_{2,5}$) à proximité d'un chantier de travaux publics

Le chantier retenu comme exemple est situé au niveau du croisement de la route Teniour et la rocade km 4. Il s'agit de la construction d'un pont d'étagement. Dans ce site, les mesures des particules fines et ultrafines, réalisées dans l'après-midi du 22/01/2020 entre 14h30 et 15 h, montrent de très fortes teneures de pollution particulaire. Elles atteignent 320 µg/m^3 pour les PM_{10} et 116 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$ sur 60 enregistrements pour un intervalle de 30 seconds (Fig.4). De surcroit, des niveaux élevés de particules pouvant atteindre 728 µg/m^3 pour les PM_{10} et 378 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$ ont été enregistrés quand les véhicules lourds (camion et bus) passent par la voie non-revêtue à proximité du chantier (Fig.4). Nous avons observé d'importante quantité de poussières soulevées dans l'air, générées simultanément par le trafic routier et les travaux du chantier. Dans les deux premiers points de mesure, le percentile 90 de la série des 240 mesures de pollution particulaire correspond à une valeur de 86 µg/m^3 pour les PM_{10} et 44 µg/m^3 pour les $PM_{2,5}$. Près du chantier (3èmepoint), les percentiles 90, constatés pour les deux premiers points bordant la route de Soukra, sont dépassés dans 92 % des cas pour les PM_{10} et dans 85% des cas pour les $PM_{2,5}$ (Fig.4).

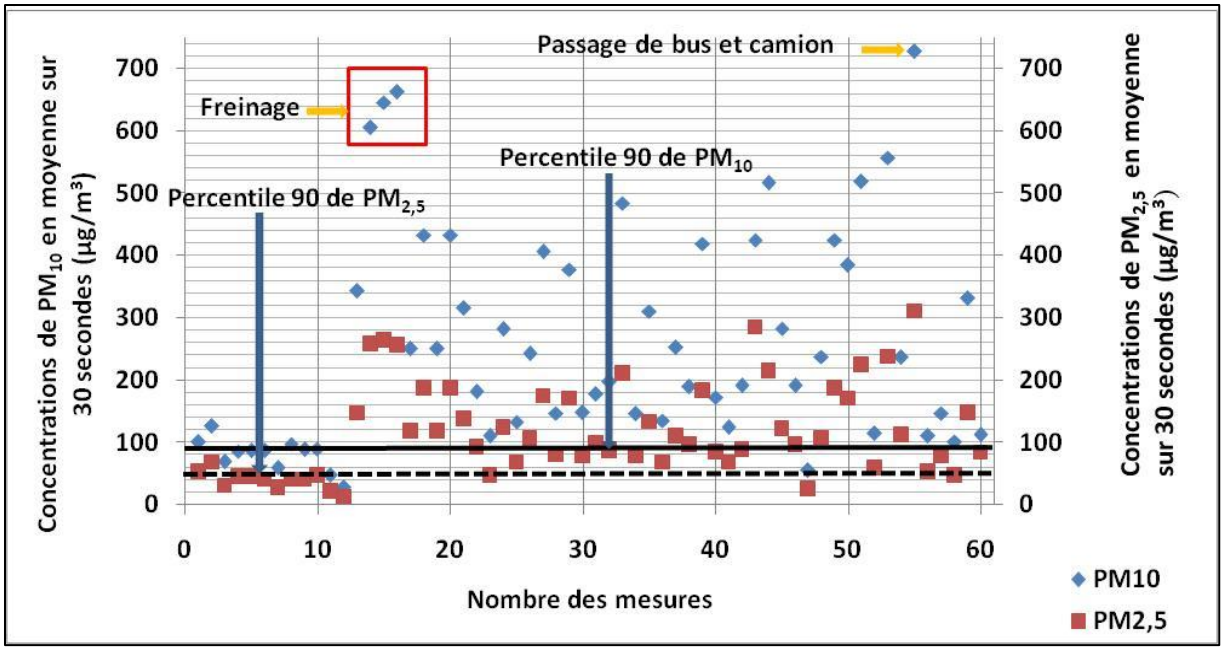


Figure 4. Concentrations de PM_{10} et $PM_{2,5}$, enregistrées à proximité du chantier des travaux de construction du pont d'étagement au niveau du croisement de la route Tenouir et la rocade du km4 (données personnelles enregistrées le 22/01/2020 par un capteur de type PCE-MPC-10 entre 14h30 et 15 h)

L'effet conjugué du trafic routier et des travaux du chantier, soulevant les poussières, explique ces concentrations relativement élevées. De plus, des concentrations élevées de particules fines, comprises entre 400 µg/m^3 et 500 µg/m^3, ont été observées parallèlement à l'augmentation, de manière brusque, de vitesse de plusieurs véhicules pour faire dépasser très vite le croisement avant ceux qui viennent du coté droite ou gauche. D'autres niveaux élevés de particules fines et ultrafines, dont les concentrations en moyenne sur 30 secondes dépassent 500 µg/m^3, s'associent au fait que certains taxis et bus, roulant à vitesse élevée, s'arrêtent, après avoir freiné sèchement sur la voie non-revêtue, près du chantier pour faire monter et descendre des clients. Un vent modéré, soufflant du SE à une vitesse de 7 m/s, est relevé entre 14h30 et 15 h, soit la même vitesse que celle enregistrée pendant les mesures 1 et 2, réalisées entre 10 h et 12 h. Le trafic routier est fluide avec environ 500 véhicules par heure pendant les deux séquences de mesures.

Conclusion

Dans cette étude, d'après les campagnes de mesures semi-itinérantes, les poussières fines, soulevées aux trois sites, choisis révèlent des teneurs élevées en PM_{10} et $PM_{2,5}$. Au niveau des deux premiers sites, à proximité des trottoirs de la voie routière de Soukra, les niveaux de PM_{10} et $PM_{2,5}$ demeurent moins élevés que ceux enregistrés au troisième site, correspondant au chantier d'un pont d'étagement où l'effet du trafic routier s'ajoute aux travaux de réalisation du pont.

Le travail présenté, ici, est à détailler davantage dans les prochaines études car les résultats obtenus sont ponctuels (dans le temps et dans l'espace). D'ailleurs, des mesures étalées sur plusieurs jours permettraient de comparer les résultats aux normes quotidiennes, préconisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Dans des travaux ultérieurs, nous développerons ces mesures en multipliant les points de mesures et comparant les résultats à des travaux, réalisés après la pluie. Il parait intéressant d'étudier des éléments de vulnérabilité de la population, exposée aux particules fines et ultrafines, habitant ou travaillant près des axes routiers.

Bibliographie

Dahech S., 2007. *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, France, 309p.

Euchi H. & Dahech S., 2019. Temps, pollution aux particules fines (PM_{10}) et morbidité respiratoire à Sfax (Tunisie). *Pollution atmosphérique*, 239p.

Host S., 2012. Exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier et risques sanitaires. *VertigO- la revue électronique en sciences de l'environnement* [Online], Hors-série 15, 321-330.

Michelot N., 2014. *L'influence des topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le sud-ouest des Alpes-Maritimes.* Thèse de doctorat de doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, France, 416p.

Yang I.V., & Schwartz D.A., 2012. Epigenetic mechanisms and the development of asthma. *J. Allergy Clin Immunol*, 130 (6), 1243-1255.

Webographie

INS. http://www.ins.nat.tn consulté le 15 novembre 2019

OMS. http://www.who.int/fr consulté le 15 novembre 2019

https://www.santepubliquefrance.fr consulté le 15 novembre 2019

NOTES DE SUIVI DU CYCLE PHENOLOGIQUE DU PALMIER DATTIER VIS-A-VIS LES NOUVELLES CONDITIONS CLIMATIQUES (CAS DE LA REGION DES ZIBAN)

FACI M.[1,2], BENZIOUCHE S.E.[1], ROUMANI M.[2], BERREDJOUH D.[2], KHARFALLAH N.[2], AZZOUZ R.[2]

1 Laboratoire Diversité des Ecosystèmes et Dynamiques des Systèmes de Production Agricoles en Zones Arides, Département des Sciences Agronomiques, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (fm_alg@yahoo.fr)
2 Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Biskra, Algérie

Résumé : *Le but de notre contribution est de suivre le cycle phénologique de Deglet Nour dans la région des Ziban (sud-est d'Alger), connue par la production de ce cultivar, et considérée comme premier producteur de dattes en Algérie. Le suivi durant deux années (2016 et 2017), nous a permis de confirmer, dans les zones d'étude (Mili et Sidi Okba), l'avancement de la date d'apparition des spathes (inflorescences) du palmier dattier. Les conditions climatiques influent directement sur le cycle phénologique du palmier dattier et sur la production en dattes. Une température de l'air adéquate favorise le bon développement végétatif et l'obtention de meilleures productions (en quantité et en qualité). Par contre, les taux élevés d'humidité de l'air et des précipitations provoquent l'apparition des fruits parthenocarpiques et des maladies, qui détériore la production de dattes.*

Mots clés : *Ziban ; cycle phénologique ; palmier dattier ; climat*

Summary: ***Monitoring notes of the phenological cycle of the date palm in relation to the new climatic conditions (case of the Ziban region).*** *During the last years, we observed that the appearance of date palm inflorescences has advanced. An increase in temperatures during the coming years, following global warming, could have a significant impact on the phenological cycle of the date palm. The objective of this contribution is to observe the phenological cycle of Deglet Nour in the Ziban region (south-east Algeria). The notes recorded within two years (2016 and 2017) allowed us to confirm, that in the study areas (Mlili and Sidi Okba), there is an advancement in the period of appearance of inflorescences. The climatic conditions have a directly influence on the phenological cycle of the date palm and on dates production. An adequate air temperature promotes a better vegetative development and a best yield (quantity and quality). On the other hand, a high rate of air humidity and an intense rain causing the development of parthenocarpic fruits and the diseases, which degrades the date production.*

Key words: *Ziban; phenological cycle; date palm; climate change*

Introduction

L'Algérie, possède un patrimoine phœnicicole qui dépasse largement les 18 millions de palmiers dattiers et une production de plus de 700 milles tonne par an, produite par 952 cultivars répartie sur plusieurs régions du sud du pays (Bougoudoura *et al.*, 2015), dont les 3/4 du terroir phœnicicole se localisent au nord-est du Sahara algérien (Tamra, 2001 *in* Bakour, 2003). Néanmoins, le rendement par palmier reste faible en raison de plusieurs contraintes, notamment celles liées au changement climatique (Benziouche, 2012). En effet, l'hypothèse d'un dérèglement climatique majeur, est maintenant établie avec une certitude (90 %) (OMM, 2008).

Située dans une zone de transition, entre les régimes tempérés et subtropicaux, l'Algérie présente une grande sensibilité au climat. Elle est exposée aux phénomènes extrêmes comme les inondations catastrophiques et les sècheresses prolongées (Derkaoui, 2012). Récemment, elle a connu une augmentation du nombre des journées de fortes températures et des vagues de chaleur (Faci *et al.*, 2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b, 2018c).

L'impact du climat sur l'agriculture est une donnée non discutable. Le fait probable d'une augmentation des températures durant les années avenir, suite au changement climatique, pourrait avoir un impact significatif sur le développement végétatif des plantes.

Notre modeste contribution vise à suivre le cycle phénologique du palmier dattier (*Pheonix dactylifera* L.). Dans une première phase, pour définir un calendrier aux cultivars les plus

commercialisés. Dans une deuxième phase, durant les années avenirs, l'étude des probabilités de changement du cycle phénologique, suite aux impacts du changement climatique.

1. Données et Méthodes

1.1. Palmier dattier

Le palmier dattier (*Pheonix dactylifera* L.) appartient à la famille des Arecaceae (syn. Palmaceae) et le genre Phoenix contient 12 espèces. Dactylifera est l'espèce la plus importante en termes de valeur commerciale et d'utilisation alimentaire humaine.

1.2. Région d'étude

Le Ziban se trouve au sud-est de l'Algérie, au pied sud de la chaîne de montagnes de l'Atlas saharien (Fig.1). Ce site lui vaut la connotation "La porte du désert" et a permis à la région de jouer à travers les différentes périodes de son existence un rôle de rencontre, d'échange et de transition entre un nord bien équipé et un sud déshérité (ANAT, 2003).

Nous avons choisi deux zones pour l'observation des stades phénologiques :

- La palmeraie de Mlili (34° 39' N, 5° 33' E), à environ 45 km au sud-ouest du chef-lieu de la wilaya (département) de Biskra, capitale de la région des Ziban.

- La palmeraie de Sidi Okba (34° 45' N, 5° 53' E), environ 18 km au sud-est de Biskra.

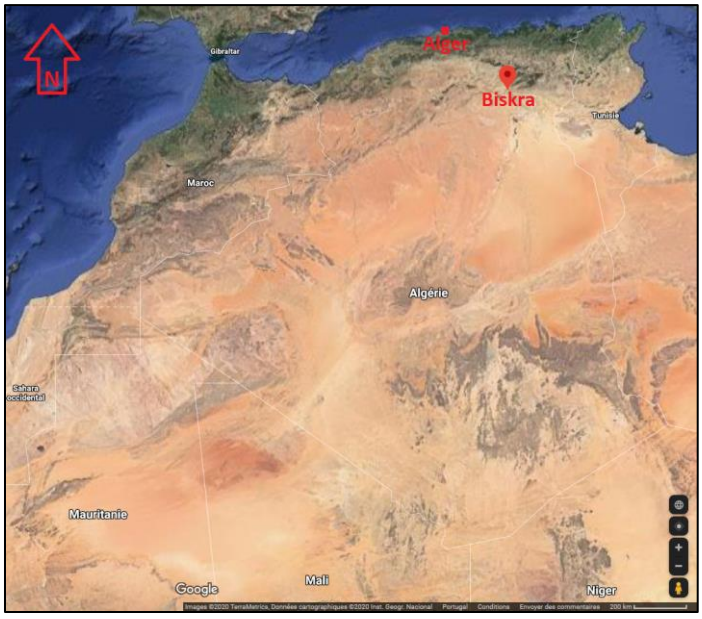


Figure 1. Localisation de la région des Ziban.

1.3. Données climatiques

Selon Toutain (1967), Les facteurs limitant de la culture du palmier dattier sont : une température élevée, une absence presque totale de pluies et un degré hygrométrique faible. De ce fait, nous avons utilisé les données climatiques de l'Office National de Météorologie (ONM, 2017), à savoir les données de la température de l'air, les précipitations et l'humidité de l'air.

1.4. Suivi du cycle phénologique

Nous avons enregistré les dates des différents stades du cycle phénologique du cultivar 'Deglet Nour' :

- L'apparition des spathes (mâles et femelles),
- L'ouverture des spathes,
- La pollinisation,
- La maturité des dattes.
- Le suivi hebdomadaire s'est étalé sur deux années (2016 et 2017).

2. Résultats

2.1. Cycle phénologique

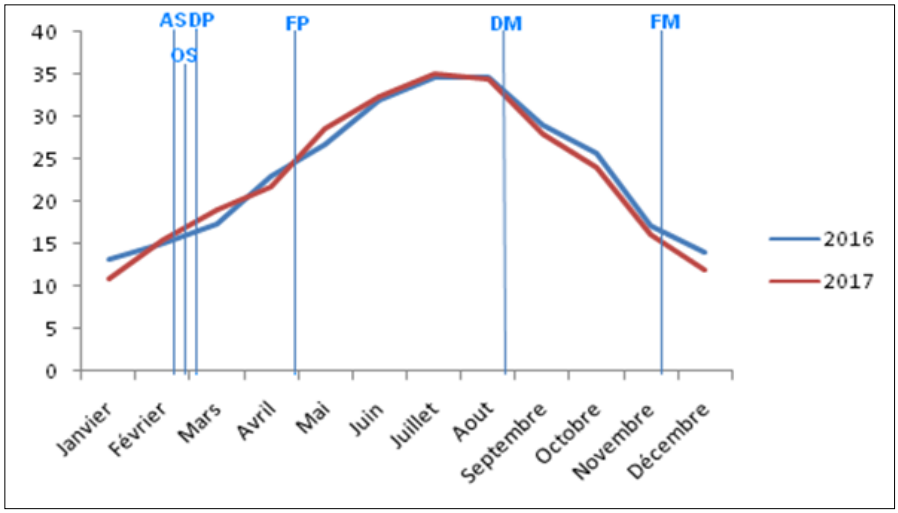
Le calendrier du cycle phénologique, durant les deux (02) années d'observation, été comme suit :

- Troisième décade du mois de février : apparition des spathes.
- Quatrième semaine du mois de février : ouverture des spathes.
- Première semaine du mois de mars : début de l'opération de pollinisation.
- Fin d'avril : achèvement de la pollinisation.
- Fin du mois d'août : début de la maturité des premières dattes.
- Début de la dernière décade du mois de novembre : maturité complète des fruits (tardifs).

2.2. Température de l'air

La température de l'air est un facteur indispensable pour le développement végétatif du palmier dattier ; l'apparition des premières spathes (mâles et femelles), de Deglet Nour, ne commence qu'après que la température moyenne dépasse 15°C (Fig.2).

Alors que l'enregistrement du début de la maturité des premières dattes est observé juste après les fortes températures enregistrées durant les deux (02) mois les plus chauds de l'année, juillet et août.

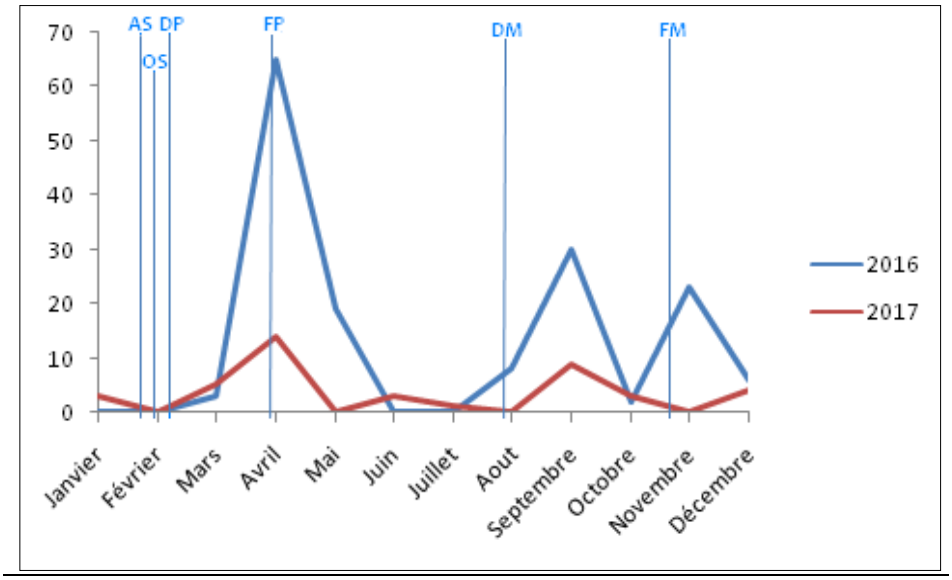


AS : apparition des spathes / OS : ouverture des spathes : DP : début de pollinisation / FP : fin de pollinisation / DM : début de maturité / FM : fin de maturité.

Figure 2. Relation entre la température de l'aire (en °C) et le cycle phénologique de Deglet Nour.

2.3. Précipitations

En 2017, les précipitations ont été faibles (42 mm) par rapport à 2016 (Fig.3), où nous avons enregistré 156 mm, avec un pic de 65 mm en mois d'avril. Ces importantes pluies ont poussé le développement d'une quantité de fruits parthenocarpiques (non fécondés), appelés au niveau local 'Siche'. En plus, les pluies enregistrées durant le mois de septembre de la même année (30 mm), ont favorisées le pourrissement d'une quantité de dattes, dite Khamaj.

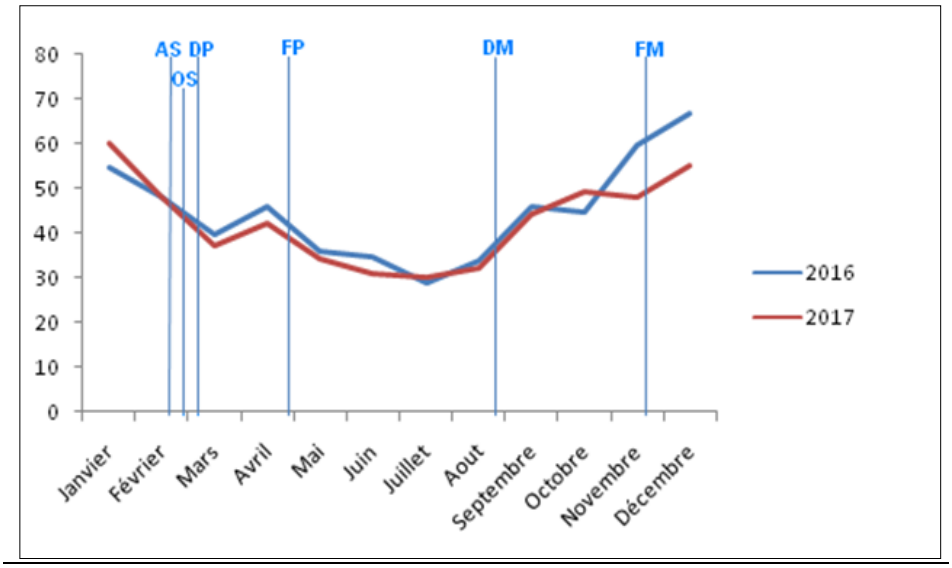


AS : apparition des spathes / OS : ouverture des spathes : DP : début de pollinisation / FP : fin de pollinisation / DM : début de maturité / FM : fin de maturité.

Figure 3. Relation entre les précipitations (en mm) et le cycle phénologique de Deglet Nour.

2.4. Humidité de l'air

L'humidité de l'air est inférieure à 50 % durant la période février-octobre. Elle dépasse ce seuil durant la période novembre-janvier, qui coïncide avec la période de repos végétatif de palmier dattier (Fig.4).



AS : apparition des spathes / OS : ouverture des spathes : DP : début de pollinisation / FP : fin de pollinisation / DM : début de maturité / FM : fin de maturité.

Figure 4. Relation entre l'humidité de l'air (%) et le cycle phénologique de Deglet Nour.

Conclusions et Discussion

Le début de l'apparition des spathes (mâles et femelles), durant les deux années d'observation 2016-2017, été en troisième décade du mois de février. Alors que le début de la maturation commence durant la dernière semaine du mois d'août. Dans les zones d'étude (Sidi Okba et Mlili), le cycle végétatif de la Deglet Nour a connu un avancement de deux semaines, par rapport aux notes de Belguedj en 2002.

La température est un facteur essentiel pour les activités biologiques du palmier dattier, sont augmentation pourra influer directement sur le cycle phénologique et sur la production du dattier, en quantité et en qualité.

Le cultivar Deglet Nour, dans la région des Ziban, est influencé par la température de l'air, que ce soit pour le développement végétatif (développement des spathes) ou pour le développement des dattes (maturité).

Il a besoin de faibles taux d'humidité de l'air et de faibles précipitations, en cumuls totaux et en intensités. Au moment de floraison, les précipitations favorisent la pourriture des spathes, produisant ensuite des fruits parthenocarpiques, qui tombent avant d'arrivés au stade de maturité, alors que les dattes qui peuvent arriver à ce stade, auront de petits calibres et asséchés. Les précipitations intenses durant les stades du développement des fruits et le stade de maturité, provoquent soit la chute ou la pourriture des fruits. En général, les précipitations abondantes et les taux élevés d'humidité de l'air incitent l'apparition des maladies.

Bibliographie

Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire (ANAT)., 2003. Schéma directeur des ressources en eau dans la wilaya de Biskra. Rapport de Synthèse, 100p.

Bakour S., 2003. *Etude des dysfonctionnements de certains périmètres phœnicicoles dans la cuvette de Ouargla : Cas des palmeraies traditionnelles de la commune de Ouargla*. Mémoire d'Ingénieur, Université de Ouargla, Ouargla, Algérie, 137p.

Belguedj M., 2002. Les ressources génétiques du palmier dattier : caractéristiques des cultivars de dattier dans les palmeraies du Sud-Est Algérien. *Revue Annuelle INRAA*, 289p.

Benziouche S.E., 2012. *Analyse de la filière dattes en Algérie ; constats et perspectives de développement. Cas de la daïra de Tolga*. Thèse de doctorat, ENSA, Alger, Algérie, 470p.

Bouguedoura N., Bennaceur M., Babahani S., & Benziouche S.E., 2015. Date palm status and perspective in Algeria. *Date palm genetic resources, cultivar assessment, cultivation practices and novel products*. Johnson, Springer, 125-168.

Derkaoui I., 2012. *Impact des paramètres météorologiques sur la mortalité globale à Oran en 2009.* Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie, 62p.

Faci M., Matari A., Oubadi M., Boudjemline F., & Farhi Y., 2016. Analyse des journées de forte chaleur à l'ouest Algérien. *Journal Algérien des Régions Arides*, Numéro Spécial, 21-27.

Faci M., Matari A., Oubadi M., & Farhi Y., 2016. Analyse des journées de forte chaleur en Algérie. Actes du 29[e] Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 261-266.

Faci M., & Matari A., 2017. Contribution à l'étude des canicules en Algérie (cas d'Oran et de Béchar). *International Journal of Innovative Technical and Applied Sciences*, 1(1), 01-12.

Faci M., Oubadi M., Matari A., & Farhi Y., 2018. Analyse des journées caniculaires au Sahara algérien. *Revue des Régions Arides*, *44*(1), 37-42.

Faci M., 2018. Evolution du nombre et de la durée de l'apparition des canicules en Algérie. *Actes du 31[e] colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Nice, France, 4-7 juillet 2018, 80-85.

Faci M., Oubadi M., Matari A., & Farhi Y., 2018. Heat waves in Algeria: A potential risk. *International Journal of Innovative Technical and Applied Sciences*, *2*(1), 13-21.

Lescarmontier L., Guilyardi E., Matthews R., Pen Point S., Bhai Rumjaun A., Schlüpmann J., & Wilgenbus D., 2019. Rapport Spécial du GIEC « Réchauffement à 1,5°C » - Résumé à destination des enseignants. France, Office for Climate Education, 24p.

Office National de la Météorologie (ONM), 2017. Résumé annuel du temps en Algérie. Alger, Algérie, 98p.

Organisation Météorologique Mondiale (OMM) 2008. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2007. Genève, Suisse, 16p.

Toutain G., 1967. Le palmier dattier. Culture et production. *Al Awamia*, 25, 83-151.

ÉVOLUTION DE LA FRÉQUENCE DES PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES ABONDANTES EN SUISSE DE 1900 A 2019

FALLOT J.-M., FLORANCE V.

Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Lausanne, Suisse (Jean-Michel.Fallot@unil.ch)

Résumé : *L'étude des séries pluviométriques faite pour 233 stations en Suisse révèle que le nombre de jours avec de fortes précipitations (> 50 mm/jour) a passablement fluctué depuis 1900, mais qu'il a légèrement augmenté de 1900 à 1980 dans ce pays. Les 6 situations météorologiques ayant le plus souvent provoqué de fortes précipitations ont pu être identifiées dans les différentes régions de Suisse à partir de la classification de Hess-Brezowsky disponible depuis 1881.*

Mots clés : *fortes précipitations ; situations météorologiques ; classification de Hess-Brezowsky ; Suisse*

Summary: ***Change in the frequency of heavy daily precipitation in Switzerland from 1900 to 2019***. *The study of precipitation time-series carried out for 233 stations in Switzerland shows different variations in the number of days with strong precipitation (> 50 mm/day) since 1900, but with a light increasing from 1900 to 1980. The 6 meteorological situations which are the most frequently associated with strong precipitation could be identified in the different swiss regions from Hess-Brezowsky classification available since 1881.*

Key words: *strong precipitation; meteorological situations; Hess-Brezowsky classification; Switzerland*

Introduction

Plusieurs études ont montré que le réchauffement du climat s'accompagne d'une hausse de l'intensité moyenne et de la fréquence des fortes précipitations dans plusieurs régions du globe depuis le milieu du 20[ème] siècle (IPCC, 2013). La fréquence des fortes précipitations avec plus de 50 mm en 24 heures a également augmenté en Suisse de 1973 à 2000 au Nord et dans les Alpes (Fallot, 2000). Mais cette étude avait uniquement comptabilisé le nombre d'épisodes où les précipitations avaient dépassé ce seuil de 50 mm par jour dans une région donnée sans tenir compte du nombre de stations où de tels dépassements s'étaient produits. Or, un épisode avec plus de 50 mm de pluie en 24 heures mesurés par plusieurs stations dans une région aura davantage d'impacts au niveau des crues et des autres dangers naturels que si ce seuil n'est dépassé que par une seule station.

D'autre part, MétéoSuisse a mis à disposition les séries de mesures pluviométriques pour 100 stations supplémentaires de 1900 à 2019 par rapport aux 133 stations considérées dans cette étude précédente (Fallot, 2000). Pour ces diverses raisons, nous avons réactualisé cette étude jusqu'en 2019 en considérant 233 stations depuis l'an 1900 et en pondérant la fréquence des épisodes avec plus de 50 mm de pluie en 24 heures en fonction du nombre de stations où ce seuil était dépassé, afin de voir si on retrouve les mêmes tendances que celles mises en évidence précédemment pour de tels épisodes en Suisse (Fallot, 2000).

1. Données et méthodes

La figure 1 permet de localiser les 233 stations mesurant les précipitations tous les jours depuis 1900 en Suisse. Pour cette étude, le territoire national a été subdivisé en 8 grandes régions en fonction de leur régime pluviométrique moyen, à savoir : le Jura, le Plateau occidental, le Plateau oriental, les Préalpes occidentales, les Préalpes orientales, le Valais, les Grisons et le versant Sud des Alpes. Cette régionalisation s'inspire de celle établie par Baeriswyl sur la base d'une analyse en composantes principales appliquée aux moyennes mensuelles des précipitations sur une période de 30 ans (Baeriswyl, 1995).

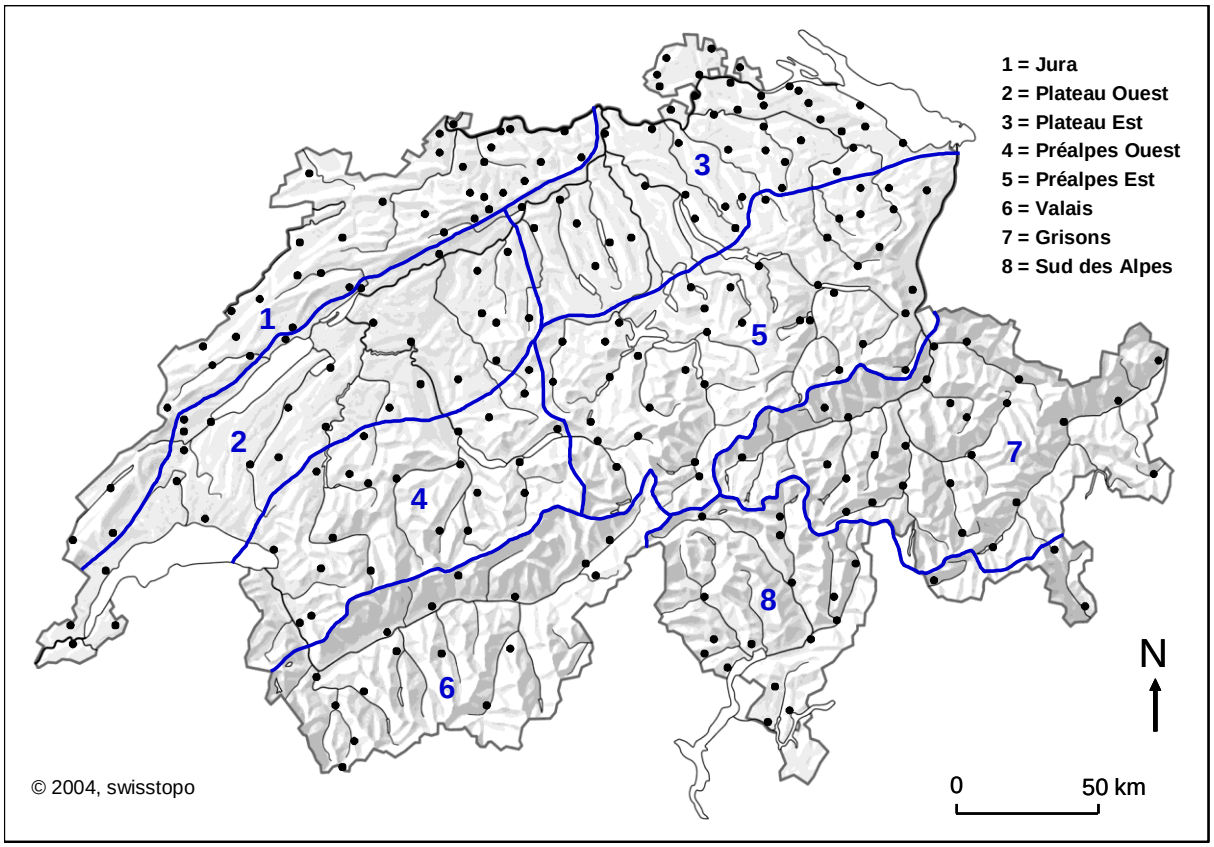


Figure 1. Localisation des stations pluviométriques en Suisse en service de 1900 à 2019

Pour chaque région, nous avons considéré comme jour avec de fortes précipitations dès qu'une hauteur d'eau de 50 mm ou plus en 24 heures était mesurée à au moins une station de la région. Cette valeur de 50 mm est assez arbitraire, mais il fallait qu'elle soit suffisamment élevée pour ne pas englober trop de jours avec des orages locaux. D'autre part, une valeur plus élevée aurait abouti à un nombre de jours par an trop petit au Nord des Alpes pour détecter des tendances depuis 1900. Ces jours ont ensuite été pondérés en fonction du nombre de stations où ce seuil a été dépassé dans une région donnée. Puis les nombres de jours ainsi pondérés ont été sommés pour chaque année de 1900 à 2019, cela pour chaque région et pour l'ensemble de la Suisse.

Nous avons ensuite identifié les situations météorologiques typiques à l'origine des fortes précipitations mesurées dans les différentes régions de Suisse. Pour cela, nous avons utilisé la classification de Hess-Brezowsky valable pour l'Allemagne et effectuée tous les jours par l'Institut de Potsdam pour la recherche sur le climat (PIK) depuis 1881 jusqu'en 2009, puis par le service météorologique allemand (Deutscher Wetterdienst) de 2010 à 2019. Cette classification permet aussi de déterminer efficacement les types de temps en Suisse (Fallot, 2000) et en France (Planchon *et al.*, 2009).

La classification de Hess-Brezowsky distingue 30 situations météorologiques typiques pour le temps en Europe centrale (Tab.1) qui sont décrites en détail dans un rapport de l'Institut de Potsdam pour la recherche sur le climat (Werner et Gerstengarbe, 2010). Cette classification se base essentiellement sur la position des grands centres d'action influençant le temps en Allemagne, ainsi que sur la direction générale des flux sur l'Europe centrale. On distingue ainsi des situations avec une circulation d'Ouest, du Sud-Ouest, du Sud, du Sud-Est, du Nord-Ouest, du Nord ou du Nord-Est balayant une bonne partie de l'Europe et de l'Atlantique Nord. Pour d'autres situations, le temps et la circulation atmosphérique sont déterminés par un anticyclone, une dépression ou un thalweg.

Pour une bonne partie de ces situations, on distingue une version anticyclonique avec des pressions élevées sur l'Europe centrale, et une version cyclonique avec des pressions plus basses. Pour les 120 années disponibles, nous avons calculé les fréquences d'apparition de chaque situation ayant généré des précipitations supérieures à 50 mm en 24 heures, cela pour chaque région de Suisse et pour l'ensemble du pays.

Tableau 1. Classification des situations météorologiques selon Hess-Brezowsky

Désignation de la situation météorologique Hess-Brezowsky	Abrév.	Groupe
Situation d'Ouest, anticyclonique	WA	
Situation d'Ouest, cyclonique	WZ	Situations
Situation d'Ouest méridionale	WS	d'Ouest
Situation d'Ouest « formant un angle »	WW	
Situation du Sud-Ouest, anticyclonique	SWA	
Situation du Sud-Ouest, cyclonique	SWZ	
Situation du Sud, anticyclonique	SA	Situations du
Situation du Sud, cyclonique	SZ	Sud-Ouest,
Dépression sur les Iles Britanniques	TB	du Sud et
Thalweg sur l'Europe occidentale	TRW	du Sud-Est
Situation du Sud-Est, anticyclonique	SEA	
Situation du Sud-Est, cyclonique	SEZ	
Situation du Nord-Ouest, anticyclonique	NWA	
Situation du Nord-Ouest, cyclonique	NWZ	
Situation du Nord, anticyclonique	NA	Situations du
Situation du Nord, cyclonique	NZ	Nord-Ouest
Anticyclone sur Mer du Nord – Islande, anticyclonique	HNA	et du Nord
Anticyclone sur Mer du Nord – Islande, cyclonique	HNZ	
Anticyclone sur les Iles Britanniques	HB	
Thalweg sur l'Europe centrale	TRM	
Situation du Nord-Est, anticyclonique	NEA	
Situation du Nord-Est, cyclonique	NEZ	Situations du
Anticyclone sur Scandinavie, anticyclonique	HFA	Nord-Est
Anticyclone sur Scandinavie, cyclonique	HFZ	et d'Est
Anticyclone sur Mer du Nord - Scandinavie, anticyclonique	HNFA	
Anticyclone sur Mer du Nord - Scandinavie, cyclonique	HNFZ	
Anticyclone sur l'Europe centrale	HM	Centre d'action
Pont de haute pression sur l'Europe centrale	BM	sur l'Europe
Dépression sur l'Europe centrale	TM	Centrale

Dans la colonne abrév. (= abréviation), les situations cycloniques de Hess-Brezowsky sont en grisé et les situations anticycloniques en blanc

2. Résultats

La figure 2 illustre l'évolution du nombre de jours par an avec de fortes précipitations de 1900 à 2019 pour l'ensemble de la Suisse, le Nord des Alpes et les Alpes (= régions 1 à 7) et le Sud des Alpes (région 8). Les nombres illustrés ici correspondent à la fréquence moyenne des épisodes avec plus de 50 mm de pluie en 24 heures sur l'ensemble de ces régions qu'on peut rencontrer chaque année à un endroit donné. Le Sud des Alpes se signale par une fréquence nettement plus grande de ces épisodes que le reste de la Suisse, car il est très exposé aux afflux d'air chaud et humide de la Méditerranée. Les Préalpes et les Alpes (Valais, Grisons) enregistrent un peu plus souvent des épisodes avec de fortes précipitations que les valeurs moyennes calculées pour l'ensemble du Nord des Alpes et des Alpes, alors qu'on observe l'inverse sur le Plateau et le Jura.

La figure 2 montre que les nombres de jours par an avec des fortes précipitations fluctuent assez fortement durant le 20ème siècle, notamment au Sud des Alpes, mais qu'ils ont légèrement augmenté sur l'ensemble du pays de 1900 à 1980, avant de se stabiliser entre l'an 1980 et 2000, puis de diminuer après l'an 2000. Ces tendances diffèrent sensiblement de celles mises en évidence par l'étude de l'an 2000 qui avait révélé une hausse sensible de la fréquence des fortes précipitations au Nord des Alpes et dans les Alpes de 1973 à 2000 (Fallot, 2000). Mais cette étude n'avait pas pondéré la fréquence de ces épisodes avec les nombres de stations ayant mesuré plus de 50 mm de précipitations pour une région donnée.

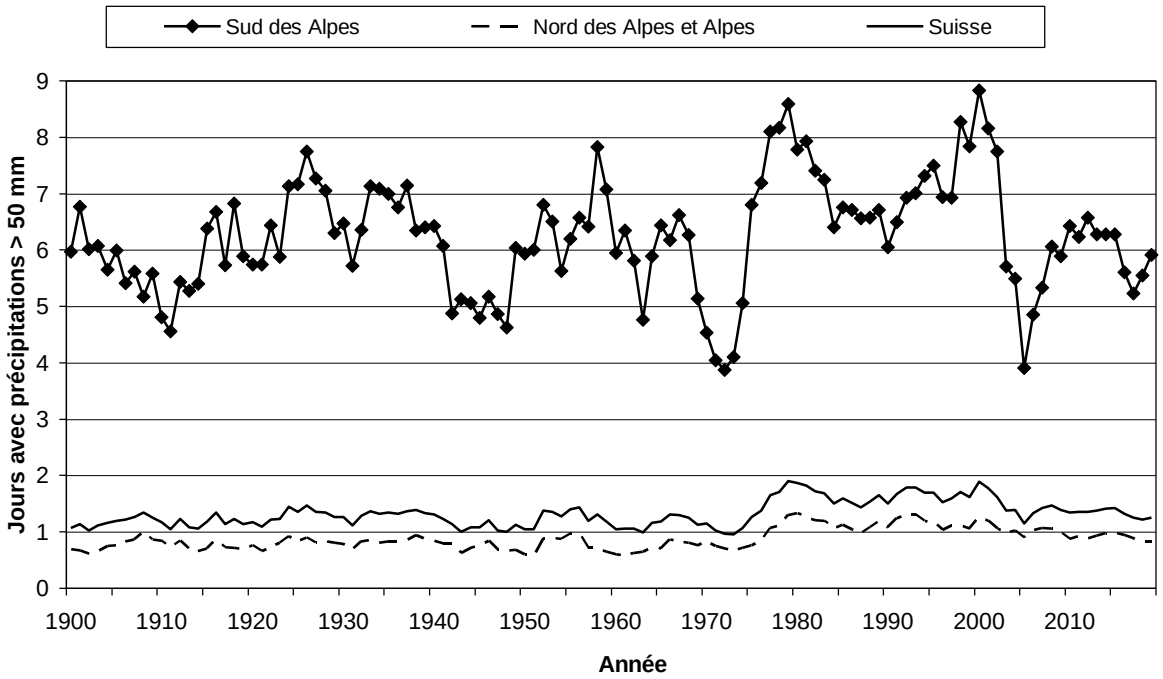


Figure 2. Nombre de jours par an avec de fortes précipitations (>50 mm en 24 heures) en Suisse de 1900 à 2019 : moyennes mobiles sur 5 ans

Le tableau 2 présente les fréquences d'apparition en % des 6 situations météorologiques de Hess-Brezowsky (HB) ayant le plus souvent provoqué de fortes précipitations pour chaque région de Suisse, avec en bas le total cumulé pour ces 6 situations. La valeur de 100% se réfère ici au total de jours avec de fortes précipitations mesurés de 1900 à 2019 pour toutes les situations météorologiques dans chaque région.

Les 30 situations météorologiques de Hess-Brezowsky, y compris les plus anticycloniques, ont provoqué des précipitations abondantes en Suisse durant la période 1900-2019 pour des raisons évoquées dans Fallot (2000). 6 situations cycloniques apparaissent toutefois souvent dans le tableau 2 dans les différentes régions du pays. Ainsi, la situation d'Ouest cyclonique (WZ) génère le plus souvent des précipitations abondantes en Suisse et elle se caractérise par un courant perturbé d'Ouest balayant une bonne partie de l'Atlantique et de l'Europe. Cette situation d'Ouest cyclonique arrive en tête dans toutes les régions du pays, excepté le versant Sud des Alpes et les Grisons davantage protégés par la chaîne alpine.

La 2ème situation ayant le plus souvent provoqué de fortes précipitations en Suisse est celle avec un thalweg sur l'Europe occidentale (TRW). Celui-ci, surtout visible en altitude, entraîne un afflux d'air humide du Sud-Ouest de la Méditerranée à l'Europe centrale, ce qui provoque une situation de barrage au Sud des Alpes. Le versant Sud et les Grisons sont les plus exposés à cette situation, mais les autres régions du pays n'en sont pas pour autant épargnées, puisque cette situation apparaît partout ailleurs entre la 2ème et la 5ème position (excepté le Plateau Est).

Tableau 2. Fréquences d'apparition (%) des 6 situations météorologiques de Hess-Brezowsky (HB) ayant le plus souvent provoqué des fortes précipitations (> 50 mm/jour) dans les différentes régions de Suisse de 1900 à 2019.

HB	Jura	HB	Plateau Ouest	HB	Plateau Est	HB	Préalpes Ouest	HB	Suisse
WZ	23.6%	WZ	17.6%	WZ	10.8%	WZ	25.5%	WZ	16.5%
WS	9.5%	TRW	10.7%	TM	10.1%	NWZ	7.7%	TRW	14.4%
TRM	6.7%	WS	9.6%	TRM	8.0%	WS	7.0%	TRM	7.2%
TRW	6.2%	TRM	7.4%	SWZ	6.8%	TRM	6.4%	TB	6.8%
SWZ	6.0%	TB	5.4%	WS	6.2%	TRW	5.7%	SWZ	5.5%
NWZ	5.6%	SWZ	5.3%	BM	5.5%	TM	4.8%	NWZ	5.5%
Total	57.6%	Total	55.9%	Total	47.4%	Total	57.0%	Total	56.0%

HB	Préalpes Est	HB	Valais	HB	Grisons	HB	Sud des Alpes
WZ	20.0%	WZ	18.5%	TRW	22.0%	TRW	20.3%
NWZ	11.8%	TRW	16.3%	WZ	16.9%	WZ	12.4%
TRM	8.4%	TRM	6.4%	TB	9.7%	TB	11.0%
TRW	8.0%	NWZ	6.0%	TRM	9.0%	SWZ	6.4%
TM	4.9%	TB	5.3%	SWZ	5.8%	TRM	6.0%
SWZ	4.2%	WS	5.3%	NWZ	5.6%	SZ	5.4%
Total	57.3%	Total	57.8%	Total	69.0%	Total	61.5%

En 3[ème] position pour la Suisse vient la situation avec un thalweg sur l'Europe centrale (TRM). Notre pays se situe à proximité de ce thalweg, ce qui se traduit par un temps maussade dans toutes les régions du pays. Pour cette raison, cette situation apparaît dans le tableau 2 dans toutes les régions de Suisse entre la 3[ème] et la 5[ème] position.

La 4[ème] situation ayant le plus souvent occasionné de fortes précipitations est celle avec une dépression sur les Iles Britanniques (TB). Cette situation se rapproche de celle avec un thalweg sur l'Europe occidentale, mais celui-ci est remplacé par une profonde dépression centrée au voisinage des Iles Britanniques. Les effets sur le temps en Suisse sont identiques avec une situation de barrage au Sud des Alpes qui affecte surtout le versant Sud et les Grisons, alors que le reste du pays est moins touché.

En 5[ème] position pour la Suisse, on aperçoit une 3[ème] situation cyclonique du Sud-Ouest (SWZ) qui se distingue des 2 précédentes (TRW, TB) par un courant perturbé du Sud-Ouest plus étendu allant des Açores jusqu'au Nord de la Russie, avec des effets sur le temps en Suisse semblables à ceux décrits pour les situations TRW et TB.

En 6[ème] position pour la Suisse vient la situation du Nord-Ouest cyclonique (NWZ). Elle se caractérise par un courant perturbé du Nord-Ouest soufflant des Iles Britanniques aux Balkans qui provoque une situation de barrage au Nord des Alpes. Le versant Nord des Alpes (Préalpes) est en général le plus touché par ce genre de situation.

On retrouve ces mêmes 6 situations dans l'étude précédente (Fallot, 2000), excepté la situation cyclonique du Sud-Ouest (SWZ) qui remplace celle d'Ouest méridionale (WS) à l'échelle de la Suisse. Cette situation WS, qui se distingue de la situation d'Ouest cyclonique WZ par une trajectoire plus méridionale du courant perturbé d'Ouest, apparaît encore dans le tableau 2 entre la 2[ème] et la 6[ème] position dans la moitié Ouest du pays et sur l'Est du Plateau.

Si on regroupe les situations météorologiques de Hess-Brezowsky en fonction de la direction générale des flux sur l'Europe centrale (Tab.3), il apparaît que les situations cycloniques d'Ouest, du Sud-Ouest à Sud-Est et du Nord-Ouest à Nord englobent le plus grand nombre de jours avec de fortes précipitations durant le 20[ème] siècle dans toutes les régions de Suisse. Les situations cycloniques du Sud-Ouest à Sud-Est enregistrent les fréquences d'apparition les plus élevées au Sud des Alpes, en Valais et aux Grisons car elles provoquent un effet de barrage sur

le versant Sud des Alpes qui touche en premier ces régions. Les situations cycloniques d'Ouest arrivent en tête sur le Plateau, dans le Jura et les Préalpes. Les situations cycloniques du Nord-Ouest à Nord arrivent en 2ème position dans les Préalpes et même en tête dans l'Est du Plateau : ces situations provoquent un effet de barrage au Nord des Alpes qui affecte le plus ces régions-là.

Tableau 3. Fréquences d'apparition (%) des situations cycloniques d'Ouest, du Sud-Ouest à Sud-Est (SO-SE), du Nord-Ouest et Nord (NO+N) ayant provoqué de fortes précipitations (> 50 mm/jour) en Suisse de 1900 à 2019

Situation météo	Jura	Plateau Ouest	Plateau Est	Préalpes Ouest	Préalpes Est	Valais	Grisons	Sud des Alpes	Suisse
Ouest	35.7%	30.2%	18.2%	35.4%	26.4%	27.1%	21.8%	18.9%	23.8%
SO-SE	19.0%	24.7%	15.2%	14.6%	18.0%	34.1%	43.7%	45.8%	32.4%
NO+N	16.3%	16.3%	18.2%	20.0%	25.3%	16.6%	18.7%	12.2%	17.3%
Total	71.1%	71.2%	51.6%	69.9%	69.7%	77.7%	84.2%	76.9%	73.6%

Les totaux cumulés pour ces 3 groupes de situations cycloniques varient entre 69 et 84% dans toutes les régions de Suisse, excepté le Plateau Est (seulement 51.6%). Par rapport à l'étude précédente (Fallot, 2000), les pourcentages cumulés pour ces 3 groupes sont plus élevés de 11% dans le Jura et de 4 à 7% sur le Plateau Ouest, dans les Grisons, au Sud des Alpes et à l'échelle suisse. Ils n'ont que peu varié sur le Plateau Est, dans les Préalpes et en Valais. D'autre part, les situations cycloniques du Sud-Ouest à Sud-Est n'arrivaient qu'en 2ème position derrière celles d'Ouest en Valais et à l'échelle suisse dans l'étude de l'an 2000. Ces différences résultent notamment de la pondération des épisodes par le nombre de stations affectées par de fortes précipitations pour chaque région dans la présente étude.

Conclusion

L'analyse des séries pluviométriques effectuée pour 233 stations en Suisse montre que la fréquence annuelle des fortes précipitations varie sensiblement d'une année à l'autre, mais qu'elle a globalement augmenté de 1900 à 1980. Cette analyse a également permis d'identifier les 6 situations météorologiques selon la classification de Hess-Brezowsky qui ont le plus souvent provoqué de fortes précipitations dans les différentes régions du pays. Les fréquences d'apparition de 2 situations cycloniques du Sud-Ouest (TRW, SWZ) ont sensiblement augmenté depuis 1900 et elles pourraient être à l'origine de la légère hausse de la fréquence des fortes précipitations mesurées en Suisse de 1900 à 1980. Les fréquences d'apparition des autres situations cycloniques ne révèlent pas de tendances significatives à la hausse ou à la baisse depuis 1900.

Bibliographie

Baeriswyl P.-A., 1995. Différences régionales des précipitations et de l'insolation relative en Suisse. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8, 189-197.

Fallot J.-M., 2000. Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20ème siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 100-109.

IPCC., 2013. Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the International Governmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535p.

Planchon O., Quénol H., Dupont N., Corgne S., 2009. Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1161-1173.

Werner P.C., Gerstengarbe F.W., 2010. Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. Potsdam-Institut für Klimaforschung (PIK) Report, N° 119, 146p.

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LES CATASTROPHES NATURELLES AU MAROC

FATHI M., KARROUK M.S.

Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagement Territorial (LCEAT), Université Hassan II, Casablanca, Maroc (fathimohamed1990@gmail.com ; ClimDev.Maroc@gmail.com)

Résumé : *Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes du 21ème siècle. Aucun pays n'est à l'abri de ses effets et aucun pays ne peut, seul, faire face aux décisions politiques controversées, aux profondes transformations technologiques et autres enjeux indissociables et lourdes de conséquences à l'échelle de la planète. Le Maroc est largement exposé aux risques d'origine naturelle : inondations, sécheresses, mouvements de terrain, tempêtes ou vagues de chaleur qui peuvent affecter le territoire national et engendrer des pertes humaines et économiques conséquentes.*

Mots clés : *changements climatiques; risques; catastrophes naturelles ; Maroc*

Summary: ***Climate change and natural disasters in Morocco.*** *Climate change is one of the most complex challenges of the 21st century. No country is immune to its effects and no country can deal with controversial political decisions, profound technological transformations and other issues inseparable and fraught with consequences on a global scale, alone. Morocco is largely exposed to risks of natural origin: floods, droughts, land movements, storms or heat waves that can affect the national territory and cause human and economic losses.*

Key words: *climate change; hazards; naturel catastrophes; Morocco*

Introduction

Dans le cadre du réchauffement planétaire que le monde a connu ces dernières décennies, plusieurs recherches ont été lancées pour étudier les changements climatiques associés et leurs impacts sur les systèmes humains et naturels.

Le Maroc comme d'autres pays a dû faire face, au cours de la dernière décennie, à plusieurs catastrophes naturelles qui ont été à l'origine de pertes de vies humaines, de dégâts matériels et de déficits importants sur les plans économique, social et environnemental.

Les résultats des recherches et études en cours sonnent l'alarme sur l'impact profond des aléas climatiques et leurs répercussions négatives liées aux changements climatiques, comme la succession de sécheresses et de températures élevées provoquées par une hausse des concentrations des gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O) (Karrouk, 2006), et la volatilité du système de précipitation que connaîtra le Maroc une forte baisse d'environ 20 % à l'horizon de l'année 2100 (Mokssit, 2016).

Ces nouvelles conditions mettent en difficulté les responsables politiques et les décideurs dans notre pays pour gérer ces phénomènes récurrents, dont l'infrastructure et la culture global qui lie l'homme à son milieu se trouvent non adaptés (Karrouk, 2012).

La troisième communication nationale à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a évalué les émissions nettes de GES au Maroc à 100,5 millions tonnes équivalent CO_2 (ou 3,1 t équivalent CO_2/habitant) pour l'année 2012 (Premier rapport biennal du royaume du Maroc, 2016).

Les principaux secteurs responsables des émissions sont l'énergie (57%), l'agriculture (21%) et les déchets (8%). Le taux annuel moyen de croissance des émissions des GES au Maroc prévu pour la période 2010-2040 est évalué à 3,38%. Les émissions nettes par habitant ont été évaluées à 2,95 tonnes Eq-CO_2 per capita en 2010. Elles devraient progresser à un rythme annuel moyen de 2,59% pour atteindre 6,35 tonnes Eq-CO_2 par capita à l'horizon 2040. (Troisième communication nationale à la CCNUCC).

Le graphique suivant (Fig.1) présente la Répartition des émissions nettes de GES directs par type de GES. (Troisième communication nationale à la CCNUCC) :

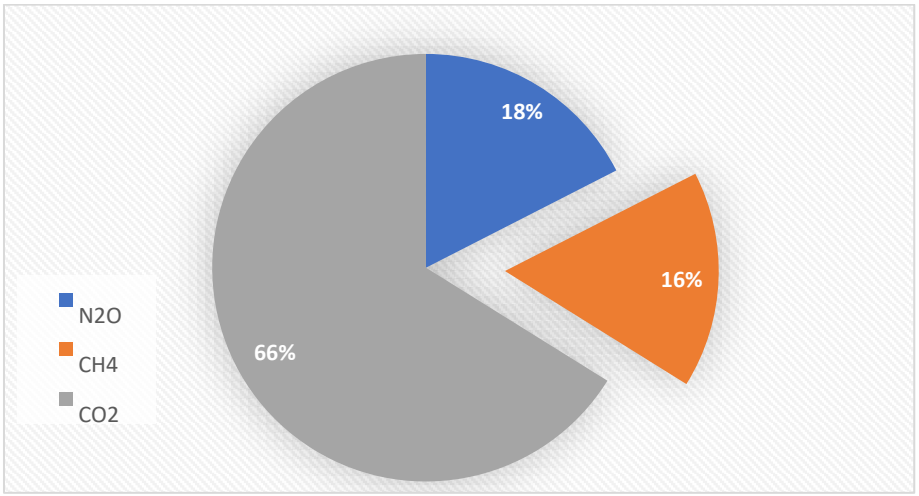


Figure 1. Répartition des émissions nettes de GES directs par type de GES en 2012

1. Zone d'étude et base de données

1.1. Zone d'étude

Situé entre l'Atlantique et la Méditerranée entre les latitudes 21°N à 36°N et les longitudes 1°O à 17°O, le Maroc se trouve à l'extrême Nord-Ouest du continent Africain. Il n'est séparé du continent Européen que par le détroit de Gibraltar, les points les plus proches entre le Maroc et l'Espagne étant distants que de 14 km.

1.2. Base de données

La base de données mise à notre disposition provient de la Direction de la Météorologie Nationale. Elle se compose de températures moyennes entre les périodes de 1971 à 2017 pour les stations suivantes : Oujda, Taza, Errachidia, Beni Mellal, Casablanca, Larache, Marrakech, Meknès, Safi, Agadir, Fès, Ouarzazate, Tétouan, Sidi-Ifni, Tanger, Essaouira, Rabat, Al-Hoceima (Tab.1).

Ainsi pour ce qui est des données de précipitation, nous nous sommes basés sur les projections spatiales sur l'horizon de 2050 et 2080 réalisées par Driouech *et al.*, 2009, à travers les indices climatiques calculés sur la période 1961-2008 pour 14 stations météorologiques marocaines.

Tableau 1. Évolution des températures moyennes entre les périodes 1971-1980 et 2009-2017 dans les différentes stations de MAROC Météo (en °C) (Source : Direction de la météorologie nationale, 2018)

	Période 1971-1980	Période 1998-2007	Variation	Période 2009-2017	Variation globale
Oujda	16	17,3	1,3	18,6	2,6
Taza	17,1	19,1	2	19,6	2,5
Errachidia	18,5	19,8	1,3	20,8	2,3
Beni Mellal	17,6	19,3	1,7	19,7	2,1
Casablanca	16,8	18,4	1,6	18,6	1,8
Larache	16,7	18,2	1,5	18,5	1,8
Marrakech	19,2	20,1	0,9	21	1,8
Meknès	16,6	17,8	1,2	18,4	1,8
Safi	17,6	18,5	0,9	19,4	1,8
Agadir	18,2	19,4	1,2	19,9	1,7
Fès	16,3	17,6	1,3	18	1,7
Ouarzazate	18,5	19,8	1,3	20,1	1,6
Tétouan	17,5	17,8	0,3	19,1	1,6
Sidi Ifni	18,4	19,6	1,2	19,6	1,2
Tanger	17,4	18,5	1,1	18,6	1,2
Essaouira	17	18	1	18,2	1,2
Rabat	16,7	18	1,3	17,8	1,1
Al Hoceima	17,7	18,4	0,7	18,5	0,8

2. Méthodologie et résultats

2.1. Méthodologie

Pour mettre en évidence la variabilité chronologique de la température et les précipitations à l'échelle du Maroc, on s'intéressera à analyser l'évolution et la tendance générale de ces deux facteurs (température et précipitations), ainsi que, leurs significations liées à ses changements.

2.2. Analyse des résultats

L'analyse des données de la Direction de la Météorologie Nationale montre qu'entre les périodes 1971-1980 et 2009-2017, les températures annuelles moyennes ont augmenté dans la majorité des villes marocaines (Fig.2).

Selon des données du secrétariat d'Etat chargé du développement durable, durant la période 1961-2008, le réchauffement varie entre +0,1°C par décennie sur l'extrême Nord, +0,3°C par décennie sur la région atlantique, à l'exception d'Essaouira et +0,4°C par décennie en montagne sur la région du sud de l'Atlas.

Ce résultat est corrélé à la tendance à la hausse des températures observées à l'échelle internationale. Le dernier rapport du GIEC a souligné que les activités humaines ont fait augmenter la température moyenne de surface de la planète de 0,8 à 1,2°C depuis l'ère préindustrielle, Il est probable que le réchauffement planétaire atteindra 1,5 C° entre 2030 et 2052 (GIEC, 2019).

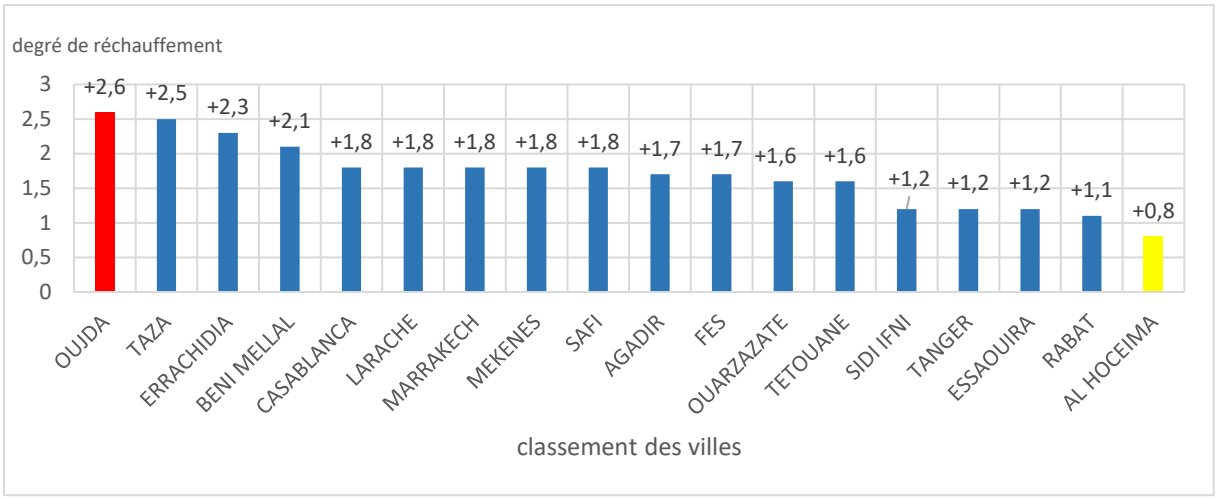


Figure 2. Classement des villes par degré de réchauffement climatique 1971-1980 et 2009- 2017 (variation en °C, données DMN)

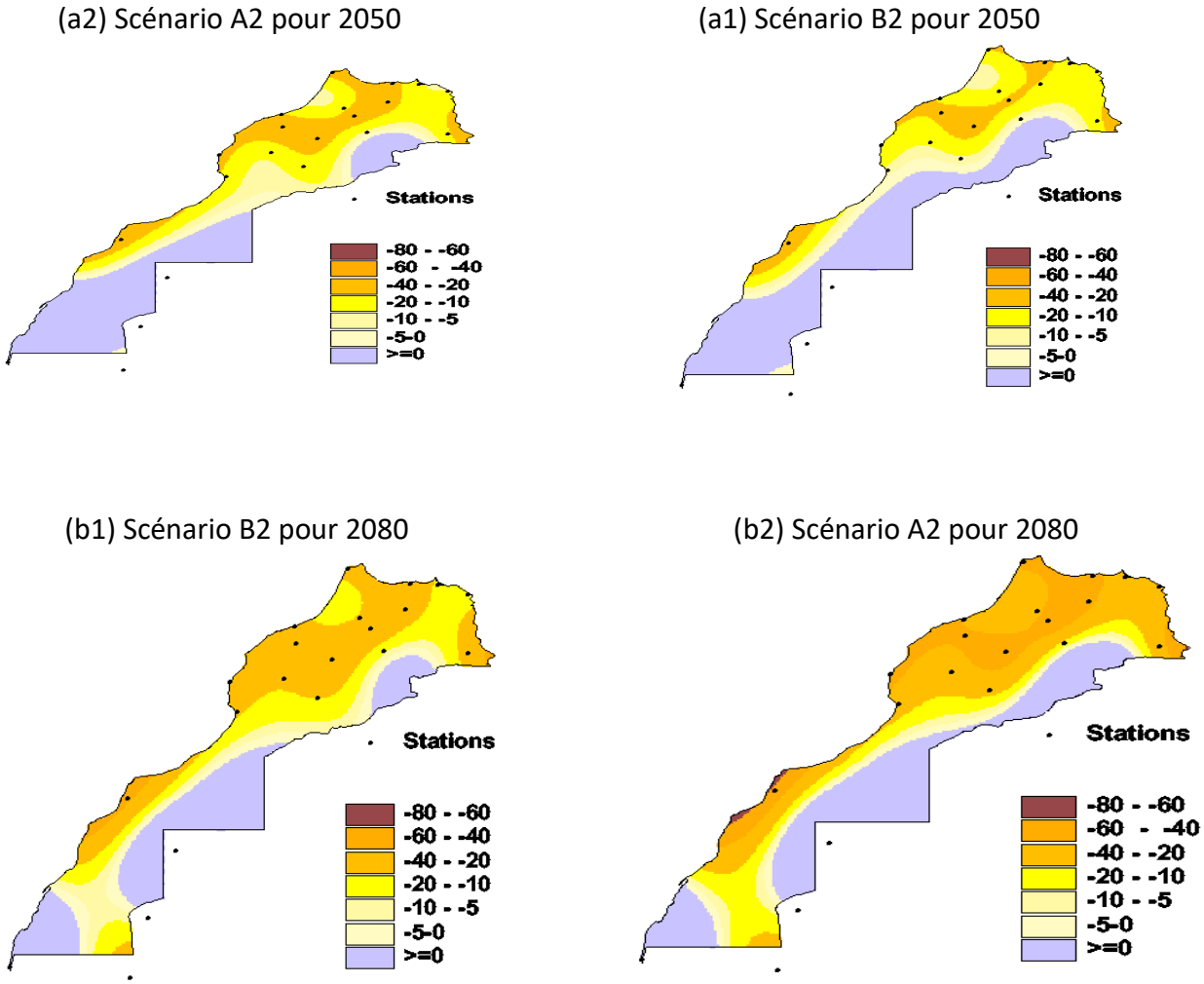


Figure 3. Spatialisation sur le royaume, changement en % des précipitations pour les deux horizons 2050 (2041-2070) et 2080 (2071-2099)

Selon l'étude de Driouech (2010) sur l'évolution spatio-temporelle de la précipitation, et destinées à la prévision à courte et moyenne échéances, il semble que des changements pourraient se manifester à la fois en termes de diminution du nombre total de jours humides,

d'augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs (et donc de la persistance temporelle de la sécheresse) et d'une diminution d'événements de fortes précipitations.

D'autres études similaires (Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement, 2009) ont porté sur le changement, en pourcentage, des précipitations, pour les deux horizons 2041 et 2070. Notre étude fait ressortir un assèchement plus important au nord et l'Ouest du pays. La diminution du niveau des précipitations sur la majorité du territoire national pourrait atteindre 5% à 40% pour les années 2050 et 40 à 60% pour les années 2080 (Fig.3).

Les changements climatiques étudiés se manifestent dans les dernières années par différents types de catastrophes notamment les inondations. Les catastrophes naturelles au Royaume continuent de détruire les infrastructures et de faire des victimes sur leur passage (Fig.4 ,5, 6).

Figure 4. Inondations à Casablanca, 2010

Figure 5. Inondations de la rocade de Casablanca 2017

Figure 6. Dommages causés par des inondations, région de Taroudant, 2019

Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude concordent avec ceux obtenus dans d'autres régions du globe et de l'Afrique du Nord. La tendance à la hausse de la température et les perturbations spatio-temporelles de la pluviométrie auront certainement de graves répercussions sur les écosystèmes naturels et les sociétés au cours des prochaines décennies.

Bibliographie

Mokssit A., 2016. Présentation générale des phénomènes climatiques extrêmes : cas du Maroc. *Actes de la session plénière solennelle*, année 2015, académie Hassan 2 des Sciences et techniques, Maroc, p.51.

Karrouk M. S., 2012. Le changement climatique et ses impacts au Maroc : Complexité du nouveau climat et défis de la prédiction du cycle de l'eau, Environnement et Changement Climatique au Maroc : Diagnostic et Perspectives. *Konrad-Adenauer-Stiftung* e.V. p.42.

Driouech F., 2010. *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitude*. Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, école doctorale: sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace, France, p.29.

Driouech F., Déqué M., Mokssit A., 2009. Numerical simulation of the probability distribution fonction of precipitation over Morocco. *Climate Dynamics* 32, 1055–1063

Karrouk M.S., 2006. Climate change and its impacts in Morocco, regional variability and its impacts in the Mediterranean area. NATO science series IV earth and environmental sciences, 79, p.253.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019. Résumé à l'intention des décideurs.

Ministère Délégué auprès du Ministère de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement Chargé de l'environnement, 2016. Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques, premier rapport biennal du royaume du Maroc, p.22-24.

Ministère Délégué auprès du Ministère de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement Chargé de l'environnement, 2016. 3ème Communication Nationale du Maroc à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques, p.103.

Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement, 2009. Plan national de lutte contre le réchauffement climatique, p.9.

ÉTUDE COMPARATIVE DES CONDITIONS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES PROPICES AUX INONDATIONS DANS TROIS BASSINS VERSANTS : BRÉSIL, CANADA ET FRANCE

FORTIN G.[1], DOS SANTOS I.[2], DUBREUIL V.[3], GERMAIN D.[4], GOUDARD G.[2], LANDOLFI de CARVALHO J.[2], MENDONÇA F.[2], ROLLET A.-J.[3], ROSEGHINI F.W.[2]

1 Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada (guillaume.fortin@umoncton.ca)
2 Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brésil
3 Département de géographie, Université Rennes 2, Rennes, France
4 Département de géographie, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

Résumé : *L'état du Paraná (Brésil), la province du Nouveau-Brunswick (Canada) et la France de l'Ouest sont trois régions touchées, de manière récurrente, par des inondations dont la durée et l'ampleur, dans le temps et l'espace, influencent directement la gravité des dommages socioéconomiques. L'objectif principal de cette étude vise donc à dresser un bilan des caractéristiques hydrométéorologiques favorables à l'occurrence des inondations dans trois bassins versants sensibles aux inondations (rivière Alto Iguaçu au Brésil, rivière Kennebecasis au Canada, rivière Sélune en France). Les résultats qui concernent une meilleure connaissance de l'aléa et leurs causes climatiques devraient, à plus long terme, permettre la mise en place des stratégies appropriées d'adaptation pour réduire la vulnérabilité des populations et réduire les dommages causés par les inondations.*

Mots clés : *risque ; inondation ; comparaison ; gestion*

Summary: ***Comparative study of hydrometeorological conditions conducive to flooding in three watersheds: Brazil, Canada and France.*** *The state of Paraná (Brazil), the province of New Brunswick (Canada) and Western France are three regions repeatedly affected by floods, the duration and extent of which over time and space, directly influence the severity of socio-economic damage. The main objective of this study is to assess the hydrometeorological characteristics favorable to the occurrence of floods in three watersheds sensitive to flooding. The results, which relate to better knowledge of the hazard and their climatic causes, should, in the longer term, allow the implementation of appropriate adaptation strategies to reduce the vulnerability of populations and reduce the damage caused by floods.*

Key words: *risk; inundation; comparison; management*

Introduction

Les risques naturels résultant d'événements météorologiques ou climatiques extrêmes peuvent avoir des impacts importants sur les environnements naturels et les sociétés. De plus, en raison de leurs pratiques d'aménagement, les sociétés favorisent aussi l'accroissement de leur vulnérabilité et la fréquence de l'aléa (imperméabilisation des surfaces, atteinte au rôle de la végétation, canalisation des flux, etc.). Parmi les risques naturels les plus communs, les inondations figurent au premier rang compte tenu des coûts humains et financiers associés. D'ailleurs, au cours des dernières décennies, l'augmentation des précipitations extrêmes, favorables aux inondations, a été observée à différents endroits dont en Amérique du Nord (Westra *et al.*, 2014; Fortin et Hétu, 2014), en Amérique du Sud (Dubreuil *et al.*, 2019; Haylock *et al.*, 2006) et en Europe (Blöschl *et al.*, 2017; Hodgkins *et al.*, 2017; Lehner *et al.*, 2006).

L'État du Paraná au Brésil, la province du Nouveau-Brunswick au Canada et la France de l'Ouest sont trois régions touchées, de manière récurrente, par des inondations dont la durée et l'ampleur dans le temps et l'espace influencent directement la gravité des pertes socio-économiques associées. Bien que les causes de ces inondations soient variables selon les régions, les études climatiques et comparatives menées aux échelles régionales et locales demeurent néanmoins cruciales puisque c'est précisément à ces échelles que les impacts des inondations se manifestent. L'étude en cours se répartit sur trois bassins versants (BV), lesquels ont été retenus en raison de leurs caractéristiques, à savoir : i) ils sont représentatifs du contexte

climatique de chacune des trois régions ; ii) ils sont complémentaires en termes d'occupation du sol (urbain, forestier, rural) ; et iii) ils sont bien documentés et possèdent des données suffisantes pour analyser, modéliser et cartographier le risque d'inondation. Le principal objectif de la présente étude vise donc à dresser un bilan provisoire des principales caractéristiques hydrométéorologiques propices au déclenchement des inondations afin de réduire le risque d'inondation dans chacun des bassins étudiés. Les résultats attendus concernent autant la compréhension de l'aléa inondation afin de mieux en saisir les causes météorologiques et climatiques, que la réduction des dommages et l'aide aux décideurs pour la mise en place de stratégies appropriées d'adaptation au changement climatique et ainsi diminuer la vulnérabilité des populations face aux inondations.

1. Données et Méthodes

1.1. Secteurs d'étude

Trois bassins versants d'une taille similaire ont été choisis soit : la superficie totale du BV de la rivière Kennebecasis au Nouveau-Brunswick (Canada) est de 2056 km^2 toutefois si l'on exclut la zone influencée par les marées la superficie est d'environ 1 346 km^2 et la superficie du sous-bassin de Trout Creek (un des cinq sous-BV qui a été étudié plus en détails) est de 221 km^2. La superficie du BV de la rivière Alto Iguaçu dans l'état du Paraná au Brésil est de 1 285 km^2 (le sous-BV de la rivière Belém est de 87,6 km^2). Le BV français de la rivière Sélune, en Normandie, couvre une superficie de 1 038 km². Ces trois BV ont été choisies sur la base de : i) leur représentativité climatique pour chacune des régions à l'étude ; ii) la disponibilité de rapports et documentation sur la gestion réalisée entre nature et aménagement et ; iii) la connaissance de ces environnements par chacune des équipes de recherche dans le cadre de travaux antérieurs de recherche. Le tableau 1 présente les caractéristiques géographiques générales de chacun des bassins. Les diagrammes ombrothermiques (Fig.1) montrent la variabilité annuelle des précipitations et des températures (pour les normales au cours de la période 1981-2010) pour trois stations situées dans chacun des trois BV. Les types de climats (selon la classification de Köppen) des trois bassins sont respectivement : continental humide froid (Dfb) pour le Canada, subtropical d'altitude sans saison sèche (Cfa) pour le Brésil, et tempéré frais sans saison sèche (Cfb) pour la France.

Tableau 1. Principales caractéristiques des bassins étudiés

Rivière	**Station de jaugeage**	**Superficie (km^2)**	**Altitude maximale (m asl)**	**Station météorologique**
Kennebecasis	Apohaqui (45°42'05"N / 65°36'06"W)	2056	350	Sussex (45°44'30"N / 65°31'44"W)
Sélune	Saint-Aubin-de-Terregatte (48°35'46"N / 1°17'34"W)	1038	350	Saint-Mars-la Futaie (48°25'0"N / -1°0'0"W)
Alto Iguaçu	Prado Velho (25°27'00"S / 49°14'56"E)	2881	980	Prado Velho (25°27'00"S / 49°14'56"E)

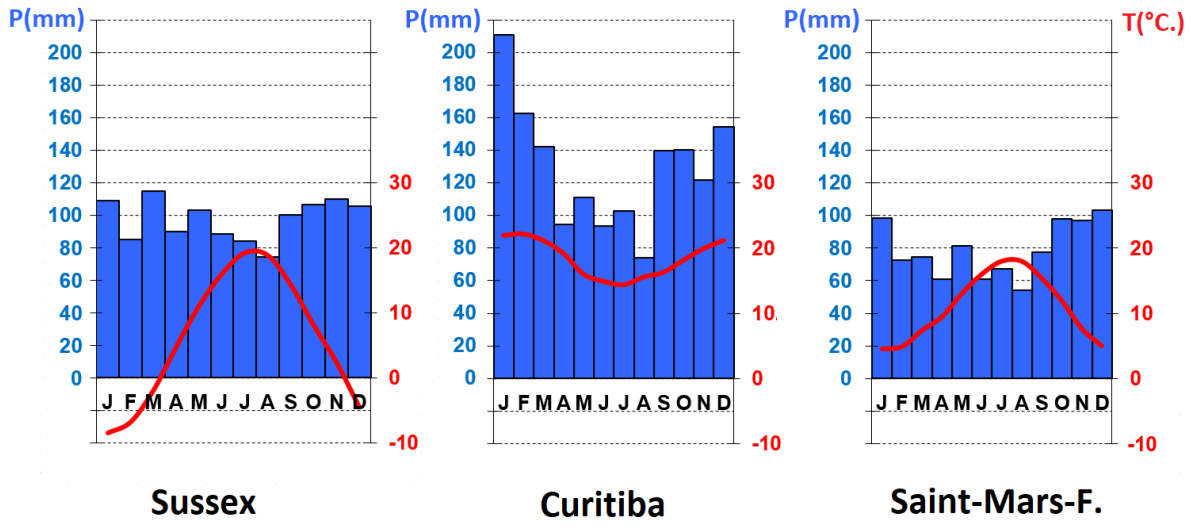


Figure 1. Diagrammes ombrothermiques pour les stations météos de Sussex (BV Kennebecasis, Canada), Curitiba (BV Alto Iguaçu, Brésil), (c) Saint-Mars-la-Futaie (BV Sélune, France)

1.2. Précipitations et données hydrométriques

Les précipitations et les données hydrométriques proviennent des sources suivantes : Environnement Canada (2020a; 2020b) pour le bassin de la Kennebecasis, Plateforme Hidroweb - Système d'information hydrologique (www.hidroweb.ana.gov.br) et Institut de l'eau de Paraná (http://www.aguasparana.pr.gov.br/) pour le bassin de l'Alto Iguaçu et, Météo France et la banque Hydro (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2020) pour le bassin de la Sélune.

1.3. Analyses

La compilation des données a permis de réaliser les courbes d'intensité, durée et fréquence (IDF) pour chacun des bassins. De plus, les seuils pluviométriques favorables à l'occurrence des inondations ont été établies sur la base de l'historique des événements passés, de l'analyse des régimes pluviométriques et du temps de concentration à partir de la méthode de Kirpich (1940) pour le Canada et la France et de Carter (1961) pour le Brésil puisque ce dernier bassin est plus densément urbanisé. La méthode de Kirpich calcule le temps de concentration à partir de la longueur maximale du parcours de l'eau dans le BV (en m) et de la pente longitudinale moyenne du BV (basé sur le sens d'écoulement de l'eau et entre des points déterminés sur le tracé du cours d'eau). Au Canada, compte-tenu d'une fréquence moindre des inondations (sans influence de la neige et la glace), la période de 1915 à 2014 a été utilisée par comparaison aux BV du Brésil (1986-2014) et de la France (1993-2014).

2. Résultats

Plusieurs facteurs anthropiques et naturels influencent l'intensité, la durée et la fréquence des inondations. Plus important encore, ces facteurs diffèrent dans les trois BV étudiés. Parmi les principaux facteurs on note l'urbanisation, l'utilisation du sol, l'absence de drainage, la végétation, le relief, la géologie, un aménagement inadéquat, la présence d'obstructions dans la plaine inondable, les conditions antérieures du sol, la taille et la forme du bassin et, les conditions hydrométéorologiques. Or, dans le cadre de cette étude nous nous concentrerons sur l'analyse comparée des conditions hydrométéorologiques sachant fort bien que d'autres facteurs, comme mentionnés précédemment, peuvent jouer un rôle important dans l'occurrence des inondations. Au total, 9 inondations au Canada (excluant les inondations survenues au cours

de l'hiver et du printemps), 102 au Brésil et 18 en France ont été analysées. Au Nouveau-Brunswick 60% des inondations sont causées soit par des embâcles de glace ou lors de la fonte printanière et elles surviennent entre les mois de mars et avril (Fortin *et al.*, 2019).

La variabilité de la pluviométrie pour les BV étudiés est exprimée à travers la courbe intensité/durée/fréquence (IDF), laquelle permet de mettre en relation l'intensité des précipitations (mm/h) en fonction de la durée de ces dernières et du temps d'un intervalle de temps de retour variable, par exemple situé entre 2 et 100 ans). Dans le cas de la rivière Kennebecasis, plusieurs inondations passées ont été modélisés d'un point de vue hydrologique (HEC-HMS) et hydraulique (HEC-RAS) dans le but de réaliser une cartographie des zones inondables (Fortin *et al.*, 2018). La base de données historiques concernant les inondations au Nouveau-Brunswick (GNB, 2020) a ainsi permis de corréler les niveaux moyens et maximaux de la rivière sur une base annuelle et la fréquence des inondations majeures (Fig.2). Le temps de concentration avoisine les 20 heures pour la rivière Kennebecasis, démontrant qu'à l'exception des inondations liées aux embâcles de glace et à la fonte rapide du couvert de neige, les inondations peuvent être modélisées en fonction des précipitations reçues en 48 heures. Ce temps est plutôt de 35 heures dans le cas de la Sélune et de 96 minutes pour la rivière Belém.

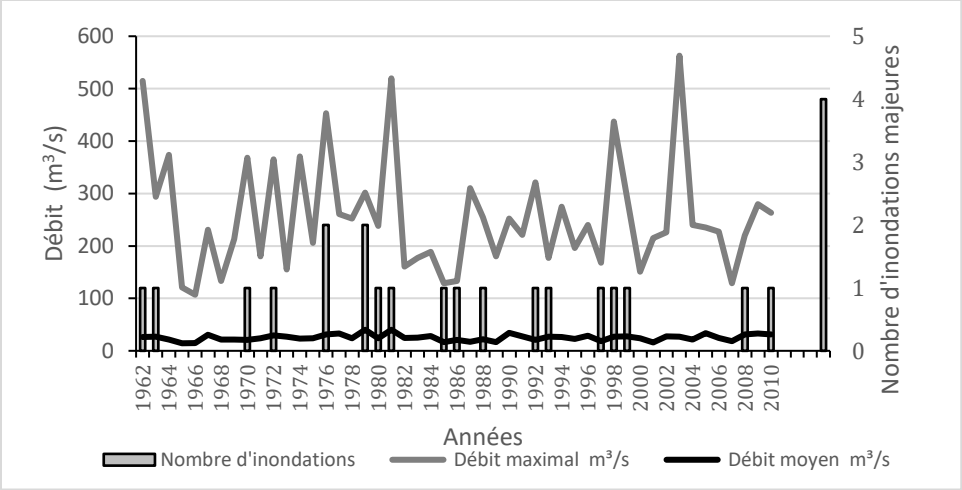


Figure 2. Exemple de la variabilité des débits (moyens et maximaux) et du nombre total d'inondations entre 1962 et 2014 tel qu'observés dans le bassin de la rivière Kennebecasis (débits à la station de jaugeage d'Apohaqui)

Tableau 2. Répartition mensuelle des inondations historiques

	J	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Kennebecasis*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0	1	2	2	2	2	n.d.	n.d.
Belém	16	12	13	6	4	5	7	4	16	5	5	9
Sélune	6	4	1	0	0	0	0	0	0	1	2	4

*Cela n'inclut pas les inondations survenues au cours de la période froide et résultant par exemple d'embâcles de glace ou de la fonte des neiges.

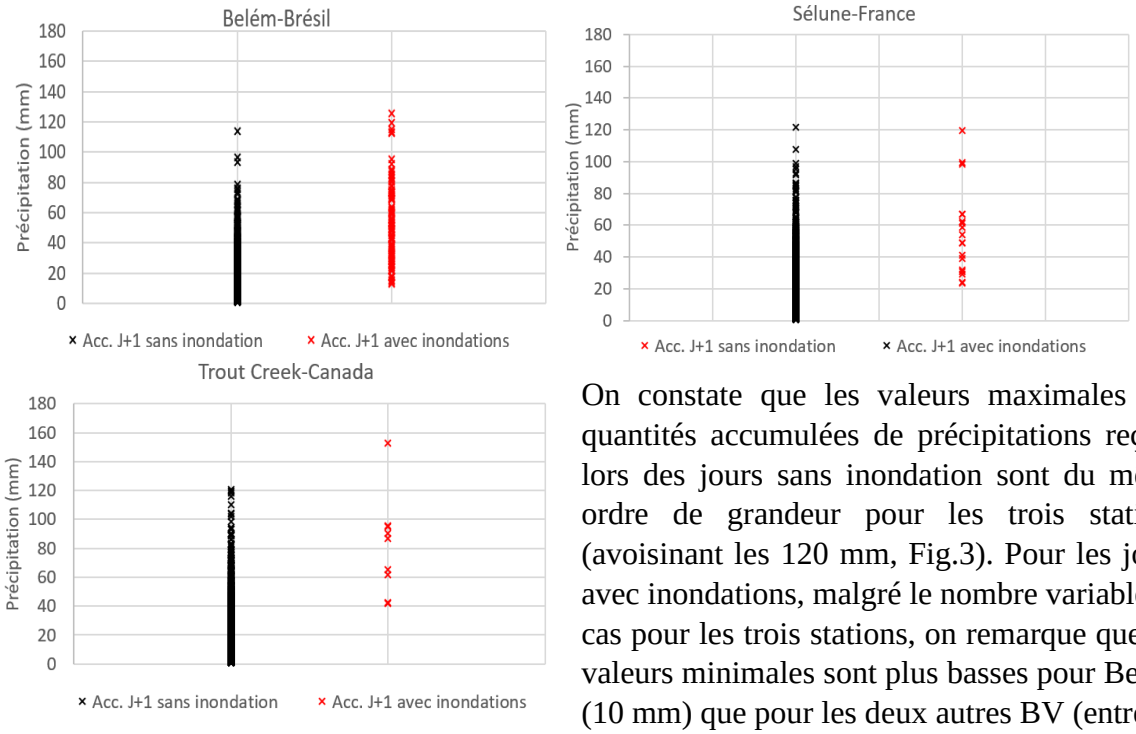


Figure 3. Variabilité des précipitations reçues lors des jours avec et sans inondation

On constate que les valeurs maximales des quantités accumulées de précipitations reçues lors des jours sans inondation sont du même ordre de grandeur pour les trois stations (avoisinant les 120 mm, Fig.3). Pour les jours avec inondations, malgré le nombre variable de cas pour les trois stations, on remarque que les valeurs minimales sont plus basses pour Belém (10 mm) que pour les deux autres BV (entre 20 et 40 mm).

La valeur maximale enregistrée est de 152 cm pour Trout Creek.

Finalement, les débits de pointe des trois principaux cours d'eau étudiés varient entre 563 m^3/s pour la rivière Kennebecasis pour la valeur maximale et, de 92,5 m^3/s pour la rivière Sélune pour la valeur minimale, tel que présenté dans le tableau 3. Les causes des inondations sont variables, dans le cas des bassins brésilien et français les précipitations frontales jouent un rôle prépondérant, d'autres causes moins fréquentes peuvent également déclencher des inondations dans ces bassins. Une distinction majeure entre le bassin canadien et les deux autres bassins est évidemment le rôle de réservoir hydrologique que joue le couvert nival et qui libère des quantités majeures d'eau de fonte lors d'épisodes intenses de redoux au cours de la période froide (janvier et février) ou lors de la fonte printanière (mars et avril) tel que décrit par Baronetti et coll. (2019).

Tableau 3. Comparaison des débits de pointe pour diverses inondations pour les trois bassins versants étudiés.

Bassins	**Débit de pointe (année)**	**Principales causes d'inondation**
Kennebecasis	563 m^3/s (2003)	Fonte des neiges, embâcles de glace, pluies intenses (tempêtes post-tropicales)
Alto Iguaçu	155 m^3/s (1997)	Cellules orageuses, précipitations frontales
Sélune	92,5 m^3/s (1995)	Précipitations frontales hivernales

Conclusions et Discussion

Les inondations en milieu fluvial représentent un phénomène ubiquiste, dont la fréquence et l'ampleur sont déterminés par le dépassement d'un seuil pluviométrique, lequel correspond à un seuil d'équilibre des composantes du milieu naturel (sols, végétation, etc.). En milieu bâti, les influences anthropiques deviennent prépondérantes en raison des modifications induites au milieu naturel, d'où la fréquence accrue des inondations en milieu urbain notamment. À l'heure des changements globaux en cours et à venir, force est de constater que la restauration des milieux naturels, avec l'octroi aux rivières d'une zone de mobilité et d'inondation, demeure le

moyen le plus efficace pour diminuer les coûts élevés des dommages associés aux inondations. Néanmoins, l'utilisation des caractéristiques pluviométriques et hydrologiques lors des inondations historiques permet de modéliser et d'anticiper la réponse des BV étudiés en fonction de seuils précis favorables à l'occurrence des inondations.

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à l'appui financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) dans le cadre du programme de *Projets interuniversitaires de solidarité dans les Amériques (PRISA)*. Nous remercions toutes les étudiantes et étudiants qui ont participés au projet.

Bibliographie

Baronetti A., Fratianni S., Acquaotta F., & Fortin G. 2019. A quality control approach to better characterize the spatial distribution of snow depth over New Brunswick, Canada. *International Journal of Climatology*, *39*(14), 5470-5485.

Blöschl G., *et al.*, 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588-590.

Carter R. W., 1961. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. Professional Paper 424-B B9-B11. *U.S. Geological Survey*, Reston.

Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O., & Sant'Anna Neto J. L., 2019. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*, *39*(3), 1446-1456.

Environnement et Changement Climatique Canada., 2020a. Conditions météorologiques et climatiques passées. URL : https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html

Environnement et Changement Climatique Canada. 2020. National water data archive: HYDAT. URL: https://www.ec.gc.ca/rhc-wsc/default.asp?lang=Fr&n=9018B5EC-1

Fortin G., & Hétu B., 2014. Estimating winter trends in climatic variables in the Chic-Chocs Mountains, Canada (1970–2009). *International Journal of Climatology*, *34*(10), 3078-3088.

Fortin G., Baronetti A., Thériault F., Long M.-A., 2019. Cartographie et atténuation des risques d'inondation liés aux glaces : bassin versant de la rivière Kennebecasis. Rapport soumis au Fonds en Fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick, Université de Moncton, Moncton, 43p.

Goudard G., 2019. *Eventos Pluviais extremos e desastres hidrometeorológicos na bacia do Alto Iguaçu (Pr).* Maîtrise en géographie, Universidade Federal do Paraná, Brazil, 131p.

Haylock M. R., *et al*., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, *19*(8), 1490-1512.

Hodgkins, G. A., *et al*., 2017. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe. *Journal of Hydrology*, *552*, 704-717.

Kirpich Z. P., 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, *10*(6), 362–368.

Lehner B., Döll P., Alcamo J., Henrichs T., & Kaspar F., 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change*, *75*(3), 273-299.

Lenderink G. et Van Meijgaard E., 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, *1*(8), 511–514.

Westra S., Fowler H., Evans J., Alexander L., Berg P., Johnson F., Kendon E., Lenderink G. & Roberts N., 2014. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, *52*(3), 522–555.

PHENOLOGY RESPONSES OF GRAPEVINE CULTIVARS TO CLIMATE VARIABILITY IN A COASTAL REGION OF URUGUAY

FOURMENT M.[1], TACHINI R.[1], FERRER M.[1], BONNARDOT V.[2]

1 Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay (mfourment@fagro.edu.uy)
2 Laboratoire LETG-Rennes UMR 6554 CNRS, Université de Rennes 2, Rennes, France

Summary: *Surface under vineyards are multiplying in the coastal region of eastern Uruguay and agroclimatic studies are being carried out in a commercial vineyard in the department of Maldonado. It aims at developing knowledge on climate of the new region compared to the traditional wine region of Uruguay and on the grapevine phenological responses to interannual climatic variability. Tannat and Albariño cultivars were monitored and climatic data were analysed during the 2012-2018 period. Results showed this coastal region is cooler than the traditional winegrowing region of the country. Rainfall over the growing season did not show significant differences, but the number of rainy days was statistically higher in Maldonado. Albariño and Tannat showed differences in its phenological cycle during the six years of study. Both cultivars showed sensitivity to climate conditions.*

Key words: *climate variability; viticulture; Tannat; Albariño; coastal region; Uruguay*

Résumé : ***Réponses phénologiques de la vigne à la variabilité climatique dans une région côtière de l'Uruguay.*** *Les surfaces en vigne se multiplient dans la région côtière de l'est de l'Uruguay et des études agroclimatiques sont menées dans un vignoble commercial du département de Maldonado. Elles visent à développer les connaissances sur le climat de la région par rapport à la région viticole traditionnelle de l'Uruguay et sur les réponses phénologiques de la vigne à la variabilité climatique interannuelle. Lesdonnées phénologiques des cépages Tannat et Albariño et les données climatiques ont été analysées au cours de la période 2012-2018. Les résultats ont montré que cette région côtière est plus fraîche que la région viticole traditionnelle du pays. Les précipitations pendant la période végétative n'ont pas montré de différences significatives, mais le nombre de jours de pluie est statistiquement plus élevé à Maldonado. Albariño et Tannat ont montré des différences phénologiques au cours des six années d'étude. Les deux cépages ont montré de sensibilité aux conditions climatiques.*

Mots clés : *variabilité climatique ; viticulture ; Tannat ; Albariño ; Région côtière ; Uruguay*

Introduction

The main winegrowing region of Uruguay is the Canelones department around Montevideo (INAVI, 2020), yet vineyards are increasingly planted nowadays to the East of the country such as in the coastal department of Maldonado and very little is known on climate for viticulture in this emerging winegrowing region of Uruguay. In parallel, the knowledge of the phenological behavior in different wine-growing regions is a tool that helps to adaptation of the viticultural practices to climate variability and climate change. Phenology concerns the timing of specific states of grapevine growth and development in the annual cycle. The timing and duration of these phases are influenced mainly by air temperature (Jones *et al.*, 2000; Keller, 2010), as well as by different cultivation practices (Jones *et al.*, 2000). The winegrowers, who are aware of local climate variability, take into account the phenological stages of the crop cycle to manage cultural practices such as the timing of pruning, thinning of bunches or applications of plant protection products. In addition to temperature, physiological relationships play a predominant role in the phenological behaviour of the vine. Barbeau (2008) reports a delay in phenology (veraison and ripening), when vine vigour is excessive, and conversely, a certain precocity when plant vigour is moderate to weak, due to greater photosynthetic efficiency and better source-source ratio. In the same way, Sadras and Moran (2013) study the relationships between temperature and phenology when the vine is subjected to different temperature treatments (direct measures of effects), and establish an interaction between plant growth and development. The effect of a temperature increase on the ripening of the grape, for example, varies according to its source-source relationship.

The aim of this work is then to assess the climate of the emerging winegrowing region of Maldonado compared to that of the traditional winegrowing region of Uruguay and to evaluate the phenology of Tannat and Albariño grapes, the two emblematic grape varieties of Uruguay, in relation to seasonal climate variability.

1. Study site, Data and Method

1.1. Study region

Two winegrowing regions of Uruguay were studied: the area of Juanicó situated in the Canelones Department within the traditional winegrowing region near the Rio de la Plata estuary south of Uruguay and the area of Garzón located in the Maldonado Department, an emerging wine region on the Atlantic side of southeastern Uruguay (Fig.1).

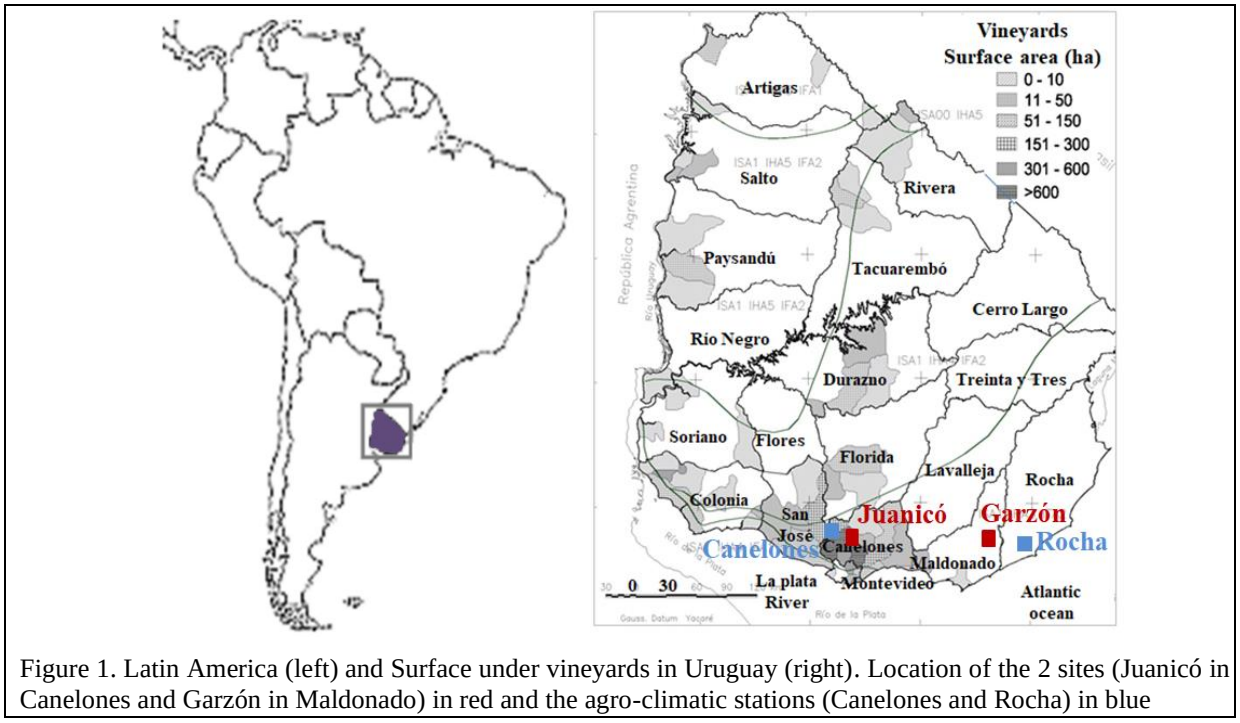


Figure 1. Latin America (left) and Surface under vineyards in Uruguay (right). Location of the 2 sites (Juanicó in Canelones and Garzón in Maldonado) in red and the agro-climatic stations (Canelones and Rocha) in blue

1.2. Climate analysis

Daily data of temperature and precipitation were obtained from the Canelones and Rocha agro-climatic stations (Fig.1). Canelones is the station of the National Research Institute (INIA) and the Rocha weather station belongs to the Meteorology National Institute (INUMET) network, both in accordance with the World Meteorological Organization (WMO) standards. Spatial and seasonal variability of temperatures and precipitations were evaluated during the growing seasons (from the 1st of September to the 15th march) over the 6 years starting from the 2012-2013 vintage to the 2017-2018 vintage. The following bioclimatic indices for viticulture were calculated: Growing Degree Days (Winkler *et al.*, 1974), Heliothermic Index (Huglin, 1978), Cool Night Index (Tonietto and Carbonnau, 2004) as well as the growing season (1st September to 15th March) average temperature, total rainfall and number of rainy days using different thresholds (between 0.1 and 5 mm ; between 5 and 15 mm and greater than 15 mm). The 6-year average was used to assess the climate of the emerging winegrowing region (Rocha) compared to that of the traditional winegrowing region (Canelones). The yearly climatic variables were used to study the grapevine response to seasonal climate variability.

ANOVA statistical test was performed to identify significant differences between the regions and the seasons (Tukey grouping; $\alpha = 0.05$).

1.3. Phenology data

Two commercial plots, one planted with Tannat and the other one with Albariño in Garzón (Maldonado Department) were selected for the monitoring of 4 key-phenological stages (Coombe, 1995). Dates of flowering, fruit set, bunch closure and veraison were notified after monitoring of 100 shoots per plot during six consecutive growing seasons (2012 to 2018). The growing degree-day - summation of mean temperature above 10°C (GDD) was calculated for each phenological stage in order to determine the sensitivity of the cultivars.

2. Results

2.1. Spatial climate variability between the emerging and the traditional wine regions

Significant climate differences between the emerging and the traditional wine regions of Uruguay were found. In terms of thermal conditions, the emerging winegrowing region (Rocha) is cooler than the traditional winegrowing region (Canelones). The bioclimatic Huglin index commonly used to assess the climatic potential of a region for viticulture reached the value of 2080 on average over the 6 years in Rocha. This corresponds to the "warm temperate climate" class and the average temperature during the growing season was 18.9°C. This is respectively 149 and 0.7ºC lower than in Canelones (Tab.1). This is due to the proximity of the Atlantic Ocean and its moderating effect on temperature as well as the possible higher frequency of sea-breeze circulation during warm summer days preventing temperature to increase too much during the day (Tachini *et al.*, 2020).

Table 1. Climate variables for Rocha and Canelones averaged for the growing seasons of the 2012-2018 period. T= Average temperature during the growing season, GDD= Growing Degrees Day, HI= Heliothermal Index, CNI= Cool Night Index; PP = total rainfall (mm), DR = Number of days with rain >0,1mm, DR 5 = number of days with less than 5 mm of rain, DR 5-15 = Number of days with rain between 5 and 15 mm, DR 15+ = Number of days with rain greater than 15 mm. *(*) represents statistical significance between regions (α=0.05)*

Climate variables	*Rocha*	*Canelones*	*Difference*
*T **	18.9	19.6	-0.7
*GDD **	1753	1860	-107
*HI **	2080	2229	-149
CNI	16.8	17.4	-0.6
PP	760	744	+16
*RD **	79.0	54.0	+25
*RD 5 **	49.3	26.3	+23
RD 5-15	12.0	11.3	+0.7
RD 15+	17.7	16.3	+1.4

With respect to rainfall the amount for the growing season reached an average of 760 mm, which does not differ significantly from Canelones conditions (+16 mm only). However, a significant difference was found in the number of rainy days, higher in Rocha than in Canelones (79 and 54 days, respectively). This means the emerging wine region experienced 43% of its time over the growing season under rainy conditions against 29% in Canelones, especially low intensity rainfall (<5mm) associated with the impact of the Atlantic Ocean on the region's cloudiness. This may hinder the functioning of grapevine physiology and in turn impact on the berry typicity.

2.2. Seasonal climate variability and grapevine phenology responses in the emerging winegrowing region

With respect to climate, the Rocha station, close to the Garzón vineyards, showed a seasonal climate variability that could have conditioned the development and growth of the vine (Tab.2). With 1156 mm the 2013-2014 season was the most humid season. It received 396 mm more

than the 6-year average, while the 2015-2016 season was the coolest and least humid with -0.6°C and 318 mm less than the 6-year average, yet the number of rainy days was close to average.

Table 2. Climate variables for Maldonado (Rocha station) for the 2012-2018 growing seasons. T= Average temperature during the growing season, GDD= Growing Degrees Day base 10, HI= Heliothermal Index, CNI= Cool Night Index, PP = Precipitation during the cycle (mm), DR = Days with rain, DR 5 = Days with rain less than 5 mm, DR 5-15 = Days with rain between 5 and 15 mm, DR 15+ = Days with rain greater than 15 mm

climate variables	*2012-2013*	*2013-2014*	*2014-2015*	*2015-2016*	*2016-2017*	*2017-2018*	*Average*
T	*19.0*	*19.1*	*19.4*	*18.3*	*18.9*	*18.8*	*18.9*
GDD	*1786*	*1805*	*1858*	*1603*	*1734*	*1733*	*1753*
HI	*2125*	*2115*	*2130*	*1954*	*2045*	*2110*	*2080*
CNI	*16.4*	*18.5*	*15.8*	*16.8*	*19.2*	*14.4*	*16.8*
PP	*857*	*1156*	*851*	*442*	*725*	*532*	*760*
DR	*83*	*91*	*66*	*78*	*81*	*75*	*79.0*
DR 5	*56*	*49*	*34*	*59*	*45*	*53*	*49.3*
DR 5-15	*8*	*14*	*13*	*9*	*18*	*10*	*12.0*
DR 15+	*19*	*28*	*19*	*10*	*18*	*12*	*17.7*

In parallel, with respect to phenology phases, the Tannat and Albariño cultivars showed similar characteristics over the 6-year period. Early stages were recorded during the years 2014-2015 and 2017-2018 for both cultivars; while late stages were recorded during the 2015-2016 season (Fig.2).

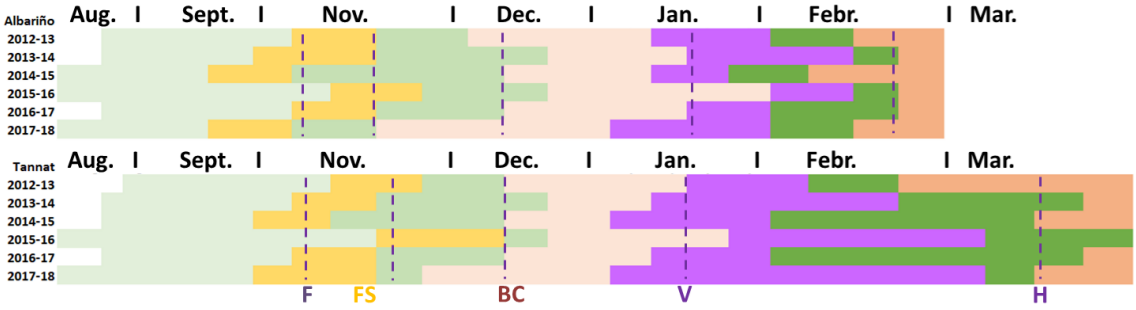


Figure 2. Phenological stages during 6 growing seasons for Albariño (top) and Tannat (bottom) cultivars at Maldonado. Where F = Flowering, FS = Fruit set, BC = Bunch closure, V = veraison and H = Harvest

The harvest of Albariño took place on average around February 25 in Garzón because it was decided on the basis of its primary components for quality wine independently whether technological maturity was reached. On the other hand, the harvest of Tannat in this region took place between March 20 and April 4 for years with suitable climate conditions (i.e. moderate temperatures and dry conditions) that allowed a late harvest enabling to reach technical maturity.

Temporal differences in two phenological stages, flowering and veraison from both Tannat and Albariño are shown in Figure 3. During the cool conditions of 2015-2016, both cultivars showed up to 11 days of delay in flowering and véraison compared to the warmer conditions (2012-2013 et 2014-2015).

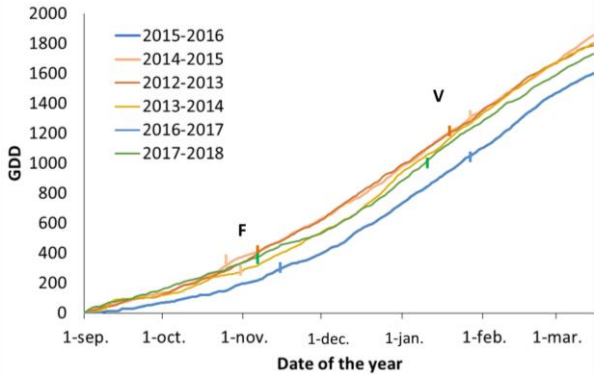


Figure 3. Growing Degree Days (GDD) evolution and temporal representation of Flowering (F) and Veraison (V) during the 6 studied seasons at Maldonado

The analyze of the differences in phenological responses of Albariño and Tannat during two contrasting seasonal climate conditions showed that the greatest differences were obtained between the 2014-2015 and 2015-2016 cycles for Albariño and between the 2012-2013 and 2017-2018 cycles for Tannat.

For Albariño an advance of 12.3 days on average for the flowering, bunch closure and veraison stages were recorded for the 2014-2015 season compared to that of 2015-2016. The greatest difference in the evolution of the stages was observed between flowering and bunch closure (Fig.4 left). Climate conditions during those phonological stages in 2014-2015 showed to be significantly different compared to 2015-2016 (difference of 2.2 º in the average temperature and 161 mm more rain in the earliest season).

For Tannat, Figure 2 (right) shows the delay over the final phases of the most recent season, causing a delay in the harvest date (Fig.4 right). This is relevant, as for this red cultivar, a change in the speed of the phenological processes may cause an earlier or later harvest, an effect that is not affected in Albariño, a white cultivar that is harvested without the criteria of reaching technological maturity.

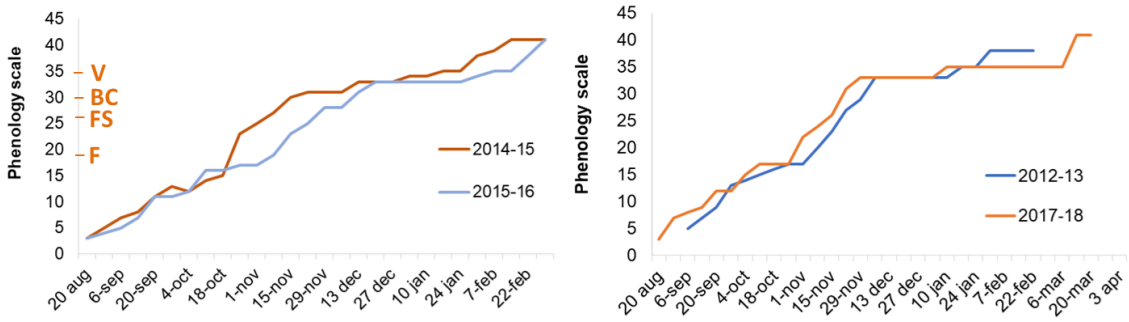


Figure 4. Phenology scale evolution of Albariño (left) and Tannat (right) during two years of contrasting thermal accumulation. Phenology scale is according to Coombe (1995)

For Albariño, the years that showed the greatest phenological mismatch are not associated with the years with greater or lesser final thermal accumulation. For example, the cycle 2014-2015 that presented precocity in the development of the states, was not the year that presented greater thermal accumulation during the states but temperatures and rainfall were higher than a contrasting season, as we showed before.

On the contrary, the precocity in Tannat phenology was associated with greater heat accumulation. This means that in this emerging winegrowing region of Uruguay, Tannat shows greater sensitivity to temperature, unlike what Fourment *et al.* (2020) found in the traditional wine region of southern Uruguay.

Conclusions and Discussion

The comparison between an emerging and the traditional wine region of Uruguay under different agro-climatic conditions contributes to the knowledge of the environmental conditions in which the cultivation of the grapevine takes place. The thermal and water conditions in the south and east of Uruguay showed differences. Within the emerging winegrowing region of Maldonado, the sensitivity of a white and a red cultivar to temperature was evaluated through phenology monitoring. Both studied cultivars, the white grape cultivar Albariño and red grape cultivar Tannat, showed sensitivity to climate, with greater or lesser precocity depending on heat accumulation and precipitations reached through the season.

These results may be of interest to provide sustainable management measures in a context of climate change. Grape typicity at harvest and the interannual behaviour of the crop as a function of the climate need to be further investigated.

Acknowledgments

This study was financed by the Sectorial Commission of Cientific Research of the University of the Republic, Uruguay (CSIC, UdelaR).

Literature

Barbeau G., 2008. Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. *Proceedings of VI Foro Mundial del Vino*, Logroño, España, 24 abril 2008.

Coombe B.G., 1995. Growth stages of the grapevine: adopting of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1:104-110.

Fourment M., Ferrer M., Barbeau G., Quénol H., 2020. Is phenological behavior of Tannat (Vitis vinifera L.) affected by temperature variability in the coastal wine region of southern Uruguay? *Acta Horticulturae* (accepted).

Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. Comptes *Rendus de l'Académie d'Agriculture*, 1117-1126.

I.NA.VI. (Instituto Nacional de Vitivinicultura), 2020. Estadísticas de los viñedos. URL: www.inavi.com.uy (visited 04/03/2020).

Jones G.V., and Davis R.E., 2000. Using a synoptic climatological approach to understand climate–viticulture relationships. *International Journal of Climatology*, 20, 813–837.

Keller M., 2010. *The science of grapevine: anatomy and physiology*. Academic press, Amsterdam, 400p.

Sadras V.O., Moran M.A., 2013. Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 107-115.

Tachini R., Fourment M., Ferrer M., 2020. Study of the meso-climate and its effect on the berry composition in the Atlantic region of Uruguay. *Proceeding of the XXXIIIrd AIC Congress*. July 2020, Rennes, France.

Tonietto J., Carbonneau A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agr Forest Meteorol* 124: 81-97.

Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A., 1975. *General viticulture*. 4th Edition, University of California Press, Berkley, 462. Doi: http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197512000-00012.

MÉTHODOLOGIES D'ANALYSE POUR LA CARACTÉRISATION CLIMATIQUE

FRATIANNI S.[1,2], ACQUAOTTA F.[1,2], BARONETTI A.[1,2], FALZOI S.[1], GARZENA D.[3], GUENZI D.[4]

1 Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Torino, Italy (simona.fratianni@unito.it)
2 Centro Interdipartimentale sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare NatRisk, Grugliasco, Italy
3 GD Test S.r.l., Torino, Italy
4 Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (CNR – IRPI), Torino, Italy

Résumé : *L'article présente les principales méthodes d'étude adoptées et, dans certains cas, développées par le groupe de travail Climatologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Turin. Les méthodes utilisées sont extrêmement utiles dans le traitement des données météorologiques journalières à long terme afin de réaliser une analyse climatique correcte et dans l'évaluation des tendances et l'identification des indices climatiques. Ces méthodes sont fondamentales pour contribuer à l'avancement du changement climatique et aux études associées et pour développer des scénarios sur les changements climatiques en combinant les données climatiques instrumentales avec les projections des simulations des Modèles Climatiques Régionaux (RCM). De nombreux articles sont également cités dans lesquels les méthodes présentées et les résultats obtenus dans différentes zones climatiques et géographiques sont discutés.*

Mots clés : *contrôle de qualité ; températures ; précipitations ; neige ; indices climatiques*

Summary: ***Analysis methodologies for climate characterization****. The article presents the main study methods adopted and, in some cases, developed by the Climatology working group of the Department of Earth Sciences at the University of Turin. The methods used are extremely useful in the processing of long-term daily weather data in order to carry out a correct climate analysis, in the evaluation of trends and in the identification of climate indices. These methods are fundamental to monitor the advancement of climate change and associated studies and to develop scenarios on climate change, combining instrumental climate data with Regional Climate projection Models (RCM). Numerous articles are also cited, in which the methods and the results obtained in different climatic and geographic areas are discussed.*

Key words: *quality control; temperatures; precipitation; trend; climate indices*

Introduction

Les phénomènes météorologiques extrêmes, les sécheresses, les vagues de chaleur, les inondations et les ouragans sont de plus en plus fréquents, de sorte que l'étude du climat et de ses variations est devenue une question d'actualité ces dernières années et a incité la communauté scientifique à intensifier ses études afin d'identifier les changements à l'échelle mondiale. L'étude approfondie du climat et de ses variations nécessite toutefois l'utilisation de séries de données longues, fiables et de grande qualité (Acquaotta et Fratianni, 2015). Ces ensembles de données sont essentiels car ils servent de base à l'évaluation des tendances à l'échelle du siècle, à la validation des modèles climatiques, ainsi qu'à la détection et à l'attribution des changements climatiques à l'échelle régionale. La valeur des données dépend toutefois fortement de l'homogénéité des séries météorologiques.

Pour cette raison, différentes méthodes d'analyse ont été développées et adoptées par les auteurs de ce résumé étendu afin de permettre une caractérisation climatique correcte à grande échelle (Italie, Irlande, Afrique du Sud, …) et à une échelle locale (Piémont, Italie, New Brunswick, Canada, Paraná, Brésil, …) (Acquaotta *et al.*, 2018; Falzoi *et al.* 2019a ; Fratianni *et al.*, 2017 ; Baronetti *et al.*, 2018 ; Scovronick *et al.*, 2018 ; Baronetti *et al.*, 2019 ; Zandonadi *et al.*, 2016). Une plus grande importance a été accordée à l'évaluation de la performance des méthodes d'homogénéisation et pour la mise à jour des algorithmes pour le contrôle de la qualité des séries de températures, des précipitations et de la neige (Guenzi *et al.*, 2017a et 2017b ; Guenzi *et al.*, 2020). En effet, avant d'utiliser des données climatologiques dans tout type

d'étude - en particulier dans les études sur le changement climatique - un contrôle de la qualité et une évaluation de l'homogénéité de l'ensemble de données est obligatoire (Acquaotta *et al.*, 2016 et 2019 ; Fortin *et al.*, 2017 ; Venema *et al.*, 2012).

Cet article présente une synthèse des méthodes les plus efficaces pour le contrôle de la qualité, l'homogénéisation, la détection des tendances, l'individuation des indices climatiques et des événements extrêmes et de la spatialisation des données qui ont été calculés dans des différents contextes géographiques et climatiques en passant des milieux tempérés aux continentaux et tropicaux, y compris les environnements périglaciaires et glaciaires (Acquaotta *et al.*, 2015 ; Fratianni *et al.*, 2015 ; Giaccone *et al.*, 2016 ; Colombo *et al.*, 2018 ; Juricova et Fratianni, 2018 ; Murara *et al.*, 2019 ; Baronetti *et al.*, 2020).

1. Données et méthodologie

Les données météorologiques quotidiennes doivent nécessairement être analysées à travers plusieurs phases listées ici :

1. Contrôle de qualité ;
2. Comparaison entre séries météorologiques ;
3. Homogénéisation ;
4. Tendances et indices climatiques.

La première étape de l'analyse des données est le contrôle qualité (QC) pour détecter et identifier erreurs commises lors de l'enregistrement, de la manipulation, du formatage, de la transmission et de l'archivage. Les principaux outils qu'effectuent un contrôle de la qualité sont RClimdex (Zhang et Yang, 2004), ProClimDB (Stepanek, 2008), Climatol (Guijarro, 2014), ClimPact (Alexander *et al.*, 2013).

Les valeurs mensuelles des précipitations, des températures maximales et minimales et de la neige sont calculées si on dispose d'au moins 80% des données journalières (moins de 6 jours non consécutifs) (Göktürk *et al.*, 2008). Aussi pour les valeurs saisonnières, il est nécessaire d'avoir au moins 80% des données quotidiennes, moins de 18 jours non consécutifs. Il a également été possible de produire une méthodologie de contrôle de qualité pour les séries de neige enregistrées à différentes échelles de temps (quotidiennes et bihebdomadaires), grâce au soutien d'une caractérisation climatique précise de la zone d'étude. Cette méthode permet également de mettre en œuvre les données de densité de neige enregistrées au sol afin d'améliorer sa résolution spatiale (Baronetti *et al.*, 2019). Il est possible d'éliminer les problèmes causés par les données manquantes avec une estimation précise des observations manquantes en utilisant les méthodes de reconstruction (Acquaotta *et al.*, 2009).

Avoir une base de données de haute qualité est une condition nécessaire pour étudier les variations climatiques dans un lieu, une nation ou un continent. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) est consciente de l'importance d'identifier les facteurs non climatiques qui peuvent modifier les valeurs enregistrées des variables météorologiques. D'après cela, l'OMM a rédigé un ensemble de directives reconnaissant la nécessité pour les Services météorologiques nationaux d'améliorer les bases de données gérant ce type d'informations. L'une de ces lignes directrices souligne que ce travail peut être effectué en utilisant des observations parallèles. La comparaison entre des séries de température (CoTemp), des séries de précipitations (CoRain) et des précipitations avec les données du radar météorologique (Cond Merg) sont des logiciels gratuits et open source écrits en langage R qui aident à identifier les discontinuités causées par des facteurs non climatiques, comme par exemple le changement d'instrumentation, le changement de positionnement ou le changement de réseau. Tous les algorithmes mentionnés travaillent sur des séries parallèles avec une période de chevauchement d'au moins 1 an (Guenzi *et al.*, 2017a et 2017b ; Guenzi *et al.*, 2020).

Les longs enregistrements météorologiques homogènes sont une exigence de base pour évaluer le bon fonctionnement des variables dans le temps et comparer les stations de mesure et les zones géographiques. Une série homogène est définie comme une série où les variations ne sont causées que par des variations du climat (Aguilar *et al.*, 2003). D'autres variations non naturelles sont appelées inhomogénéités, ce qui peut conduire à des interprétations erronées du climat étudié. Ainsi, avant d'utiliser des données climatologiques, en particulier dans les études sur le changement climatique, une évaluation du contrôle de la qualité et de l'homogénéité de l'ensemble de données est obligatoire. Le grand nombre de méthodes mensuelles d'homogénéisation et la nécessité d'une étude comparative ont été la raison pour laquelle est née une initiative européenne coordonnée, le COST Action HOME ES0601 : les progrès des MEthods de HOmogenization des séries climatiques : (HOME). Son objectif principal était d'examiner et d'améliorer les méthodes communes d'homogénéisation et d'évaluer leur impact sur les séries météorologiques climatiques (Venema *et al.*, 2012). Le projet a produit un logiciel qui est une synthèse des meilleurs aspects des méthodes les plus efficaces : HOMER (HOMogenizaton softwarE in R). C'est un logiciel d'homogénéisation des variables climatiques essentielles à des échelles de temps mensuelles et annuelles. HOMER a été construit en exploitant les meilleures caractéristiques de certaines autres méthodes d'homogénéisation, c'est-à-dire ACMANT (Domonkos, 2011), CLIMATOL (Guijarro, 2014) sans exclure SPLIDHOM et RHtestsV4 (Fortin *et al.*, 2017). Différentes techniques d'ajustement de l'homogénéité produisent naturellement des résultats différents. Décider quelle technique, variante d'une technique ou combinaison de techniques est la meilleure peut être difficile et dépend de la tâche et des ressources disponibles (Fig.1). Une fois qu'une base de données de haute qualité et densité a été obtenue, elle est traitée afin d'identifier les tendances des principales variables climatiques à une échelle mensuelle, saisonnière et annuelle. Le test de Mann-Kendall (Mann, 1945) et la méthode Sense (Sirois, 1998) sont analysés afin d'identifier respectivement la signification statistique fixée à 95% et la positivité ou la négativité de la tendance (Terzago *et al.*, 2013).

Il existe un consensus général au sein de la communauté climatique selon lequel tout changement dans la fréquence ou la gravité des événements climatiques extrêmes aurait des répercussions profondes sur la nature et la société. Il est donc très important d'analyser les événements extrêmes en utilisant les indices climatiques. L'équipe conjointe d'experts sur les indices de détection des changements climatiques (ETCCDI) a abordé la mesure objective pour la caractérisation de la variabilité et du changement climatiques afin de calculer et d'analyser 27 indices (Baronetti *et al.*, 2018 ; Murara *et al.*, 2019 ; Zandonadi *et al.*, 2016 ; Acquaotta *et al.*, 2015). Ils sont basés sur les valeurs quotidiennes de températures, des précipitations et de la neige. Certains sont basés sur des seuils fixes qui sont pertinents pour une application particulière.

D'autres indices très importants et actuels de ces dernières années sont ceux qui montrent des conditions de sécheresse : Indice des Précipitations Standardisé (SPI, McKee *et al.*, 1993) et indice d'évapotranspiration normalisé des précipitations (SPEI, Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Les indices suivants ont été calculés à différentes échelles temporelles (12, 24, 36 mois) afin de mieux caractériser les épisodes de sécheresse extrême dans le nord de l'Italie et de la Sardaigne et d'évaluer leur évolution temporelle et leur corrélation avec la circulation atmosphérique (Falzoi *et al.*, 2019b ; Baronetti *et al.*, 2020).

La base de données fiable et de haute qualité adoptée par les auteurs s'est avérée très utile pour mettre en œuvre des connaissances sur les relations, par exemple, entre le climat et la santé (Scovronick *et al.*, 2018 ; Giaccone *et al.*, 2019), entre le climat et la dégradation du pergélisol en milieu périglaciaire (Colombo *et al.*, 2016).

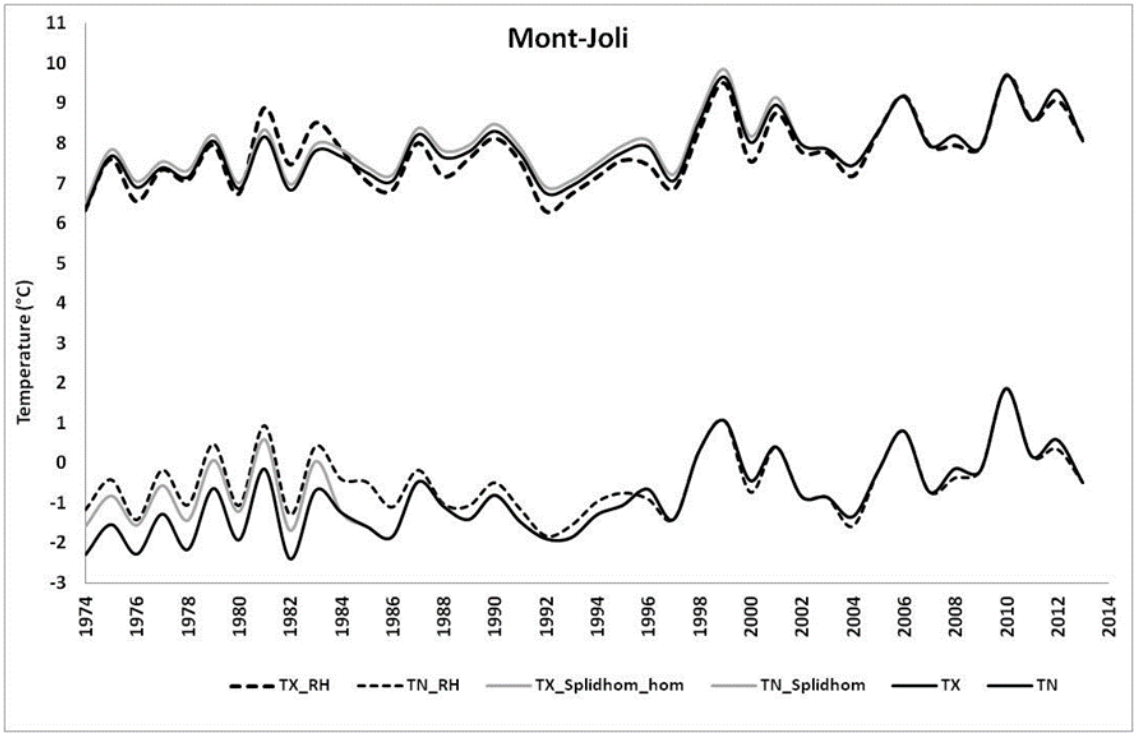


Figure 1. Moyenne annuelle des températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes (ligne noire) pour Mont-Joli (Canada) avant et après l'homogénéisation des séries avec RHtestsV4 (ligne pointillée) et SPLIDHOM test (ligne grise) (Fortin *et al.*, 2017)

Conclusions

Il existe un consensus général au sein de la communauté climatique sur le fait que toutes les modifications de la fréquence ou de la gravité d'événements climatiques extrêmes auraient de profondes répercussions sur l'environnement et la société. La création d'archives d'ensembles de données à long terme, fiables et de haute qualité permet de comprendre, d'identifier, de prévoir et de réagir à la variabilité et aux changements climatiques, ainsi qu'à leur impact sur les systèmes socio-économiques fragiles.

Il est important de préserver les données d'origine ainsi que les données homogénéisées. En effet, les données originales doivent être préservées parce que des approches nouvelles et meilleures d'ajustements d'homogénéité seront probablement développés dans un proche avenir.

Le riche héritage de données climatologiques est encore largement sous exploité, en dépit des efforts déployés dans le passé pour suivre consciencieusement l'atmosphère et actuellement le besoin urgent de développer de longues séries climatologiques fiables et de grande qualité afin de mieux comprendre, détecter, prévoir et atténuer la variabilité et le changement climatiques et leurs impacts sur les systèmes socioéconomiques fragiles. De tels jeux de données ne sont pas seulement d'une immense valeur scientifique, ils offrent aussi d'ultimes avantages politiques, sociaux et économiques.

Bibliographie

Acquaotta F., Fratianni S., Cassardo C., Cremonini R., 2009. On the continuity and climatic variability of the meteorological stations in Torino, Asti, Vercelli and Oropa. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 103, 279-287. Doi: 10.1007/s00703-008-0333-4.

Acquaotta F., Fratianni S., 2015. The importance of the quality and reliability of the historical time series for the study of climate change. *Revista Brasileira de Climatologia*, 14, 20-38. ISSN: 1980-055X.

Acquaotta F., Fratianni S., Garzena D., 2015. Temperature changes in the North-Western Italian Alps from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 619-634. Doi: 10.1007/s00704-014-1316-7.

Acquaotta F., Fratianni S., Venema V., 2016. Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. *International Journal of Climatology*, 36 (12), 3963-3974. Doi: 10.1002/joc.4606.

Acquaotta F., Faccini F., Fratianni S., Paliaga G., Sacchini A., 2018. Rainfall intensity in the Genoa Metropolitan Area (Northern Mediterranean): secular variations and consequences. *Weather*, 99. Doi:10.1002/wea.3208.

Acquaotta F., Fratianni S., Aguilar E., Fortin G., 2019. Influence of instrumentation on long temperature time series. *Climatic Change*, 1-20, ISSN: 0165-0009. Doi: 10.1007/s10584-019-02545-z

Aguilar E., Auer I., Brunet M., Peterson T. C., Wieringa, J., 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorological Organization, WMO-TD No. 1186, WCDMP No. 53, Geneva, Switzerland, p.55.

Alexander L., Yang H., Perkins S., 2013. *ClimPact. Indices and software*. World Climate Programme. New South Wales University of Technology, 52p.

Baronetti A, Acquaotta F., Fratianni S., 2018. Rainfall variability from a dense rain gauge network in North-West Italy. *Climate Research*, 75, 201-213. Doi: https://doi.org/10.3354/cr01517.

Baronetti A., Fratianni S., Acquaotta F., Fortin G., 2019. A quality control approach to better characterize the spatial distribution of snow depth over New Brunswick. Canada. *International Journal of Climatology*, 39(14)? 5470-5485.

Baronetti A., González-Hidalgo J.C., Vicente-Serrano S.M., Acquaotta F., Fratianni S., 2020. A weekly spatio-temporal distribution of drought events over the Po Plain (North Italy) in the last five decades. *International Journal of Climatology*, 1-14. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.6467.

Domonkos P., 2011. Adapted Caussinus-Mestre Algorithm for homogenizing Networks of Temperature series (ACMANT). *Int. J. Geosci.,* 2: 293–309. Doi: 10.4236/ijg.2011.23032.

Colombo N., Giaccone E., Paro L., Buffa G., Fratianni S., 2016. The recent transition from glacial to periglacial environment in a high altitude alpine basin (Sabbione basin, North-Western Italian Alps). Preliminary outcomes from a multidisciplinary approach. *Geog. Fis. Dinam. Quatern.,* 39 (1): 21-36. ISSN: 1724-4781 ; Doi: 10.4461/GFDQ.2016.39.3

Falzoi S., Gleeson E., Lambkin K., Zimmermann J., Marwaha R., O'Hara R., Green S., Fratianni S., 2019a. Analysis of the severe drought in Ireland in 2018. *Weather*, 74(11): 368-373. Doi: 10.1002/wea.3587.

Falzoi S., Acquaotta F., Pulina M.A., Fratianni S., 2019b. Hydrological drought analysis in Continental Temperate and Mediterranean environment during the period 1981-2017. *Italian J. Agrometeorol.,* 3: 13-23. Doi: 10.13128/ijam-798.

Fratianni S., Terzago S., Acquaotta F., Faletto M., Garzena D., Prola M.C., Barbero S., 2015. How Snow and Its Physical Properties Change in a Changing Climate Alpine Context? In: *Engineering Geology for Society and Territory* - Vol. 1, 57-60, New York, Springer. ISBN: 9783319092997 ; Doi: 10.1007/978-3-319-09300-0_11.

Fratianni S., Terzago S., Acquaotta F., 2017. The Climate of Italy. In *Landscapes and Landforms of Italy*. Vol. 1, 1-290, coll. World Geomorphological Landscapes, New York: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-26192-8, ISSN: 2213-2090 ; Doi: 10.1007/978-3-319-26194-2.

Fortin G., Acquaotta F., Fratianni S., 2017. The evolution of temperature extremes in the Gaspé Peninsula, Quebec, Canada (1974–2013). *Theoretical and Applied Climatology*, 130: 163-172. ISSN: 0177-798X ; Doi: 10.1007/s00704-016-1859-x20 2016.

Giaccone E., Colombo N., Acquaotta F., Paro L., Fratianni S., 2016. Climate variations in a high altitude Alpine basin and their effects on a glacial environment (Italian Western Alps). *Atmosfera*, 28: 117-128. ISSN: 0187-6236 ; Doi: 10.1016/S0187-6236(15)30004-7.

Giaccone E, Fratianni S, Cortesi N, González-Hidalgo J.C., 2019. Surface ozone concentration and its relation with weather types in NW Italy, 2003-2014. *Climate research*, 77: 77-89. Doi: 10.3354/cr01546

Göktürk O. M., Bozkurt D., Şen O. L., Karaca M., 2008. Quality control and homogeneity of Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*, 22 (16): 3210–3218, DOI: 10.1002/hyp.6915

Guenzi D., Acquaotta F., Garzena D., Baronetti A., Fratianni S., 2020. An algorithm for daily temperature comparison: co. temp-comparing series of temperature. *Earth Science Informatics*, 1–6. Doi: https://doi.org/10.1007/s12145-019- 00414-y.

Guenzi D., Fratianni S., Boraso R., Cremonini R., 2017a. CondMerg: an open source implementation in R language of conditional merging for weather radars and rain gauges observations. *Earth Science Informatics*, 10: 127-135. ISSN: 1865-0473 ; Doi: 10.1007/s12145-016-0278-y16 2017.

Guenzi, D., Acquaotta, F., Garzena, D., Fratianni, S., 2017b. CoRain: a free and open source software for rain series comparison. *Earth Science Informatics*, 10(3): 405-416.

Guijarro J. A., 2014. *User's guide to climatol.* An R contributed package for homogenization of climatological series. Report, State Meteorological Agency, Balearic Islands Office, Spain. URL: http://webs.ono.com/climatol/climatol.html

Juřicová S., Fratianni S., 2018. Climate change and its relation to the fluctuation in glacier mass balance in the Cordillera Blanca, Peru: A review. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*, 53: 106-118. ISSN: 0300-5402 ; Doi: 10.14712/23361980.2018.108 2018.

Mann H.B., 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13: 245–259. Doi: 10.2307/1907187.

McKee T.B.N., Doesken J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to timescales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Boston, American Meteorological Society, 179–184.

Murara P., Acquaotta F., Garzena D., Fratianni S., 2019. Daily precipitation extremes and their variations in the Itajaí River Basin, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131: 1145-1156. ISSN: 0177-7971 ; Doi: 10.1007/s00703-018-0627-0.

Nigrelli G., Fratianni S., Zampollo A., Turconi L., Chiarle M., 2018. The altitudinal temperature lapse rates applied to high elevation rockfalls studies in the Western European Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 131: 1479-1491. Doi: 10.1007/s00704-017-2066-019 2017.

Scovronick N., Sera F., Acquaotta F., Garzena D., Fratianni S., Wright C., Gasparrini A., 2018. The association between ambient temperature and mortality in South Africa: A time-series analysis. *Environmental Research*, 161, 229-235. ISSN: 0013-9351 ; Doi: 10.1016/j.envres.2017.11.001.

Sirois A., 1998. A brief and biased overview of time series or how to find that evasive trend. In: WMO Report No. 133: WMO/EMEP Workshop on Advanced Statistical Methods and their Application to Air Quality Data sets, Helsinki.

Stepanek P., 2008. *ProClimDB – software for processing climatological datasets*. CHMI, regional office Brno. URL: http://www.climahom.eu/ProcData.html, 2008.

Terzago S., Fratianni S., Cremonini R., 2013. Winter precipitation in Western Italian Alps (1926-2010): trends and connections with the North Atlantic/Arctic Oscillation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 704: 125-136. ISSN: 0177-7971.

Venema V. K. C., *et al*., 2012. Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past*, 8: 89–115. Doi: 10.5194/cp-8-89-2012.

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696–1718.

Zandonadi L., Acquaotta F., Fratianni S., Zavattini J.A., 2016. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paranà river basin). *Theoretical and Applied Climatology*, 123 : 741-756. Doi: 10.1007/s00704-015-1391-4

Zhang X. & Yang F. (2004). *RClimDex (1.0)* Software.

COUPLAGE DE MATERIAUX FRAIS, PERMEABLES ET ARROSAGE URBAIN : EVALUATION D'UN DEMONSTRATEUR D'ILOT DE FRAICHEUR URBAIN

FRERE M.[1], HENDEL M.[1,2], ROYON L.[1]

1 Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, Paris, France (maxime.frere77@gmail.com)
2 Université Paris-Est, ESIEE Paris, Département SEN, Paris, France

Résumé : *Il est prévu que le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des canicules dans de nombreuses régions du monde. Les villes recherchent donc des solutions d'adaptation afin de limiter l'impact de ces événements. Plus particulièrement, plusieurs techniques existent pour les revêtements au sol : matériaux réfléchissants ou perméables par exemple. D'autres solutions telles que la végétalisation ou l'arrosage urbain sont également envisagées. La communication proposée ici porte sur l'analyse de la performance microclimatique d'un démonstrateur expérimental construit par Eiffage Route couplant matériaux frais, perméables et arrosage urbain de surfaces horizontales. Il ressort qu'il est préférable de choisir la nature et la colorimétrie de manière pertinente, permettant un gain maximum de 0,9°C sur la température ambiante et de 6,1°C sur l'UTCI. Alors que les solutions par humidification nous amènent à 1,2°C sur la température ambiante et de 2,4°C sur l'UTCI.*

Mots clefs : *îlot de chaleur urbain ; matériaux perméables ; matériaux réfléchissants ; arrosage urbain*

Summary: ***Coupling fresh, permeable materials and urban watering: evaluation of an urban freshness island demonstrator.*** *Climate change is projected to increase the frequency and intensity of heat waves in many parts of the world. Cities are therefore looking for adaptation solutions to limit the impact of these events. In particular, several techniques exist for floor coverings: reflective or permeable materials, for example. Other solutions such as greening or urban watering are also being considered. The communication proposed here concerns the analysis of the microclimatic performance of an experimental demonstrator built by Eiffage Route coupling fresh, permeable materials and urban watering of horizontal surfaces. From this study it appears that it is preferable to choose the nature and colorimetry in a relevant way, allowing a maximum gain of 0.9°C on ambient temperature and 6.1°C on UTCI. Whereas solutions by humidification bring us to 1.2°C on ambient temperature and 2.4°C on UTCI.*

Key words: *urban heat island; permeable materials; reflective materials; urban watering*

Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique, la plupart des villes sont dans une période de réflexion afin de proposer des solutions pour lutter contre les problèmes d'îlots de chaleurs urbains (Bigorgne *et al.*, 2012). C'est dans ce contexte que l'entreprise Eiffage a souhaité développer un démonstrateur qui permet d'évaluer, dans un espace extérieur, différents types de matériaux et des procédés susceptibles d'induire un rafraichissement en période de canicule. Une première phase d'expérimentation a été entreprise l'été 2019 dans cet espace, situé dans le sud de la France à Hyères. Ces enrobés bitumineux sont composés de granulat, dont plusieurs dimensions sont utilisées en fonction des usages ces diamètres de grain vont constituer la granulométrie. Cette dernière est caractérisée par deux diamètres un minimal et un maximal en millimètre, usuellement noté [0/10] ou [6/10]. A cela s'ajoute un liant permettant de maintenir l'ensemble, tout en gardant une certaine souplesse, ce dernier est usuellement issu de substrat de l'industrie pétrolière, mais il existe aussi des liant de nature végétal, pois ou algue et d'autre issu de résine. Puis vient la possibilité de coloré les liants et de choisir la nature du granulat (éruptive, métamorphique, sédimentaire et carbonaté) pour obtenir un panel de revêtement de surface horizontal aux propriété différentes et s'adaptant aux usages.

L'article se focalise sur l'étude du comportement thermique, microclimatique et la création d'îlot de fraîcheur urbain. En s'intéressant principalement à l'impact des revêtements de sol, en effet Eiffage route étant spécialisé dans ce domaine et notamment dans les Béton Bitumineux (B.B.) qui corresponde à nos routes.

1. Données et Méthodes

1.1. Le démonstrateur

Cet ouvrage faisant 10m x 10m avec une enceinte en U de 2,5m de hauteur, orienté plein sud. Il a pour but de tester les solutions routières et d'aménagement dans un cadre microclimatique et de confort thermique, ce dernier dispose d'un dispositif générant un écoulement sur la surface horizontale présente au sein de l'enceinte (Illustration de gauche). Cette dernière possède malgré tout une légère pente pour permettre l'écoulement.

Les cycles d'eaux étudiés ont été des écoulements de 15min avec 45min de séchage, de 8h jusqu'à 18h. L'humidification de surface s'effectue par débordement à l'aide d'un caniveau situé en amont du revêtement, puis l'excédent d'eau est récupéré dans le caniveau situé en aval pour rejoindre la cuve qui alimente le caniveau de débordement, autorisant ainsi un fonctionnement en circuit fermé.

1.2. Le protocole microclimatique

L'ensemble du protocole d'étude suit les méthodes explicitées par Hendel *et al.* (2015) et amélioré par Parison *et al.* (2020), afin de caractériser l'impact de l'humidification des revêtements. Ainsi des stations d'études similaires ont été utilisé, dont une situé au sein du démonstrateur et l'autre situé à 100m (Fig.1). Deux phases d'études ont été effectué, une avec le revêtement noir dit classique B.B. [0/10] (Mai 2019 – Juillet 2019) et l'autre avec le revêtement drainant clair B.Dr. (30% de vide) (Aout 2019 – Septembre 2019).

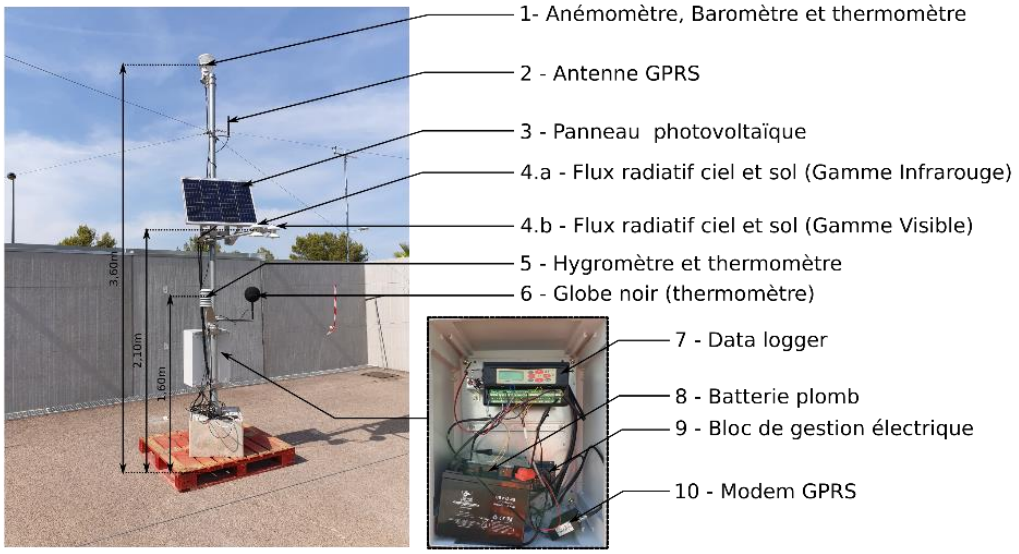


Figure 1. Représentation des équipements présent sur les stations d'études microclimatiques.

La zone climatique locale (LCZ) (Stewart and Oke, 2012) correspond à un site industriel LCZ 8, sachant que ce dernier est entouré au nord-ouest d'une zone agricole LCZ 8D, d'une zone d'activités LCZ8 au nord-est et d'une forêt LCZ A au sud.

1.3. L'albédo des revêtements

A cela s'ajoute une étude albédo-métrique (E1918-16), qui représente au final un des paramètres clef pour générer un îlot de fraicheur. Ainsi pour les deux revêtements étudiés ces valeurs étaient : Pour le B.B. [0/10] Noir de 0,09 et le Drainant de 0,13.

2. Résultats

2.1. La température de surface

L'étude de l'évaporation, par le biais de caméra I.R., a mis en évidence, que le refroidissement de la surface est constant tant que la surface reste humide. Autorisant ainsi un refroidissement effectif de 15°C de la surface, pendant une période de 30 minutes aux heures les plus chaudes. L'autre point mis en évidence est que le milieu drainant parvient à faire perdurer un effet rafraichissant, moindre (~5°C), par le biais de l'eau en rétention sous la surface sèche.

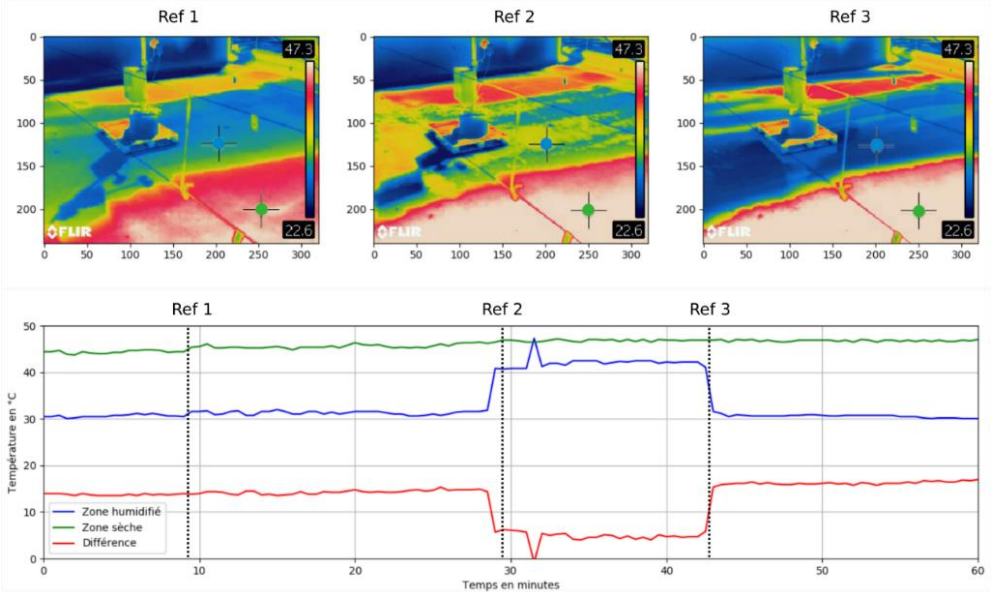


Figure 2. Etude de la température de surface lors des phases d'évaporations. Le zéro temporel correspond à la fin de l'arrosage (15/45), La position Ref 3 correspond au redémarrage de l'humidification de surface. Un cliché à été pris toutes les 30 secondes.

2.2. L'impact microclimatique

Les mesures effectuées nous ont ainsi permis de quantifier l'impact du revêtement drainant clair par rapport au revêtement classique B.B. [0/10] noir, ainsi que le comportement de ces derniers face à une humidification. Ainsi après avoir collecté suffisamment de données en journée radiative, en ayant humidifié le revêtement et sans humidification, pour définir une référence. Suite à cela, en fonction des groupes (référence, humidifié, avant changement de revêtement etc.…), un regroupement est fait : toutes les journées d'un même groupe et d'une même station sont ramener à une seule journée moyennée, pour chaque minute de la journée.

Cela nous donne ainsi quatre lots de données : jours d'études station d'étude E1, jours d'études station de référence E2, jours de références station d'étude R1 et jours de références station de référence R2. Puis on effectue l'opération suivante sur le paramètre qui nous intéresse : E2 – E1 = E et R2 – R1 = R puis on effectue R – E, ce différentiel sera en mesure de caractériser les effets du changement sur le milieu, tout en éliminant les effets des paramètres non contrôlables tel que le vent et autres variations de conditions environnementales.

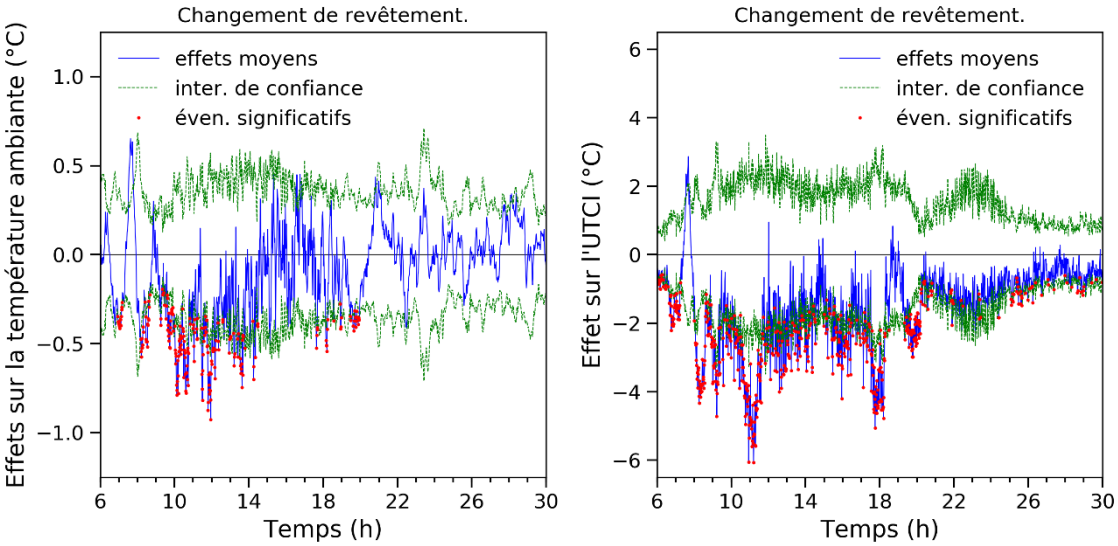


Figure 3. Caractérisation des impacts sur la température, à gauche, et sur l'UTCI. Pour le passage d'un revêtement noir BB0/6 à un revêtement drainant clair, l'ensemble des capteurs se trouvent à 1,60m.

En appliquant la méthode du modèle linéaire à effet fixe (Parison, Hendel, & Royon, 2020) Nous parvenons à montrer dans un premier temps l'impact positif que représente un choix de matériaux claire (Fig.3), l'impact de l'humidification dans cette configuration (Fig.4) et finalement l'impact globale du dispositif (Fig.5). Les valeurs clefs associées à ces graphiques sont représenté dans le Tableau 4. Il a été choisi de représenté l'UTCI, cette température équivalente prenant en compte l'ensemble des paramètres climatiques et un modèle morphologique, autorisant ainsi une bonne synthétisation des résultats.

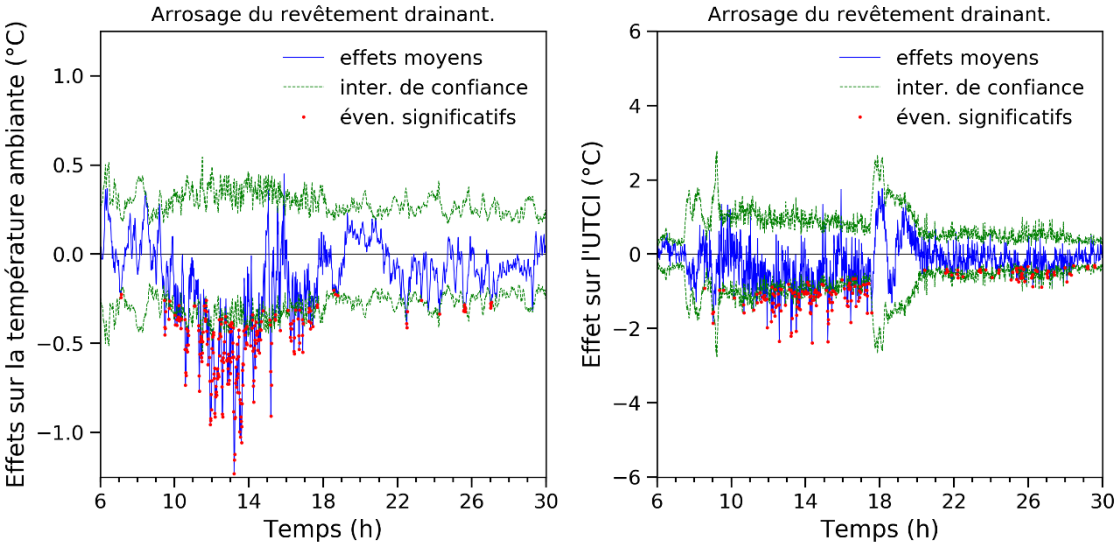


Figure 4. Caractérisation des impacts sur la température, à gauche, et sur l'UTCI, à droite. Pour le passage du B.B. [0/10] au revêtement drainant., l'ensemble des capteurs se trouve à 1,60m

Un premier constat est que le changement de revêtement, bien qu'ayant un effet moindre sur la température ambiante que l'effet de l'arrosage urbain, à un effet marqué sur l'UTCI qui prend en compte les aspects radiatifs environnants. Cela peut s'expliquer par la différence d'albédo entre les deux matériaux le revêtement drainant étant plus clair (0.13 contre 0.09). En parallèle bien que l'arrosage montre un effet plus important sur la température son impacte final sur la température équivalente UTCI reste moindre.

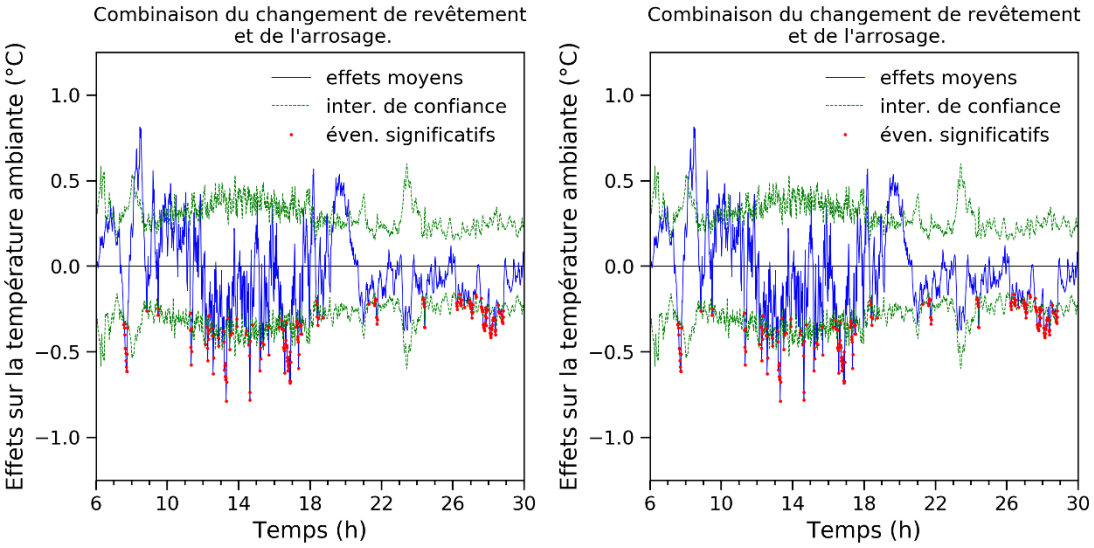


Figure 5. Caractérisation des impacts sur la température, à gauche, et sur l'UTCI, à droite. Entre le revêtement drainant humidifié et le B.B[0/6] Noir, l'ensemble des capteurs se trouve à 1,60m.

Finalement la combinaison du changement et de l'arrosage permet d'avoir des effets rafraichissants plus marqué en fin de journée par rapport au changement de revêtement seul. Il est important de garder en tête que cette étude nécessite d'être poursuivit notamment pour obtenir un nombre plus important de journées radiatives d'études pour le revêtement drainant humidifié, afin d'obtenir un minimum de 10 jours utilisables.

Tableau 4. Valeurs de complément d'information associé aux différents test statistique effectué.

Etude	Paramètre	Effet Maximum	Heure du maximum	Effet moyen	N_{ref}	$N_{étude}$
Arrosage drainant	**T_{air}**	-1.2°C	13h09m	-0.5°C	14	8
	UTCI	-2.4°C	14h26m	-0.9°C	14	8
Changement de revêtement	**T_{air}**	-0.9°C	12h01m	-0.4°C	15	14
	UTCI	-6.1°C	11h15m	-2.5°C	15	14
Impact total	**T_{air}**	-0.8°C	13h05m	-0.1°C	15	8
	UTCI	-6.1°C	17h58m	-2,1°C	15	8

Conclusions et Discussion

L'ensemble de cette étude a permis de mettre en avant l'importance de choisir un revêtement clair, tout en restant dans la limite non éblouissante. Le milieu drainant, tant qu'à lui, par sa capacité de rétention permet de prolonger le phénomène d'évaporation.

Il est clair, en revanche, qu'il est préférable de choisir un bon revêtement, autorisant un gain de 6.1°C sur l'UTCI, que de déployer des solutions d'arrosages, amenant à seulement un gain de 2.4°C sur cette température équivalente. Bien que ces dernières permettent malgré tout de limiter l'échauffement global son impact est négligeable devant l'impact du changement de revêtement.

L'analyse de l'impact sur l'air demande de récolter plus de données notamment sur l'été 2020 afin d'augmenter la fiabilité statistique de cette étude. En plus de cela l'étude se poursuivra sur l'impact que peut avoir la végétation sur ce démonstrateur.

Offrant ainsi la possibilité de caractériser les performances gagner par le passage de la solution d'enrobé noir classique à une solution complète de lutte contre les problématiques des Ilots de chaleurs urbains.

Bibliographie

Bigorgne J., Alba D., & Blancot C., 2012. *Les îlots de chaleur urbains à Paris*. Cahier n°1 à 5. APUR, 35p.

E1918-16. (s.d.). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped surface in the Field.

Hendel M., Royon L., & Y., D., 2015. Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation : A Study of its Cooling Effects and Water Consumption in Paris. Sorbonne Paris Cité.

Parison S., Hendel M., & Royon L., 2020. An Updated Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques (In review).

Stewart I.D. & Oke T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. University of British Columbia

PRECIPITATION EXTREMES AND THEIR TRENDS IN THE AMAZON REGION (1981-2018)

FUNATSU B.M.[1], ARVOR D.[2], DUBREUIL V.[2], RONCHAIL J.[3], ESPINOZA J.C.[4], MICHOT V.[5]

1 CNRS, Université de Nantes, UMR 6554 LETG, Nantes, France (beatriz.funatsu@univ-nantes.fr)
2 CNRS, Université Rennes 2, UMR 6554 LETG COSTEL, Rennes, France
3 Université Paris Diderot, GHES, UMR 7159 LOCEAN, Paris, France
4 Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú
5 Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS/IPSL, UVSQ, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS), Guyancourt, France

Summary: *Precipitation extremes are analysed using CHIRPS dataset, which combines fine spatial resolution satellite imagery and in-situ station data with substantial temporal depth (1981-2018) to examine whether significant trends are detected. The analysis was performed based on a set of absolute, threshold, duration, and percentile-based threshold indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI. Significant trends were found for all indices, but trends show large spatial heterogeneity. In northern Bolivia and in the southern and eastern Amazon (notably within the so-called deforestation arc), rainfall intensity, heavy precipitation days, consecutive dry days and accumulated 5-day precipitation have all increased. In contrast, in southern Bolivia and in several areas within the Amazonas state, rainfall intensity, heavy precipitation days and accumulated 5-day precipitation have decreased. Seasonal variability of trends is more pronounced in the Southern Amazon.*

Key words: *precipitation extremes; Amazon region; trends; climatology; land cover changes*

Résumé : ***Les extrêmes pluviométriques et leurs tendances dans la région amazonienne (1981-2018).*** *Les tendances temporelles des extrêmes de précipitations sont estimées pour la période 1981-2018 à partir des données CHIRPS, qui combinent l'imagerie satellite à résolution spatiale fine et les données de stations in situ. L'analyse a été effectuée sur la base d'un ensemble d'indices de seuil, de durée et de centiles définis par l'Équipe ETCCDI. Des tendances significatives ont été trouvées pour tous les indices, mais elles montrent une grande hétérogénéité spatiale. Dans le nord de la Bolivie et dans le sud et l'est de l'Amazonie (notamment dans la région de l'arc de déforestation), l'intensité des précipitations, les fortes précipitations, les jours de sécheresse consécutifs et les précipitations cumulées sur 5 jours ont tous augmenté. En revanche, dans le sud de la Bolivie et dans plusieurs régions de l'État d'Amazonas, l'intensité des précipitations, les jours de fortes précipitations et les précipitations cumulées sur 5 jours ont diminué. La variabilité saisonnière des tendances est plus prononcée dans le sud de l'Amazonie.*

Mots clés : *précipitations extrêmes ; région amazonienne ; tendances ; climatologie ; changement de la couverture terrestre*

Introduction

Precipitation is the most important parameter that characterizes the climate in the Amazon region. Even though satellite based rainfall products provide spatial coverage, rainfall trends are difficult to assess partly due to the insufficient temporal depth. The recent release of in-situ and satellite data sets covering over more than 30 years emphasized changes in precipitation patterns in the Amazon with significant signals of increased precipitation in the northern Amazon and decreased rainfall in the south (Arvor *et al.* 2017, Espinoza *et al.* 2019). In addition, precipitation extremes, including 'once in a century' style floods or droughts, have been observed in the Amazon River with increasing frequency, most of which linked to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies that propagate into the atmosphere and modulate the large-scale precipitation in the Amazon basin (e.g., Espinoza *et al.* 2019 and references therein). In addition, local and long-range effects of deforestation, particularly in the southern and eastern parts of the Amazon region have the potential to exacerbate precipitation extremes forced by the atmosphere-ocean system, particularly in the dry season (Debortoli *et al.* 2017).

The objective of this work is to examine whether and where significant trends of precipitation extremes are detected. A uniform dataset with substantial temporal depth (37 years; 1981-2018) was used to perform a statistical analysis based on a set of indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) that comprise absolute, threshold, duration, and percentile-based threshold indices (e.g., Alexander *et al.*, 2006). Results are analyzed on annual and seasonal timescales, and links with large-scale atmospheric circulation and land cover changes will be discussed.

1. Data and Methods

1.1. CHIRPs

The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) rainfall gridded product combines fine spatial resolution satellite imagery and in-situ station data, providing gridded daily precipitation estimates (Funk *et al.*, 2015). We used Version 2 data from 1981 to 2018, at a spatial resolution of 0.25 × 0.25 degrees latitude/longitude; a 1-year period was defined from August to July the following year. This dataset has been validated and used for precipitation and drought monitoring in the African continent, and was recently used by Espinoza *et al.* (2019) to study trends in wet-day and dry-day frequency in the northern and southern parts of the Amazon region.

1.2. ETCCDI Extreme Precipitation Indices

The ETCCDI indices describe moderate climate extremes with reoccurrence times of a year or shorter. The list and definition of indices used in this study are presented in Table 1. For the CDD parameter (longest sequence of consecutive dry days), and for this parameter only, the period of January to December (instead of August to July) was considered in order to re-center the hydrological year on the southern Amazon dry season.

Table 1. List of precipitation extreme indices, definitions and units (Source: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml, accessed on 5 August 2019)

Index	*Index name*	*Definition*	*Units*
Rx5day	Max 5-day precipitation	Let RR_{kj} be the precipitation amount for the 5-day interval ending k, period j. Then maximum 5-day values for period j are: $Rx5day_j = max(RR_{kj})$	mm
R20mm	Very heavy precipitation days	Let RR_{ij} be the daily precipitation amount on day I in period j. Count the number of days where $RR_{ij} \geq 20mm$	mm
SDII	Simple daily intensity	Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on wet days, w($RR \geq 1mm$) in period j. If R1mmj represents the number of wet days in j, then $SDII_j = \left(\sum_1^{R1mm_j} RR_{wj}\right)/R1mm_j$	mm/day
CDD and CWD	Maximum number of consecutive dry or consecutive wet days	Let RRij be the daily precipitation amount on day I in period j. Count the largest number of consecutive days where RRij < 1mm (CDD) or RRij > 1mm (CWD)	days

R95wp	Very wet days	Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on a wet day w ($RR \geq 1mm$) in period j and let P95w be the 95th percentile of precipitation on wet days in the 1981-2018 period. If R1mm represents the number of wet days in the period, then $R95wp_j = \sum_1^{R1mmj} RR_{wj}$, where $RR_{wj} \geq P95w$	days

1.3. Statistical Analyses of Extreme Precipitation Indices

A linear regression was performed for each of the indices indicated in Table 1 for every grid point in the Amazon region (comprising both the Amazon Basin and the so-called Brazilian Amazon). The robustness of the trend was assessed by estimating the 95% confidence interval. In the following, only the regions with statistically significant trends will be discussed.

2. Results

2.1. Annual Precipitation Trends

Figure 1 shows the linear regression coefficients at each grid point in the domain, in annual time scale. The trends for total accumulated precipitation (Fig.1a) and very heavy precipitation days (R20mm, not shown) show a qualitatively similar spatial trend pattern, indicating a close link between them. The trend of the number of very wet days (R95pw; Fig.1b), 5-day accumulated precipitation (RX5day; Fig.1c) and annual SDII (not shown), also show qualitative agreement, and are in general congruent with the total precipitation trend: Positive trends at the northern and western parts of the basin, and negative trends in Brazil's Amazonas state and southern Bolivia. Significant CWD trends (Fig.1d) are mostly confined in the NE region, with longer wet-day periods, but clusters of significant negative trends are found in central and southeastern regions as well.

Figure 2 shows a time series of the precipitation indices for 4 areas where trends in total precipitation are rather uniform in one direction or another: northern Amazon, Brazilian Amazonas state, southern Amazon region and southern Bolivia. Figure 2 highlights both the general congruence of the trends (except for CWD) among the different indices, as well as the high interannual variability. Both CWD and CDD provide a distinct characterization of rainfall extremes, as they can rather be interpreted in terms of length of the rainy or dry seasons for regions where rainfall seasonality is marked. Although all regions present rainfall seasonality to a certain degree, this seasonality is very marked in the southern Amazon region (including Bolivia). For this reason, we explored in more detail seasonal variations of precipitation trends in this region in the next subsection. The weakening of PRCPTOT, R95pw, and Rx5day (as well for the annual SDII and R20mm, not shown) roughly coincides with the shortening of CWD along the same NW-SE axis, with a break over the state of Mato Grosso.

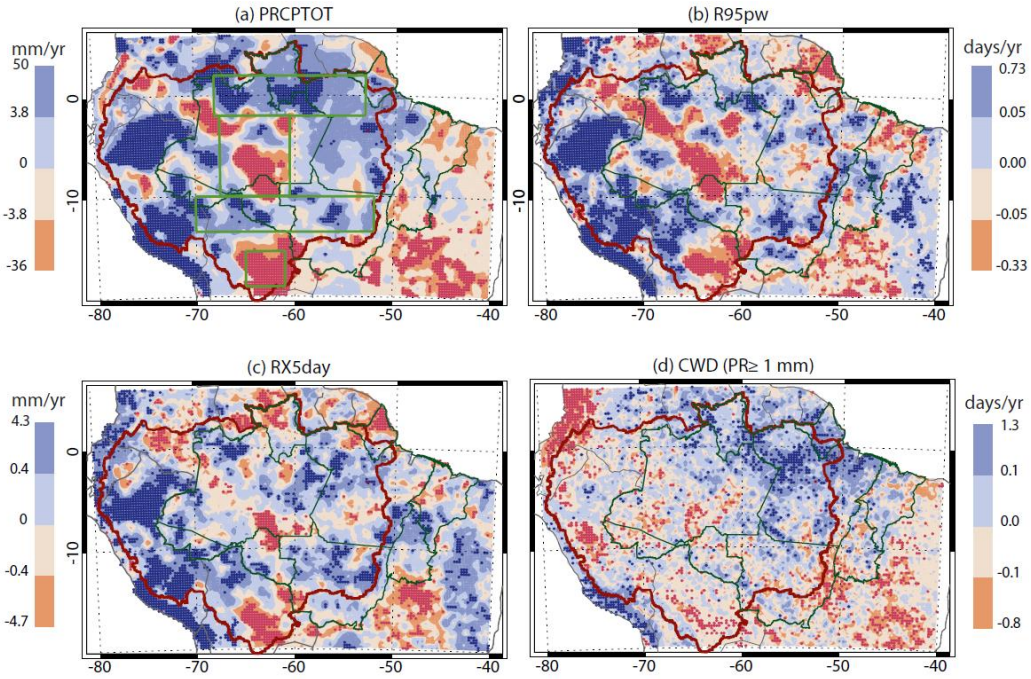


Figure 1. Spatial distribution of linear trends of (a) total annual precipitation (mm/yr), (b) R95w (days/yr), (c) Rx5day (mm/yr), and (d) CWD (days/yr). Green boxes in (a) define regions shown in Figure 2: Northern Amazon (N Amz) [2°N-2°S; 68°-53°W], Brazilian Amazonas State (C AM) [2°-10°S; 67.5-60.5°W], Southern Amazon (S Amz) [10-13.5°S; 70-52°W], and Southern Bolivia (S Bol) [15.5-19°S; 65-61°W]. Dark blue or red points indicate gridpoints where trends are significant at 95% confidence interval.

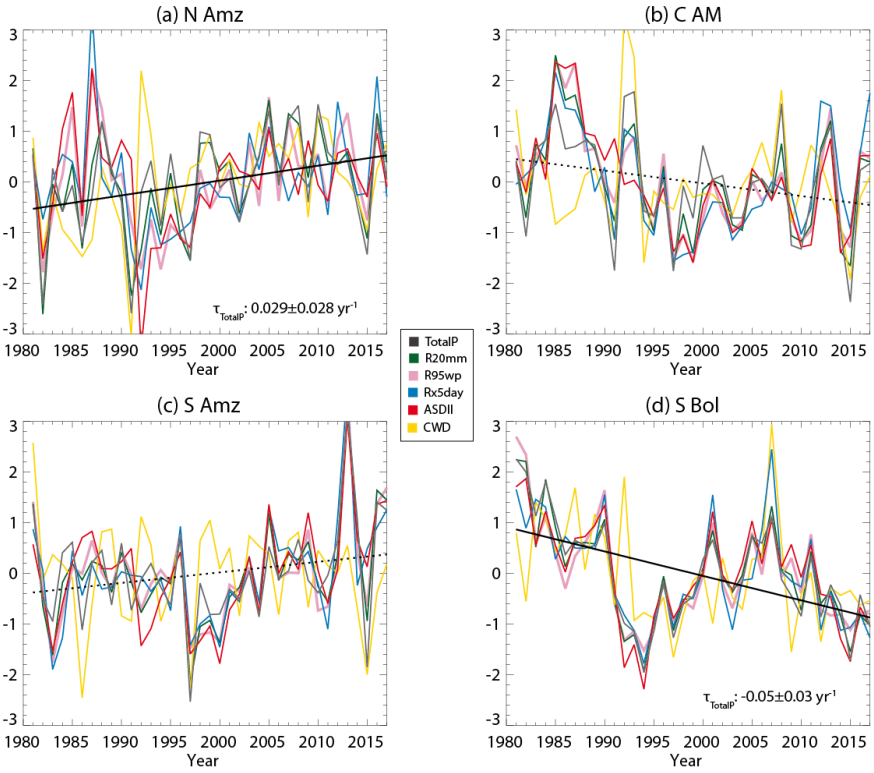


Figure 2. Time series of normalized indices indicated in the central legend box, averaged over the regions highlighted in Figure 1: (a) Northern Amazon, (b) Brazilian Amazonas State, (c) Southern Amazon, and (d) Southern Bolivia. Indices were normalized by removing the 37-year mean and dividing by the standard deviation. Black line denotes the linear regression for total precipitation, with solid lines indicating statistically significant trends (above 95% confidence interval), and dotted lines indicating non-significant trends.

2.2. Seasonal Trends in Southern Amazon

In the Southern Amazon region, rain seasonality is primarily controlled by the so-called South American Monsoon System (e.g., Vera *et al*. 2006), with rainfall concentrated during the austral summer season (December-January-February, or, DJF). Figure 3 shows that CDD has become longer by at least 4 days in the last 4 decades in southern Amazon and the eastern Legal Amazon states (Tocantins, Maranhão) in both June-July-August (JJA; Fig.3a) and September-October-November (SON; Fig.3b). A longer CDD in SON indicates a delayed onset of the rainy season in this region. Nevertheless, no indices were found to show significant trends (Fig.3b, c).

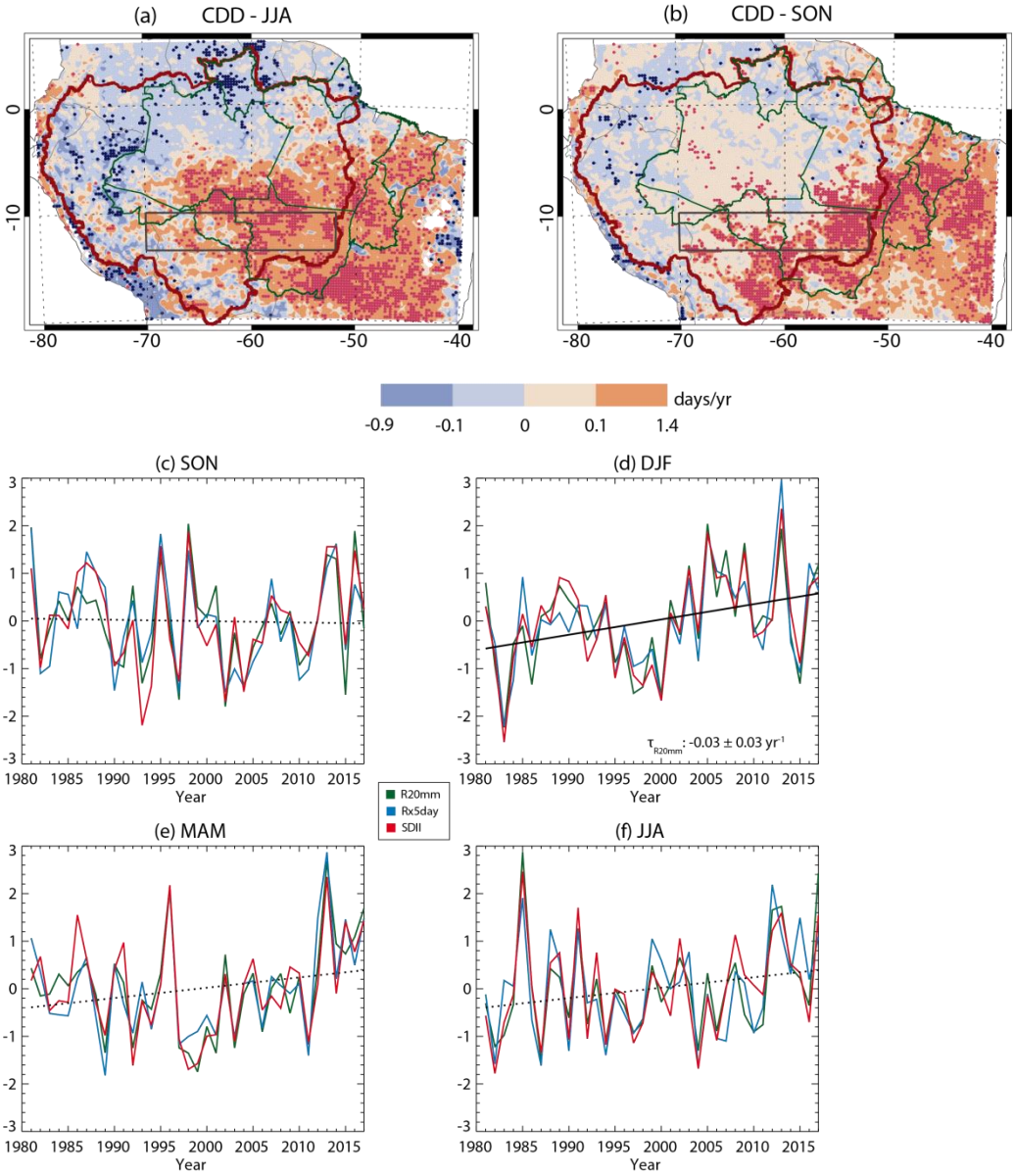


Figure 3. Spatial distribution of seasonal CDD trends for (a) JJA, and (b) SON; dark blue or red points indicate grid points where trends are significant at 95% confidence interval. Seasonal time series of normalized indices averaged over the Southern Amazon (dark box in (a) and (b)), for (c) SON, (d) DJF, (e) MAM and (f) JJA. Indices were normalized by removing the 37-year seasonal mean and dividing by the standard deviation. Black line denotes the linear regression for R20mm, with solid lines indicating statistically significant trends (above 95% confidence interval), and dotted lines indicating non-significant trends.

No significant trends were detected for CDD in either DJF or MAM (not shown). However, in the summer months (DJF) there is a significant increase in very heavy precipitation days (R20mmm) and in the seasonal rainfall intensity (SDII; Fig.3d). This result is in agreement with reports of perception of rain intensification by communities in these regions (Funatsu *et al.* 2019). It is worthwhile noting that trends of CWD shown in Figure 1 are very similar to those for DJF, where the longest sequence of consecutive wet days is usually found; no discernible trends of CWD were found for the other seasons as well. All R20mm, SDII and Rx5day show a slight increase in MAM (Fig.3e) and JJA (Fig.3f), but trends are not statistically robust.

Conclusions and Discussion

Extreme precipitation events have different facets and are challenging to characterize, and this is especially true in the Amazon region, where precipitation distribution and seasonality vary across the domain. Trends of extreme precipitation indices defined by the ETCDDI have nevertheless shown extended areas within which significant trends are found, notably increased extreme events in the northern (between 2°N and 2°S) and southern (between 10° and 13°S) Amazon and decreased extremes in southern Bolivia and central Amazon. In the Southern Amazon region, the present analysis corroborates previous studies that have pointed that the dry season has become drier and longer (e.g., Fu *et al.* 2013, Arvor *et al.* 2017, Espinoza *et al.* 2019), due to changes in atmospheric circulation (Espinoza *et al.*, 2019) possibly linked to climate change. Trends of increased dry periods are robust in the southern and eastern parts of the basin, overlapping in some areas with regions of historical land-cover changes (deforestation) particularly in Mato Grosso state; the extent of the dry season may also be exacerbated locally by deforestation (Debortoli *et al.* 2017), which is a topic that is currently under examination. Links of these trends with deep convection and large-scale atmospheric conditions are also being investigated.

Acknowledgements

This study has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and innovation programme under the Marie Skłodowska Curie grant agreement No 691053

Literature

Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., *et al*,. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109

Arvor D. Funatsu BM, Michot V. & Dubreuil V. 2017. Monitoring rainfall patterns in the Southern Amazon with PERSIANN-CDR data: Long-term characteristics and trends. *Remote Sensing*, 9, 889.

Debortoli NS, Dubreuil V, *et al.* 2017. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. *Int. J. Climatol.*, 37:2889-2900.

Espinoza J.C., Ronchail J., Marengo J.A. & Segura H., 2019. Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). *Clim. Dyn.*, 52, 5413-5430.

Fu R., Yin L., Li W., Arias P.A., Dickinson R.E., *et al.*, 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *PNAS*, 110, 18110–18115.

Funatsu B.M., Dubreuil V., *et al.*, 2019. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Gl. Environ. Ch.*, 57, 101923.

Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., Rowland J., Harrison L., Hoell A. & Michaelsen J., 2015. The climate hazards group infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066.

Vera C., Higgins W., Amador J., *et al.*, 2006. Toward a unified view of the American Monsoons Systems. *J. Clim.*, 19, 4977-5000.

DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE D'UN ÉVÉNEMENT EXTRÊME FROID : IMPACT DE LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE SUR LES BASSES TEMPÉRATURES EN BOURGOGNE VITICOLE

GAVRILESCU C.[1], RICHARD Y.[1], REGA M.[1], PLANCHON O.[1], BOIS B.[1,2]

1 CRC – UMR Biogeosciences, Université Bourgogne Franche-Comté / CNRS, Dijon, France
(catinca.gavrilescu@u-bourgogne.fr)
2 Institut Universitaire de la Vigne et du Vin, Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France

Résumé : *En avril 2019, la France a connu plusieurs épisodes de gel ayant occasionné des dégâts sur la quasi-totalité des régions vitivinicoles. En Bourgogne-Franche-Comté, les effets du gel ont revêtu un caractère très ponctuel, les plus forts dégâts étant observés dans les sous-régions viticoles très précoces de la Saône-et-Loire et du sud de la Côte de Beaune. Cette étude se focalise sur l'analyse multiscalaire de l'évènement gélif tardif survenu lors de la nuit du 4 et 5 avril sur une parcelle viticole localisée dans les Hautes Côtes de Beaune. L'analyse met en évidence l'impact des paramètres locaux (la topographie, les discontinuités de surface, etc.) sur la structuration spatio-temporelle des températures à l'échelle parcellaire. L'épisode de gel est caractérisé par des températures négatives, jusqu'à -3°C, accompagnées d'une très forte humidité relative de l'air (souvent 100%). Le temps est partiellement stable étant sur l'influence des conditions dépressionnaires marquées par une circulation atmosphérique en flux du sud-ouest.*

Mots clés : *extrêmes thermiques ; vagues de froid ; viticulture ; circulation atmosphérique ; impact physiologique*

Summary: ***Spatio-temporal dynamic of an extreme cold event: impact of atmospheric circulation on low temperatures in the wine-growing of Burgundy.*** *During April 2019 France experienced several frost events that caused extensive damage to almost all of its winegrowing regions. In Bourgogne-Franche-Comté the frost effects were very punctual and spatially diffused, the greatest damage being observed in the early bud breaking winegrowing sub-regions of Saône-et-Loire and the south of the Côte de Beaune. This study focuses on the multi-scalar analysis of the spring frost event underwent during the night between the 4th and 5th of April on a vineyard plot located in the Hautes Côtes de Beaune appellation. The analysis highlights the impact of local parameters (topography, surface discontinuity, etc.) on the spatio-temporal structuring of temperatures at a local scale. During the night temperatures drop to -3°C while the air relative humidity indicates a percentage close to full saturation. The weather is partially stable being under the influence of low-pressure conditions accompanied by a southwest atmospheric circulation.*

Key words: *extreme weather events; cold snap; viticulture; atmospheric circulation; physiological impact*

Introduction

Le climat joue un rôle majeur sur le développement phénologique de la vigne et la production du vin (van Leeuwen *et al.*, 2004). La vigne est intimement liée à son cadre environnemental, étant largement influencée par les variations de température pendant et hors la saison de végétation (Parker *et al.*, 2011). Aux latitudes moyennes, la culture de la vigne est essentiellement menacée par l'occurrence de phénomènes météorologiques extrêmes. Ces événements se caractérisent par un changement brutal de température, impactant la plante et générant des pertes de récolte/rendement (Madelin, 2007). Les *extrema* de température lors du débourrement de la vigne sont accompagnés de manière fréquente par des phénomènes de gel. Par conséquent, l'occurrence des gelées tardives peut mener à des blessures sur les tissus verts de la vigne, mais aussi à une diminution du nombre de grappes par pied de vigne (Trought *et al.*, 1999).

À l'échelle locale, les dommages liés à l'occurrence du gel tardif sont très variables sur des espaces relativement restreints (Cellier, 1989 ; Quénol, 2002). La localisation des dégâts est associée aux disparités spatiales de l'avancement phénologique de la vigne et de la géographie des températures nocturnes. Les contrastes spatiaux de température sont souvent engendrés par l'interaction complexe entre les paramètres de large et de fine échelle (Bonnefoy, 2013). Ainsi,

le risque de gel est fortement piloté non seulement par les différents aspects topographiques (altitude, inclinaison de la pente, orientation des coteaux, etc.) et les caractéristiques de surface (présence d'obstacles naturels ou anthropiques), mais aussi par la configuration atmosphérique (stable/perturbée) et la dynamique des masses d'air (l'origine du flux). Il est donc très important de comprendre la façon dont tous ces éléments du milieu physique interagissent à travers différents niveaux d'échelle afin de singulariser les situations qui conduisent au gel.

Le présent travail cherche à discerner la dynamique spatio-temporelle du risque lié à l'occurrence du gel aux échelles fines et son impact sur la vigne illustrée par l'évènement gélif survenu pendant la nuit du 04/05 avril 2019 sur le territoire de la région vitivinicole de Bourgogne-Franche-Comté. Plusieurs indicateurs climatiques ont été calculés à partir des données de température issues d'un réseau des capteurs déployé par le Centre de Recherche en Climatologie et caractérisé par une haute densité spatiale et une résolution temporelle fine.

1. Matériel et méthodes

L'étude de la variabilité locale du risque de gel a été menée au sein d'une parcelle viticole présentant de manière récurrente des dégâts liés au gel. La zone d'étude, composée d'une parcelle de vigne de 2,1 ha (cadre pointillé) et d'une friche de 2,4 ha (cadre plein), se trouve au milieu d'un espace forestier à proximité du village de Magny-lès-Villiers, Côte-d'Or, en appellation Hautes Côtes de Beaune (Fig.1). Une discontinuité spatiale sous forme d'un muret et d'une haie, localisés en aval de la parcelle viticole, sépare la parcelle des zones situées en contrebas.

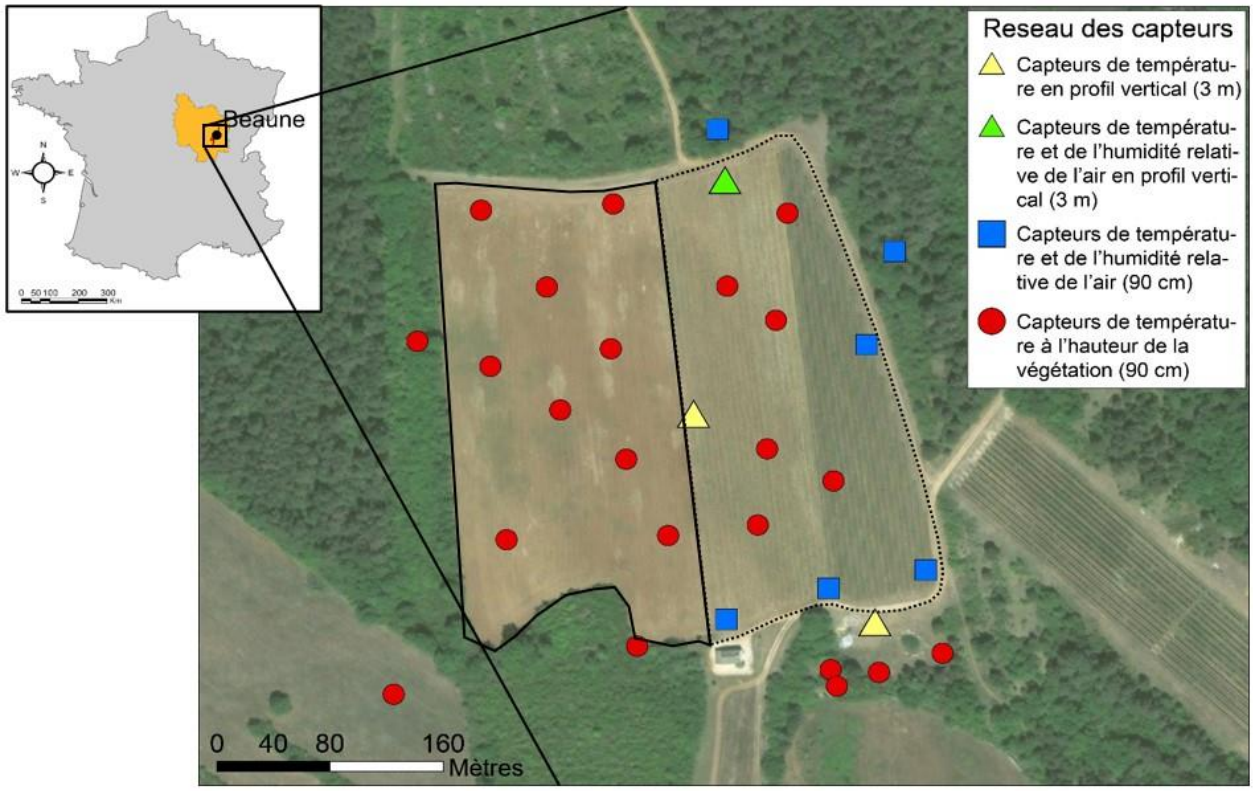


Figure 1. Représentation du réseau de mesures en vue aérienne. a) Le réseau est composée de 30 capteurs mesurant la température (points rouges) et l'humidité de l'air (carrés bleus) à la hauteur de la végétation (90 cm). Les triangles sur la carte représentent de mesures de température (triangle jaune) et de l'humidité de l'air (tringle vert) en profils verticaux.

1.1. Données climatiques

Les données ont été obtenues par l'intermédiaire d'un réseau dédié de 30 capteurs installés sous abris normés. Ils mesurent la température (points rouges) et l'humidité relative de l'air (points bleus) toutes les 15 min (Fig.1). Les capteurs, implantés à la hauteur de la végétation (90 cm), ont été déployés de façon à assurer la diversité et la couverture spatiale en prenant en compte différentes composantes du milieu (topographie, occupation du sol, etc.) susceptibles d'influencer les conditions climatiques. Afin d'avoir quelques profils verticaux, trois postes situés en haut, au milieu et bas de coteau (triangles jaunes et verts) sont équipés de sondes placées selon 3 hauteurs : 0,9, 2 et 3 mètres.

La campagne de mesures couvre le printemps 2019, du 23 mars au 1er mai. Cette saison est une période de grande vulnérabilité aux gelées tardives pour la vigne ayant débourré. La caractérisation de l'événement gélif survenu pendant la nuit de 4 au 5 avril 2019 s'appuie sur l'analyse des trois variables : la température moyenne (Tmoy), la température minimale (Tmin) et le nombre d'heures avec une température < 0°C (NHG). Ces variables utilisées comme proxy pour la sévérité, l'intensité et la durée du gel, ont été calculées sur une plage horaire de 24h à partir de 07:00 UTC du jour *j* jusqu'au 06:00 UTC du *j+1*.

1.2. Description topographique

La description topographique a été réalisée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution spatiale 5 mètres. Ce MNT est fourni par le service géomatique de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière).

A partir du MNT, l'inclinaison de la pente ainsi que son orientation ont été calculées en s'appuyant sur les outils statistiques d'un Système d'Information Géographique (SIG).

La topographie de la zone d'étude est relativement homogène, caractérisée par une altitude comprise entre 393m et 405m, soit une amplitude de 12m entre le haut et le bas de coteau. La différence d'altitude est plus accentuée sur l'axe nord-sud (9 m) que sur l'axe ouest-est (6 m). A cette différence d'altitude est associé un petit creux topographique localisé en partie basse de la parcelle. La pente moyenne est d'environ 3,5°, légèrement plus forte (2 – 8°) en haut de la parcelle, alors qu'elle devient faible (<2°), voir même nulle plus bas. La partie viticole est principalement exposée au sud-ouest, tandis que la partie en friche est exposée au nord-est.

1.3. Observations des dégâts sur la plante

Un suivi sanitaire a été réalisé afin d'identifier les dégâts qui auraient pu survenir suite à cet épisode de gel. La parcelle de vigne est plantée en Chardonnay, cépage reconnu pour son débourrement très précoce et donc sa grande sensibilité aux gelées de printemps. Cependant, le stade phénologique peu avancé (bourgeon dans le coton) conjugué à la précocité de l'événement climatique (début avril) ont permis à la vigne d'éviter tout dégât malgré l'intensité de l'épisode gélif (-3°C).

2. Résultats

Début avril 2019, la France se trouve sur l'influence de plusieurs perturbations atmosphériques générées par la présence d'un profond thalweg en altitude (Météo-France, 2019). Le temps est généralement perturbé, étant sous l'influence d'une circulation atmosphérique de sud-ouest qui dirige, en alternance et en fonction du passage des systèmes frontaux, des masses d'air alternant froid et chaud. La configuration atmosphérique se stabilise (faible vent et nébulosité) au cours de la nuit du 4 et 5 avril, ce qui entraîne une baisse des températures sur une grande moitié est du pays.

La figure 2 présente la variation spatiale des températures moyenne et minimale, ainsi que du nombre d'heures de gel pendant la nuit de 4 au 5 avril 2019.

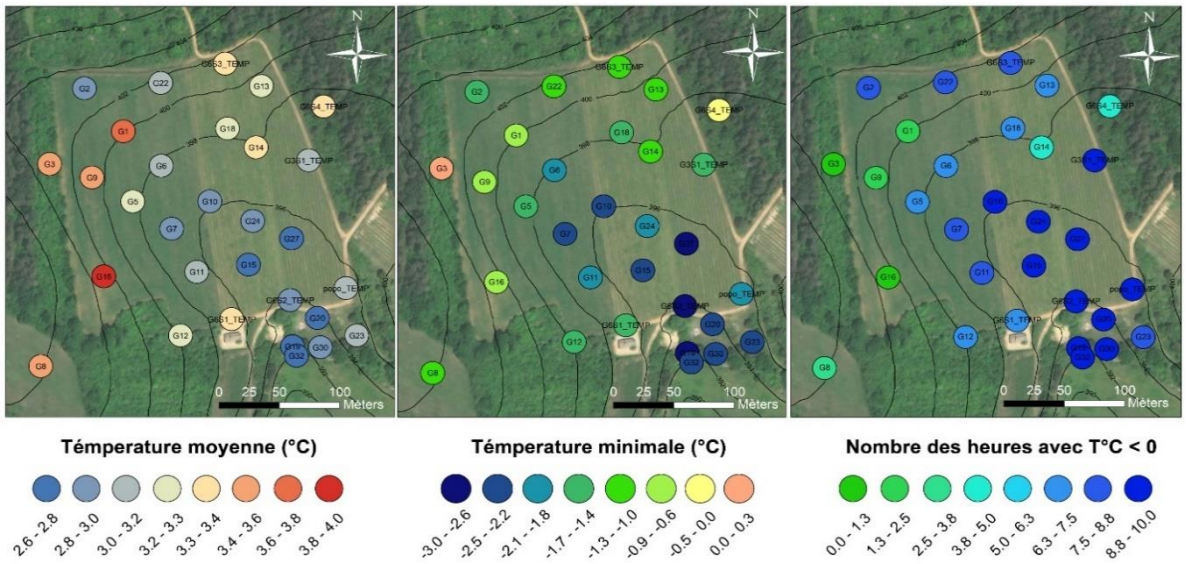


Figure 2. Cartes représentant la variation spatiale des températures moyennes (a) et minimales (b) et du nombre d'heures avec des températures < 0°C (c) pendant la nuit du 04 au 05 avril 2019 sur la zone d'étude de Magny-lès-Villiers.

L'analyse de ces trois paramètres à l'échelle parcellaire met en évidence des contrastes thermiques relativement forts. Les températures minimales (Fig.2b) enregistrées à la hauteur de la végétation sont comprises entre 0,5 et -3°C. Elles sont négatives sur la quasi-totalité de la zone d'étude. La température la plus basse a été relevée par le capteur situé en bas de coteau (G6S2_TEMP). La température la plus élevée a été mesurée par le capteur positionné sous couvert végétal dans la partie ouest de l'aire d'étude (G3). Spatialement, l'écart thermique a été d'environ 3°C sur l'ensemble de la zone et de 1,8°C au sein de la parcelle de vigne. La structuration spatiale des températures est fortement influencée par le positionnement des capteurs (haut/bas de coteau, forte/faible pente, orientation du coteau, etc.) ainsi que par les conditions de surface et par l'occupation du sol. Lors du refroidissement nocturne, l'inclinaison des pentes entraîne l'écoulement de l'air froid et dense par gravité, sa circulation étant limitée par la présence du muret au bas de la parcelle viticole. Cela engendre une situation d'accumulation d'air froid dans le creux topographique, exacerbant ainsi le risque de gel pour les pieds de vigne localisés juste en amont de ce muret (Gavrilescu et Bois, 2016).

Les températures moyennes de la journée correspondant à cet épisode gélif sont comprises entre 2,6°C et 4°C (Fig.2a). Leur distribution spatiale est principalement tributaire de la variation des températures minimales sensiblement plus élevée que celle des températures maximales, comme cela est fréquemment observé (Carrega, 2003). Ainsi, les endroits caractérisés par une Tmoy faible semblent être soumis à un refroidissement nocturne beaucoup plus prononcé. Les Tmax, durant la journée du 4 avril, sont relativement basses en relation avec une nébulosité élevée. La durée du gel est donc plus importante dans le creux topographique qu'ailleurs. Les capteurs déployés dans cet endroit ont marqué entre 9h et 10h des températures avec des valeurs < 0°C (Fig.2c). Des durées de gel relativement élevées (7,5h à 9h) sont également observées sur les capteurs localisés en haut du coteau, à proximité de la forêt. A noter que l'intensité du gel y était pourtant significativement plus faible qu'en bas de coteau. Cela peut s'expliquer en partie par l'absence d'apport calorifique par rayonnement solaire, ce qui conduit à une prolongation du froid nocturne du sol en matinée.

Le fort contraste thermique entre le haut et le bas de l'aire d'étude se maintient jusqu'au lever du soleil, ce qui suggère la mise en place d'une possible situation d'inversion thermique due au refroidissement nocturne (Fig.3). Cela est confirmé par l'analyse des températures en profil vertical qui indique une stratification de l'air. Des différences thermiques ont été observées sur l'ensemble des postes, plus ou moins prononcées selon les niveaux d'altitude et la situation topographique. Ainsi, l'écart thermique est-il plus fort entre 0,9 et 2 mètres qu'entre 2 et 3 mètres, alors que la stratification de l'air est plus prononcée sur le poste localisé dans le creux topographique que sur ceux situés en haut et en bas du coteau (1,75°C en moyenne).

Enfin, l'humidité relative de l'air indique des valeurs proches de l'état de saturation (90-100%) sur l'ensemble de la zone, ce qui peut engendrer des situations de précipitation de la vapeur d'eau sur les ceps de vigne. L'humectation de la surface des tissus verts, quel que soit le stade phénologique, a pour effet la modification de leur sensibilité au froid. Ainsi, en situation de forte humidité relative de l'air, les bourgeons et les jeunes pousses peuvent être susceptibles de geler à des températures nettement plus élevées (Itier *et al.*, 1991).

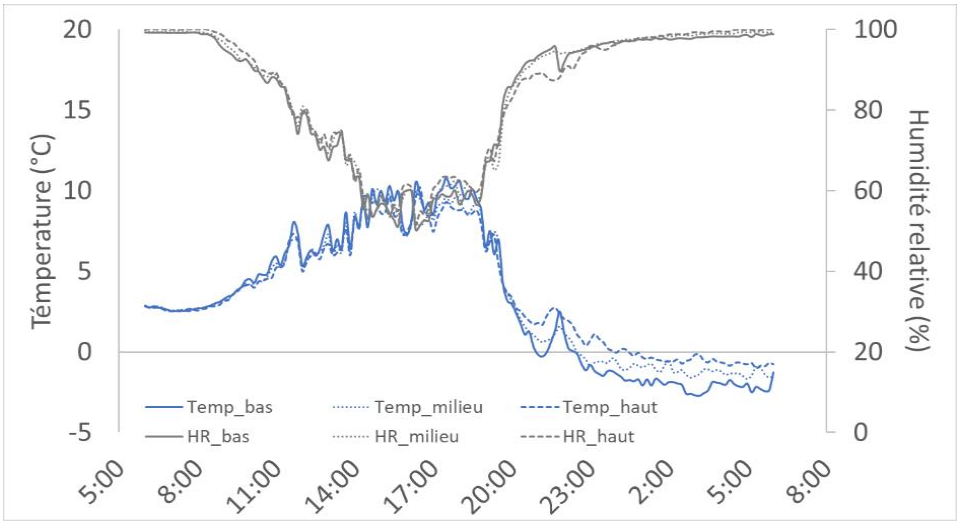


Figure 3. La variation des températures minimales (en ordonnée gauche) et de l'humidité de l'air (en ordonnée droite) au cours de la nuit du 04 au 05 avril 2019 en haut, au milieu et en bas de la zone d'étude de Magny-lès-Villiers.

Conclusions et Discussion

Le risque de gel printanier et son impact sur la viticulture ont été étudiés en s'appuyant sur l'analyse de la variation locale des températures lors de la nuit de 4 au 5 avril 2019 sur une parcelle viticole de Magny-lès-Villers en Hautes Côtes de Beaune. La géographie du gel observée à l'échelle parcellaire est très contrastée. Elle est structurée par la topographie, les caractéristiques de surface et l'hygrométrie de l'air. Une accumulation d'air froid en bas de la zone d'étude a été remarquée par configuration atmosphérique stable, engendrant ainsi une nette différence thermique entre le haut et le bas de coteau.

La description spatio-temporelle de cet événement climatique met en évidence le caractère exceptionnel de l'interaction entre les paramètres de large et de fine échelle ayant engendré l'apparition du gel. Les situations gélives printanières sont souvent favorisées par les circulations du nord ou d'est (Quenol, 2008). Cependant, les courtes périodes d'accalmie entre deux perturbations conjuguées aux conditions radiatives locales rendent possibles les gelées par circulation atmosphérique de sud ou de sud-ouest.

Remerciements

L'étude a bénéficié du soutien financier de Claire Naudin, viticultrice et propriétaire du Domaine Ferrand Naudin à Magny-lès-Villers et du Conseil Régional de la Bourgogne-Franche-Comté. Nous remercions Albin Ullman (Biogéosciences CNRS / Université de Bourgogne) pour sa précieuse contribution scientifique au projet.

Bibliographie

Parker A.K., Garcia de Cortazar-Atauri I., Van Leeuwen C., & Chuine I., 2011. A general phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L.Aust. *J. Grape Wine Res*., 17, n°2, .206-216.

Bonnefoy C., 2013. *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*. Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 2, France, 309p.

Carrega P., 2003. Le climat aux échelles fines. Publications de l'Association internationale de Climatologie, 15, 19-30.

Cellier P., 1989. Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. *Le Gel en Agriculture*. I.N.R.A., 145-164.

Gavrilescu C., Bois B., 2016. *Variabilité thermique aux échelles fixes et impacts sur la viticulture : le cas du gel du 26 avril 2016 sur la butte de Corton*. Rapport de stage.

Itier B., Flura D., Brun O., Luisetti J., Gaignard J.L., Choisy C., Lemoine G., Durand B., Masson S., Devaux M., *et al.*, 1991. Analyse de la gélivité des bourgeons de vigne. Expérimentation in situ sur le vignoble champenois. *Agronomie*, 11, 169-174

Madelin, M., 2007. *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat, 35-50

Météo France, 2019. Bulletin climatiques quotidiennes. URL: https://donneespubliques.meteofrance.fr/.

Quénol H., 2002. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral.* Thèse de Doctorat USTL, Edition ANRT, ISBN 2-284-04081-0, 2002, 283p.

Quénol H., Planchon O., Wahl L., 2008. Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Trought M.C.T., Howell G.S., Cherry N., 1999. Practical considerations for reducing frost damage in vineyards. Report to New Zealand Winegrowers. New Zealand Winegrowers, Auckland, New Zealand.

Van Leeuwen C., Friant P., Chone X., Tregoat O., Koundouras S., Dubourdieu D., 2004. Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55(3), 207-217.

STRATEGIES D'ADAPTATION DES PRODUCTIONS VIVRIERES AUX CONTRAINTES CLIMATIQUES DANS L'ARRONDISSEMENT DE BADAZOUIN (COMMUNE DE BOPA) AU BENIN

GIBIGAYE M.[1,2], CHABI A.B.P.[3,4]

1 Département de Géographie et Aménagement du territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin (moussa_gibigaye@yahoo.fr)
2 Laboratoire de Géographie Rurale et d'Expertise Agricole (LAGREA)
3 Ecole d'Agrobusiness et de Politiques Agricoles (EAPA), Université Nationale d'Agriculture (UNA), Kétou, Bénin (philippe_chabi@yahoo.fr)
4 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Cotonou, Bénin

Résumé : *Le climat est l'un des facteurs déterminants de la production agricole en Afrique en général et au Bénin en particulier. L'objectif de cette étude est d'analyser les stratégies d'adaptation des productions vivrières aux contraintes climatiques dans la zone d'étude. Les données climatologiques (les hauteurs de pluie, et l'évapotranspiration potentielle) de la période 1981 à 2016 extraites des fichiers de l'ASECNA, les statistiques agricoles issues des données du MAEP (1995-2015) et les informations recueillies sur le terrain auprès des producteurs agricoles ont été mises à contribution. Les résultats issus de cette étude montrent que dans l'arrondissement de Badazouin, les saisons agricoles sont caractérisées par le retard ou la précocité du démarrage des saisons pluvieuses par année. En réponse à ces contraintes climatiques, les producteurs agricoles ont développé des stratégies adaptations. Ainsi, 60 % ont introduit de nouvelles variétés de cultures à cycle court et à fort rendement, 48 % pratiquent l'association de cultures.*

Mots clés : *Badazouin ; contraintes climatiques ; stratégies d'adaptation ; productions vivrières*

Summary: ***Adaptation strategies of food production to climatic constraints in the district of Badazouin (commune of Bopa) in Benin.*** *The climate is one of the determining factors of agricultural production in Africa in general and in Benin in particular. The climate is one of the determining factors of agricultural production in Africa in general and in Benin in particular. The objective of this study is to analyze the strategies for adapting food production to climatic constraints in the study area. Climatological data (rainfall depths and potential evapotranspiration) from 1981 to 2016 extracted from ASECNA files, agricultural statistics from APRM data (1995-2015) and information collected in the field from agricultural producers were involved. The results of this study show that in the district of Badazouin, the agricultural seasons are characterized by the delay or the precocity of the start of the rainy seasons per year., In response to these climatic constraints, agricultural producers have developed adaptation strategies. Thus, 60% have introduced new varieties of short-cycle and high-yielding crops, 48% practice combining crops.*

Key words: *Badazouin ; climatic constraints ; adaptation strategies ; food production*

Introduction

La croissance incontrôlée des émissions de gaz à effet de serre est en train de réchauffer la planète, avec pour conséquences l'augmentation ou la baisse de précipitations, la multiplication de phénomène météorologiques extrême, et le décalage des saisons. Le dérèglement climatique, joint à la croissance de la population au niveau mondial, menacent partout la sécurité alimentaire (IFPRI, 2009).
Pour le GIEC (2013), la planète devra faire face à une sévérité sans précédent des impacts du dérèglement climatique Certaines régions du monde comme l'Afrique sont déjà particulièrement vulnérables et le seront encore plus. L'inaction de la communauté internationale place la planète sur une trajectoire de réchauffement de 4°C d'ici 2100, un scénario catastrophique pour la survie du continent africain et de ses populations (pertes agricoles massives, en particulier de bétail, stress hydrique, épidémies sanitaires, famines, démultiplication des conflits).

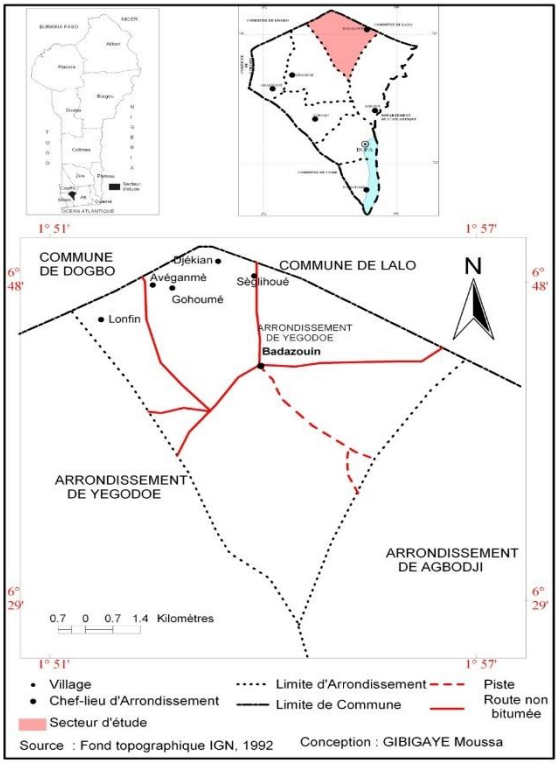


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude

Au Bénin, Houndénou (1999) a montré que la diminution sensible de la production agricole est en rapport avec l'irrégularité et la baisse brutale des hauteurs pluviométriques. Cette baisse des précipitations, plus marquée au sud du Bénin, se traduit par la réduction manifeste de la petite saison pluvieuse en milieu béninien.

L'objectif de cette recherche est d'analyser les stratégies d'adaptation des productions vivrières aux contraintes climatiques dans l'arrondissement de Badazouin.

La zone d'étude est située entre 6°29' et 6°48' de latitude Nord et 1°51' et 1° 57' de longitude Est (Fig.1). Elle est marquée par une saison bimodale avec deux saisons pluvieuse (une grande saison pluvieuse d'avril à juillet et une petite saison pluvieuse de septembre à octobre) et deux saisons sèches (une grande saison sèche de novembre à mars et une petite saison sèche en août.

1. Données et méthodes

1.1. Données utilisées

Plusieurs données ont été collectées dans le cadre de cette recherche. Il s'agit :

- des données climatologiques telles que la pluviométrie de la station de Bopa ; de la température et de l'évapotranspiration potentielle de la station de Cotonou. Les données de la station de Cotonou (station synoptique) ont été utilisées compte tenu de l'indisponibilité de ces données dans la station de Bopa (Poste pluviométrique). Ces données ont permis d'apprécier l'évolution des facteurs climatiques de 1981-2016.

- des statistiques agricoles disponibles au Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et à l'Institut National de Recherche Agricole du Bénin ont servi à l'étude de l'évolution de la production agricole dans la zone d'étude sur la période 1995-2015 ;

- des données démographiques en 1979, 1992, 2002, 2013 disponibles à l'INSAE ont contribué à l'appréciation de la taille de la population agricole dans l'arrondissement de Badazouin.

Hormis les données primaires, les données secondaires ont été collectées auprès des producteurs.

La taille de l'échantillon (N1) a été déterminée par la méthode probabiliste à l'aide de la formule de Schwartz (1995) : $N1 = T2 \times P (1-P)/ E2$. Dans laquelle T (écart réduit critique) est un coefficient dépendant du seuil de confiance, E la marge d'erreur en pourcentage (0,05%), P (en pourcentage) la proportion de ménages agricoles dans l'arrondissement. Le seuil de confiance retenu est 95 %. Au total 227 producteurs ont été enquêtés.

1.2. Méthodes d'analyse

Les investigations ont été menées auprès des agriculteurs, des services décentralisés de l'Etat (CARDER/Bopa) et des ONG. Elles ont permis de noter les impacts climatiques sur la production vivrière, la vie socio-économique et dans le même temps d'identifier les stratégies endogènes d'adaptation. Pour ce faire, des critères de choix ont été retenus à savoir :

- avoir vécu régulièrement dans la localité au cours des 30 dernières années afin de mieux expliquer les réalités climatiques du milieu ;
- être chef de ménage agricole ayant des champs en exploitation ou exerçant dans des services qui traitent des questions agricoles. Ce critère est pris en compte afin de pouvoir s'assurer que les acteurs agricoles maîtrisent mieux les réalités de leur secteur d'activité.

Il est possible de s'interroger sur le choix des cultures.
Les cultures vivrières à savoir : le maïs, le manioc, l'arachide et le niébé sont choisies en fonction de leur importance dans la ration alimentaire et dans les échanges commerciaux (Tab.1).

Tableau 1. Exigences thermométrique et pluviométrique des cultures (Source : Mémento de l'agronome, 2002)

Cultures		**Préférences**	
Noms courants	Noms scientifiques	Thermométriques (°C)	Pluviométriques (mm)
Niébé	*Vigna unguiculata*	18 à 25	400 à 800
Manioc	*Manihot esculenta*	25 à 30	1000 à 1200
Arachide	*Arachis hypogea*	24 à 34	400 à 1200
Maïs	*Zea mays*	18 à 30	500 à 1000

Les cultures comme le maïs, l'arachide et le manioc sont plus tolérantes aux facteurs thermométriques et hydriques que le niébé.
Les besoins en eau des différentes cultures ont permis d'évaluer les déficits et les excès en eau.

2. Résultats et discussion

Les résultats issus de cette étude se résument au bilan climatique, à la relation entre la production et les rendements des cultures choisies d'une part et à l'évolution de la production et des emblavures, au système de rotation et d'association de cultures d'autre part.

2.1. Bilan climatique

Le bilan climatique traduit la succession d'excédents et de déficits en eau. Ainsi, le climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle et qu'il n'y a pas de réserve d'eau disponible (Hufty, 1976). La figure 2 présente le bilan climatique de l'arrondissement de Badazouin.

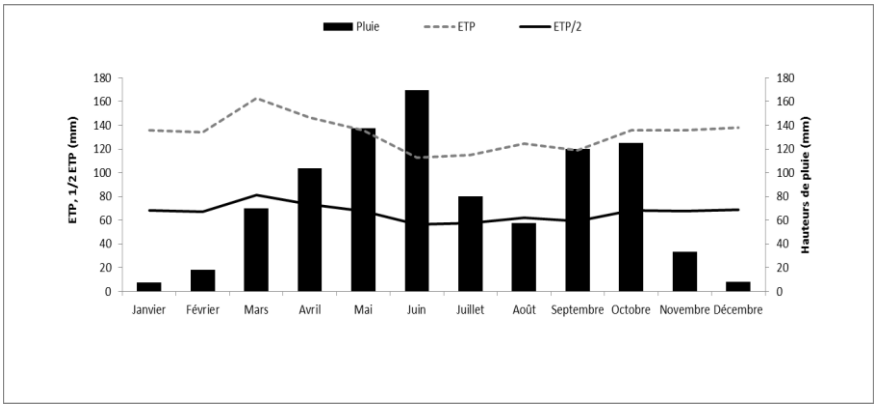


Figure 2. Bilan climatique des saisons culturales de Badazouin (1981-2016) (Source : ANM< (2017))

L'observation de la figure 2 permet de déterminer les périodes suivantes :

- de novembre à mars, les hauteurs pluviométriques restent inférieures à ½ ETP (P ≤ ½ ETP). C'est la grande période sèche marquée par la présence de quelques traces de pluie sans véritable intérêt au plan agronomique ;
- le mois d'avril est la période pré-humide (½ ETP ≤ P ≤ ETP), favorable aux labours et parfois aux semis précoces des cultures comme le maïs, le niébé, l'arachide selon 58 % des enquêtés. Il est à signaler qu'il y a des périodes où les pluies tardent à venir, ce qui constitue un véritable problème pour les producteurs ;
- de mai à juin ; P ≥ ETP, c'est la période humide, celle de l'entretien des champs et de la croissance des plantes où les besoins en eau des cultures sont en principe entièrement satisfaits.

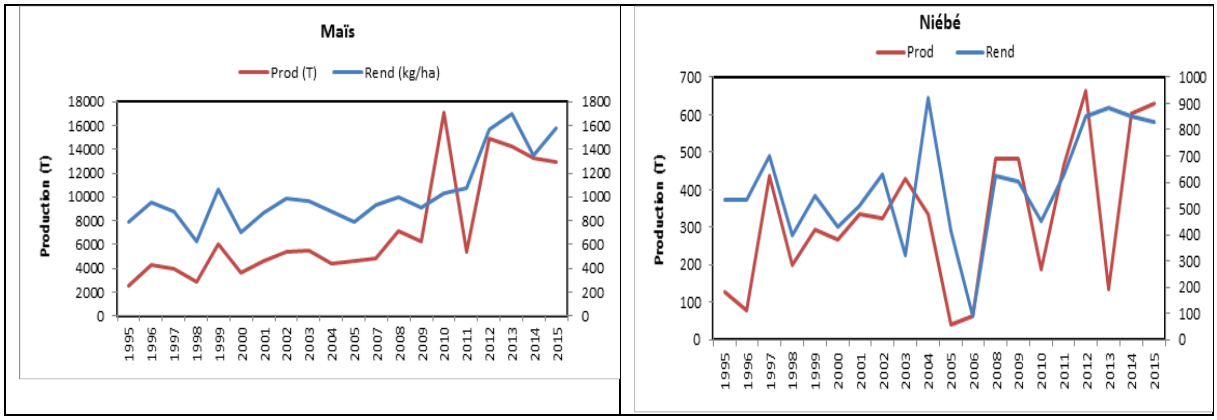
De la même la manière, les producteurs sont confrontés aux phénomènes d'inondations ;

- le mois de juillet correspond à la période post-humide (½ ETP ≤ P ≤ ETP) celle de la récolte ;
- août est la petite saison sèche (P ≤ ETP) où les producteurs préparent le sol pour la seconde (petite) saison des pluies ;
- enfin, les mois de septembre et octobre correspondent à la petite saison des pluies.

2.2. Relation entre la production et les rendements des cultures choisies

En réponse aux contraintes climatiques parmi lesquelles, il faut signaler le démarrage précoce ou la fin précoce des pluies et les périodes de sécheresse ou d'inondation, les producteurs de l'arrondissement de Badazouin augmentent les superficies cultivées afin d'accroître les rendements. Il est à observer une relation entre les rendements et les productions (Fig.3).

Pour preuve, en 2010, le rendement du maïs est de 1036 kg/ha contre 910 kg/ha en 2009 soit une augmentation de 13,85 %, alors que la production de 2010 est de 17093 tonnes contre 6290 tonnes en 2009 soit une augmentation de 171,75 %. Le rendement du maïs obtenu en 2010 est faible par rapport à celui de 2009. Selon 71 % des producteurs agricoles, la baisse du rendement de 2010 est due à l'inondation des champs qui a pour conséquence directe la pourriture des épis de maïs.



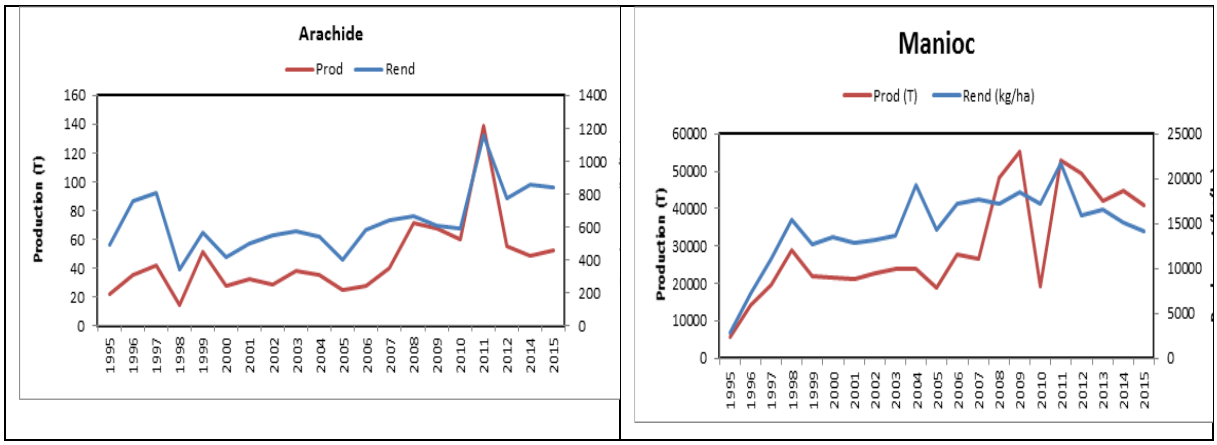


Figure 3. Relation entre la production et les rendements des cultures choisies

En 2003, le rendement du niébé est de 324 kg/ha contre 923 kg/ha en 2004, soit une augmentation de 184,88 % en 2004 alors que la production est de 430 tonnes en 2003 contre 337 tonnes en 2004 soit une baisse de 21,63 %. Ce phénomène est dû selon les agents de CARDER à la densité de semence produite sur la superficie du champ cultivé. Une densité moyenne avec des écartements élevés (nombre de graine par paquet) donne un meilleur rendement qu'une densité forte avec les mêmes écartements. Par ailleurs, l'évolution de la production et du rendement sont proportionnelles en 2006 ; cela démontre que le rendement obtenu en 2006 reflète la production. La faible production effectuée en 2006 s'explique soit par l'association du niébé avec d'autres cultures selon 54 % des producteurs, ou soit par la rotation des cultures selon 63 % des producteurs agricoles.

2.3. Evolution de la production et des emblavures

Le calcul des coefficients de corrélation linéaire de Bravais-Pearson et la réalisation du test de corrélation de Kendall sont déterminés entre les productions annuelles (1981-2016) et les superficies emblavées des cultures vivrières de 1995-2015 (Tab.2).

Tableau 2. Corrélation entre production et superficie (Source : traitement des données (MAEP, 2017))

Cultures	**Correlation superficie-production**	**Test de Kendall**
Maïs	r = 0,910	p-value = 0,005 ; α = 0,025
Niébé	r = 0,665	p-value = 0,003 ; α = 0,025
Arachide	r = 0,827	p-value = 0,004; α = 0,025
Manioc	r = 0,820	p-value = 0,004; α = 0,025

L'examen du tableau 2 montre que la corrélation entre production et superficie des différentes cultures est supérieure à 0,5 ; elle est donc forte. Au seuil de signification α = 0,05, il n'est pas possible de rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation. La corrélation est significative et confirmée par la valeur de p-value (0,005 ; 0,003 et 0,004) de ces cultures qui est largement inférieur à α/2. Cette situation permet de confirmer que l'augmentation de la production est fonction de la superficie emblavée.

2.4. Système de rotation et d'association culturale

La rotation des cultures consiste à faire succéder une série de cultures, c'est-à dire à ne pas toujours pratiquer la même culture sur le même champ au cours des différentes saisons agricoles. Cette technique consiste à mettre en friche un champ pendant un certain nombre d'années agricoles (Tab.3).

Tableau 3. Système de rotation et d'association culturale de la zone d'étude (Source : Résultat d'enquête de terrain, 2019)

Rotation des cultures		
Années de culture	**1ère saison**	**2ème saison**
1ère année (défrichement)	Maïs-arachide	Maïs-niébé
2ème année	Manioc	Manioc
3ème année	Maïs ou maïs-piment	Maïs-niébé ou niébé arachide
4ème année	Manioc	Manioc

Le système de rotation est pratiqué par 85 % des agriculteurs dans l'arrondissement de Badazouin. Il permet d'éviter de planter au même endroit, pour plus de deux récoltes, des cultures qui appartiennent à la même famille, afin d'éviter le développement dans le sol des organismes nuisibles et des maladies qui affectent une famille particulière de cultures. Selon 53 % des producteurs agricoles, la production du manioc intervient quand les rendements issus de la production des autres cultures baissent.

Selon les agents du CARDER (Bopa), le fait de cultiver ensemble différents végétaux permet de mieux lutter contre les ravageurs et d'utiliser efficacement les éléments nutritifs du sol. Des plantes comme le piment repoussent certains ravageurs et peuvent trouver leur place entre les tomates ou toutes autres cultures. En plus des différentes méthodes de rotation et d'association, les producteurs de Badazouin ont adopté de nouvelles variétés de cultures.

Conclusion

En réponse aux contraintes climatiques qui affectent les rendements agricoles dans la zone d'étude, les producteurs ont développé plusieurs stratégies parmi lesquelles il est à noter le semis répété et échelonné, l'association des cultures, l'adoption de nouvelles variétés à cycle court, l'abandon progressif du calendrier agricole hérité. Pour permettre aux décideurs de prendre des décisions, des recherches futures porteront sur d'autres cultures vivrières dans la zone d'étude.

Bibliographie

Dekoun C. G., 2014. *Variabilité pluviométrique dans la commune de Houéyogbe : perceptions et stratégies d'adaptation paysannes*. Mémoire de maîtrise en géographique. Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 86p.

GIEC., 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 222p.

Houndénou C., 1999. *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de doctorat de Géographie, UMR 5080, CNRS « climatologie de l'Espace Tropical », Université de Bourgogne, Centre de recherche de climatologie, France, 341p.

IFPRI., 2009. Politique alimentaire. Rapport « Changement Climatique : Impact sur l'agriculture et coûts de l'adaptation ». 30p.

Hufty A., 1976. *Introduction à la climatologie*. P.U.F. Collection Magellan, Paris, 264p.

VARIABILITÉ PLUVIOMETRIQUE ET TÉLÉCONNECTIONS À CURITIBA (BRÉSIL) : UNE ANALYSE PRÉLIMINAIRE

GOUDARD G.[1], LIMBERGER L.[2], MENDONÇA F.A.[1]

1 LABOCLIMA, Laboratoire de Climatologie, Département de géographie, Université Fédérale du Paraná, Centro Politécnico, Curitiba, Brésil (gabigoudard.ufpr@gmail.com ; chico@ufpr.br)
2 Département de géographie, Université d'Ouest du État du Paraná, Curitiba, Brésil (leila.limberger@unioeste.br)

Résumé : *La connaissance des complexités inhérentes au système atmosphérique, notamment les relations atmosphère-océan-surface, est nécessaire pour expliquer la dynamique climatique et les modèles de cyclicité et de périodicité des précipitations. À Curitiba, ville située au sud du Brésil, les impacts hydrométéorologiques sont les plus importants. L'objectif principal de ce travail est d'analyser la variabilité des précipitations à Curitiba en lien avec les anomalies de température de surface de la mer (TSM), afin d'identifier les modes de la variabilité pluviométrique qui sont les plus représentatifs pour la zone d'étude. Les résultats indiquent la nécessité d'une analyse plus approfondie de l'influence de l'océan Atlantique et de sa relation avec les précipitations.*

Mots clés : *variabilité ; pluie ; téléconnexions ; Curitiba ; Brésil*

Summary: ***Rainfall variability and teleconnections in Curitiba (Brazil): a preliminary analysis.*** *Knowledge of the complexities inherent in the atmospheric system, including atmosphere-ocean-surface relationships, becomes necessary to explain climatic dynamics and patterns of cyclicity and periodicity of precipitation. In Curitiba, a city located in the south of Brazil, the hydrometeorological impacts are the most significant. The principal objective of this work is to analyze the variability of precipitation in Curitiba associated with sea surface temperature anomalies (SST), aiming to identify the most representative modes of rain variability for the study area. The results indicate the need for a more in-depth analysis of the influence of the Atlantic Ocean and its relationship to precipitation.*

Key words: *variability; rainfall; teleconnections; Curitiba; Brazil*

Introduction

La variabilité climatique est liée à la circulation atmosphérique ou océanique et, elle s'explique souvent par le couplage atmosphère-océan qui génère des téléconnexions (Wells, 1998 ; Silva et Silva, 2012 ; Ambrizzi *et al.*, 2014). De ce fait, les analyses conjuguant ce couplage sont fondamentales pour la compréhension des modèles de cyclicité et de périodicité des précipitations.

Au Brésil, la plupart des catastrophes naturelles sont liées à des anomalies pluviométriques (positives et négatives) et, à Curitiba (sud du pays, Fig.1), les impacts hydrométéorologiques sont les plus importants (Goudard, 2015, 2019 ; Goudard et Mendonça, 2017, 2018). Dans ce contexte, la connaissance des complexités inhérentes au système atmosphérique, notamment les relations atmosphère-océan-surface, deviennent nécessaires pour expliquer la dynamique climatique et ses impacts. Une meilleure compréhension des relations pluviométrie/téléconnexions est particulièrement pertinente en regard des scénarios du changement climatique global, notamment à l'échelle régionale (sud du Brésil) où les prévisions indiquent une intensification des précipitations qui pourrait atteindre 30% d'ici 2100 (PBMC, 2014).

Dans le contexte brésilien, plusieurs études ont mis en évidence le rôle des téléconnexions en tant que modulateurs des paramètres climatiques, parmi lesquels les précipitations se distinguent. Cependant, la majorité de ces études mettent surtout l'accent sur les oscillations liées uniquement à l'océan Pacifique, en particulier à ENSO (El Niño - Oscillation Australe) et à l'Oscillation Décennale du Pacifique (ODP). On constate qu'il y a des lacunes par rapport à la prise en compte de l'océan Atlantique dans ces analyses (Cataldi *et al.*, 2010).

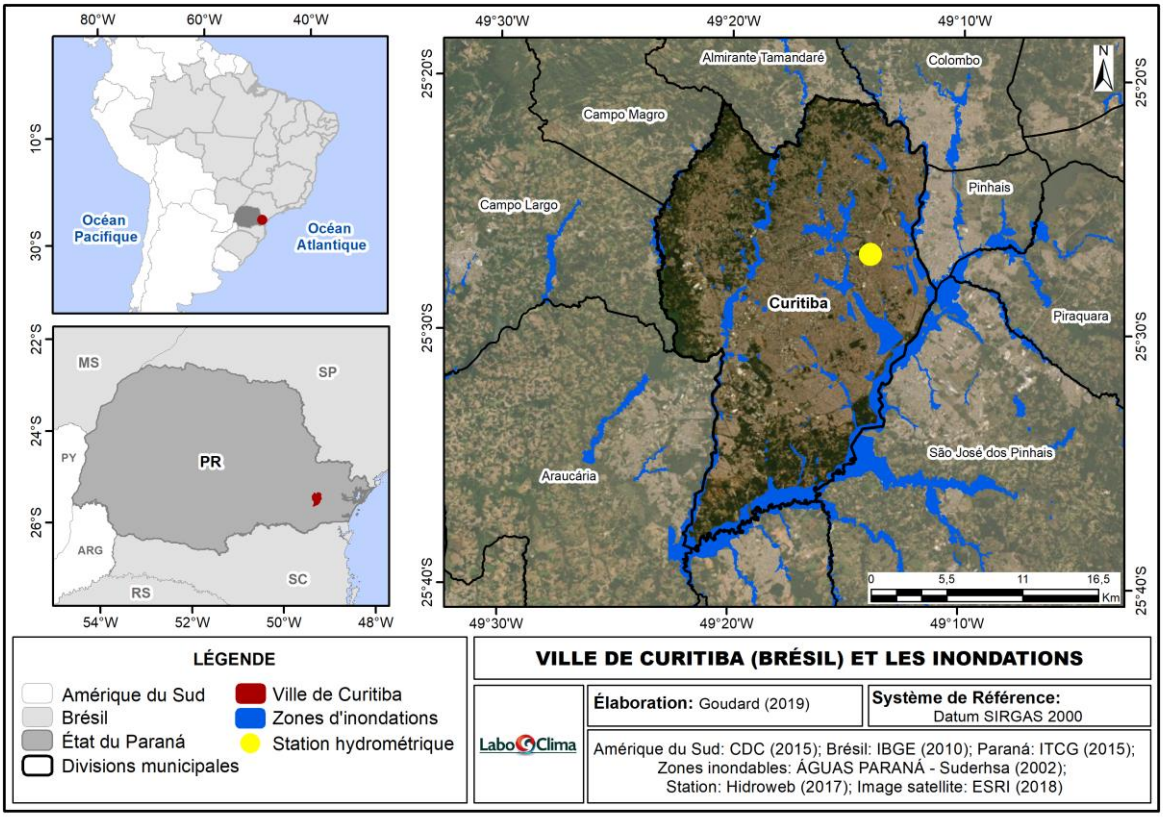


Figure 1. Localisation de la ville de Curitiba et des zones d'inondations. Organisation : Goudard (2019).

Sur la base de ces prémisses, l'objectif de ce travail est d'analyser la variabilité des précipitations à Curitiba associées aux anomalies de température de surface de la mer (TSM) afin d'identifier les principaux modes de variabilité pour la zone d'étude.

1. Données et Méthodes

1.1. Données sur les précipitations et la température de surface de la mer (TSM)

Les données de pluie proviennent de la plateforme Hidroweb - Systèmes d'information hydrologique (www.hidroweb.ana.gov.br), correspondant à la station 2549006 de Curitiba pour la période de 1970 à 2015. Les données manquantes ont été corrigées en utilisant l'algorithme NIPALS (*Non-linear Iterative Partial Least Squares*), dans le logiciel statistique XLSTAT, basé sur l'analyse en composantes principales (ACP) et les régressions pour prédire les valeurs manquantes (Wold, 1973).

Pour la température de surface de la mer (TSM), les données ont été téléchargées à partir de la *CDC / NOAA - Climatic Data Center / National Oceanic and Atmospheric Administration*, résultant de la nouvelle analyse NCEP / NCAR v4, avec une résolution spatiale de 2x2. Les données de l'indice climatique NOAA (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/) ont également été utilisées.

1.2. Caractérisation de la variabilité pluviométrique

La caractérisation de la variabilité pluviométrique de la station de Curitiba (Fig.1) est basée sur la vérification du coefficient de variation (CVP, équation 1) et la classification des années en fonction de la quantité de pluie par quantiles (q), selon les classes : extrêmement sec (< 0,10),

sec (0,10 et 0,35), normal (0,35 et 0,65), pluvieux (0,65 et 0,90) et très pluvieux (> 0,90) (Nascimento Junior, 2013 ; Goudard, 2019 ; Goudard et Mendonça, 2019).

$$CVP = \left[\frac{X1-M}{M}\right] \quad (1)$$

Équation 1. CVP correspond au coefficient de variation annuel des précipitations ; X1 aux précipitations annuelles et M désigne la moyenne des totaux des précipitations constituant la série historique de 1970 à 2015

1.3. Corrélation linéaire TSM avec les précipitations et détermination des modes de variabilité

Les corrélations linéaires entre les données mensuelles de précipitations et les anomalies de température de surface de la mer (TSM) ont été effectuées à l'aide de *NCAR Command Language (NCL)* version 6.5.0. Les calculs ont été effectués pour les données avec et sans décalage temporel (*lags* 0 à 9), dont les *lags* 0 à 5 sont mis en évidence dans ce travail. Il convient de noter que pour les calculs, la tendance linéaire n'a pas été retiré, tel que décrit dans les études de Limberger et Ely (2019).

Il est à noter que ces procédures permettent d'identifier les zones TSM (isolées ou en association avec d'autres) qui interfèrent le plus avec la circulation atmosphérique et les variations de précipitations dans la zone d'étude.

2. Résultats et discussion

Au cours de la période de 1970 à 2015, la ville de Curitiba a présenté une moyenne annuelle de précipitations de 1507,5 mm. Les années très pluvieuses ont été : 1983 (1992,7 mm), 1998 (2071,2 mm), 2001 (1894,1 mm), 2010 (1916,7 mm) et 2015 (1959,4 mm), tandis que les années 1978 (1055,4 mm), 1981 (947,4 mm), 1985 (765,5 mm), 1991 (1151,3 mm) et 2006 (932,4 mm) ont été extrêmement sèches (Fig.2).

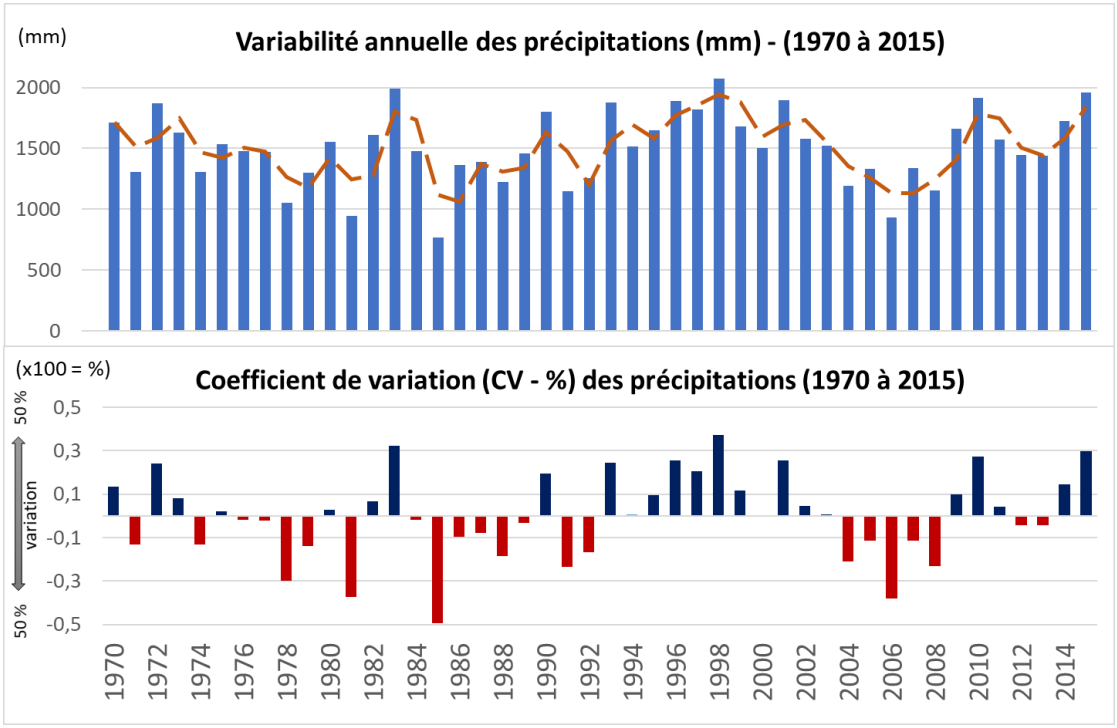


Figure 2. Variabilité des précipitations (1970 à 2015). Organisation : Goudard (2019)

Goudard et Mendonça (2019) ont analysé la variabilité des précipitations (habituelles et exceptionnelles) au cours de la période de 1980 à 2015 et ils ont constaté que les précipitations

à Curitiba ont des relations avec la variabilité interannuelle du phénomène ENSO (El Niño – Oscillation Australe). Toujours selon ces auteurs, durant les années El Niño (surtout Canonique/Conventionnel – EP), les événements pluvieux extrêmes sont plus fréquents, il y a aussi une plus grande quantité d'événements qui sont associés au déclenchement des inondations urbaines dans la ville, ce qui n'est pas le cas lors des années La Niña (Goudard et Mendonça, 2019). Ces résultats abondent dans le même sens de ce qui a été observé par Grimm *et al.* (1998) ; Grimm et Tedeschi (2009) et Grimm (2009) c'est-à-dire que le sud du Brésil est l'une des régions les plus sensibles en ce qui concerne l'influence d'ENSO sur son régime pluviométrique.

Pour la période entre 1970 et 2015, les années les plus pluvieuses coïncident avec les périodes El Niño : 1983 (El Niño Canonique/Conventionnel forte), 1998 (El Niño Canonique/Conventionnel très forte), 2010 (El Niño Modoki modérée) et 2015 (El Niño Canonique/Conventionnel forte), selon la classification d'ENSO faite par Andreoli *et al* (2016) et Kayano *et al* (2016). Ainsi, en raison de la forte corrélation entre les phénomènes ENSO et les pluies, celles-ci sont les plus étudiées.

Les cartes de corrélation linéaire (Fig.3) indiquent quelles sont les zones de TSM les mieux corrélées avec les précipitations à Curitiba, considérant les décalages temporels de 0 à 5 moins (*lags*). L'analyse de la figure 3 montre que les événements ENSO dans le Pacifique Central (zones 1+2, 3 ; 3.4 et 4) ont de bonnes corrélations positives avec la pluie dans tous les décalages (*lags* 0 à 5).

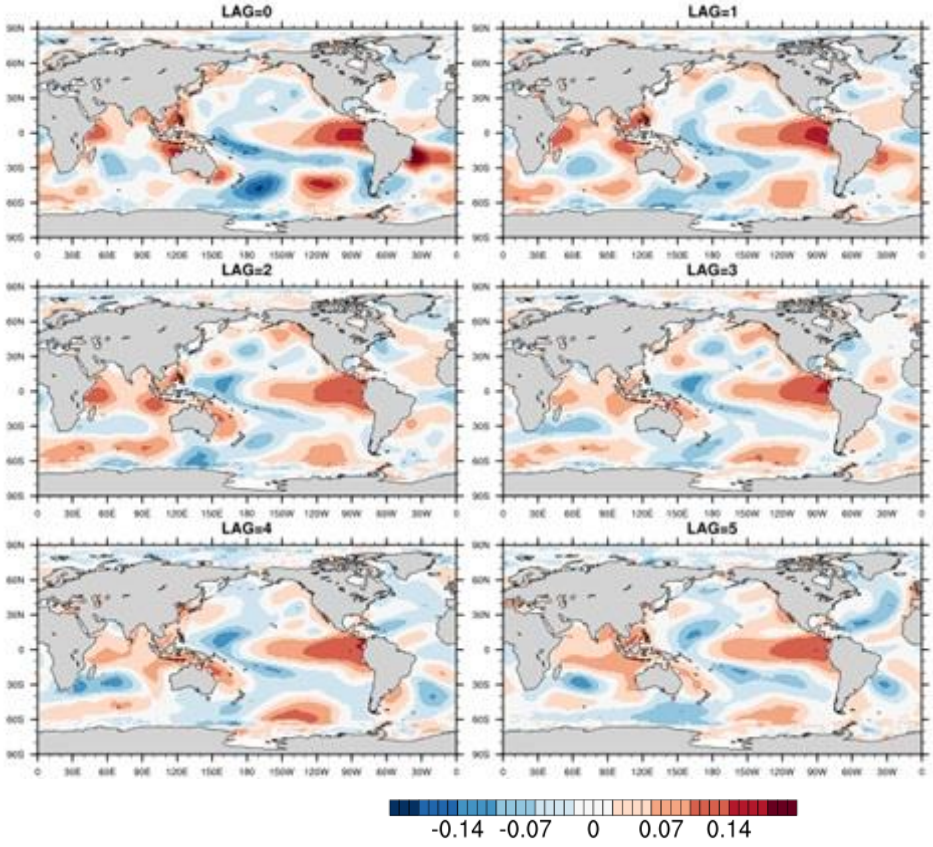


Figure 3. Corrélation linéaire entre les précipitations et la TSM (lag 0 jusqu'à lag 5). Organisation : Goudard (2019)

Cependant, l'ENSO n'est pas le seul responsable de la variabilité des précipitations dans la zone d'étude. La figure 3 montre aussi que dans les décalages (*lags*) 0 et 1, il existe des corrélations positives avec l'Atlantique, près de la côte du nord-est brésilien. Limberger et Ely (2019), lors de l'analyse des précipitations au Paraná (État où se trouve Curitiba) en lien avec

la TSM, ont constaté que le Pacifique équatorial (région ENSO) n'est pas le principal modulateur de la variabilité climatique pour l'ensemble de l'État car ce dernier est aussi influencé par l'Atlantique Nord. Ces processus combinés résultent de l'influence de la position de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), qui est responsable du flux d'humidité de l'Atlantique vers l'Amérique du Sud. Il convient aussi de noter que cette zone affecte l'intensité de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS), une bande nuageuse située entre les régions nord et sud-est du pays (Carvalho et Jones, 2009), qui a des effets sur la variabilité des précipitations dans le sud du pays.

Dans le modèle de corrélation linéaire (Fig.3), la zone de l'Antarctique est aussi un grand modulateur de précipitations de la région (dans tous les *lags*), car elle favorise l'entrée de fronts froids. Il convient de noter que les fronts froids sont les principaux déclencheurs des impacts liés aux pluies (inondations urbaines) à Curitiba (Goudard, 2015, 2019 ; Goudard et Mendonça, 2017, 2018).

En ce qui concerne l'Oscillation Décennale du Pacifique (ODP), des corrélations négatives ont été trouvées dans tous les décalages (*lags*) – Figure 3. Les études de Cavalvanti et Ambrizzi (2009) et Kayano et Andreoli (2009) soulignent que dans l'ODP (+), il y a une tendance à un plus grand nombre et à plus forte intensité des épisodes ENSO (+) et à une intensité plus faible et à moins d'épisodes ENSO (-). Un fait qui, théoriquement, intensifie les précipitations dans la partie Centre-Sud du Brésil dans les phases chaudes de l'ODP.

Selon Nascimento Junior (2013), dans l'État du Paraná, des corrélations positives avec l'ODP ont été détectées principalement dans les régions ouest et nord-ouest, et des corrélations négatives dans l'est (où se trouve Curitiba) et la côte de l'État. Cependant, l'analyse des précipitations par rapport à l'ODP n'est pas encore totalement concluante, nécessitant la poursuite d'études visant à vérifier les effets de cette oscillation sur l'intensité, la quantité et le nombre d'épisodes de précipitations dans l'État du Paraná et à Curitiba.

En somme, le Pacifique central - région ENSO (corrélation positive), l'Atlantique tropicale (corrélation positive), l'Antarctique (corrélation positive) et la zone associée à l'Oscillation Décennale du Pacifique - ODP (corrélation négative) sont les régions les mieux corrélées aux précipitations à Curitiba par rapport à la variabilité pluviométrique analysée de manière préliminaire dans cette étude.

Conclusions

Le présent travail a permis de vérifier quelles zones océaniques sont les mieux corrélées aux précipitations à Curitiba, en mettant l'accent sur le Pacifique central - région ENSO (corrélation positive), l'Atlantique tropical (corrélation positive), l'Antarctique (corrélation positive) et l'ODP (corrélation négative). Les résultats sont en accord avec ceux de Limberger et Ely (2019), qui ont démontré que le Pacifique équatorial (région ENSO) n'est pas l'unique modulateur de la variabilité pluviométrique pour l'ensemble de l'État du Paraná. Ainsi, cette étude présente des avancées concernant la compréhension des téléconnexions et de la variabilité des précipitations à Curitiba. Néanmoins, des analyses plus approfondies sont encore nécessaires pour améliorer les modèles de prévisions météorologiques et climatiques, surtout en ce qui concerne les relations avec l'océan Atlantique.

Remerciements

À CAPES et au Ministère de l'Education du Brésil pour le support financier de cette recherche.

Bibliographie

Ambrizzi T., Sacco M.A.L., Ferraz S.E.T., 2014. A importância das teleconexões para a Previsão Sazonal. *Ciência e Natura*, vol. 36, 137-148.

Andreoli R.V., Oliveira S.S., Kayano M.T., Viegas J., Souza R.A.F., Candido L.A. 2016. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. *International Journal of Climatology (published online).*

Carvalho L.M.V., Jones, C. 2009. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S. (Orgs). *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de Textos, 95 - 109.

Cavalcanti I.F.A., & Ambrizzi T. 2009. Teleconexões e suas influências no Brasil. In: Cavalcanti I. F. A., Ferreira N. J., Silva M.G.A.J., Dias M.A.F.S. (Orgs). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos.

Cataldi M; *et al.* 2010. Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico sul extratropical na região da confluência Brasil - Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do sul e sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.4, 513 – 524.

Goudard G. 2015. Eventos e Episódios Pluviais Extremos em Curitiba (PR): uma abordagem a partir dos riscos e vulnerabilidades socioambientais. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 129p.

Goudard G., Mendonça F.A. 2017. Eventos pluviais extremos em Curitiba (Paraná): entre antigos problemas e novos desafios. In: Perez Filho A., Amorim R. R. (Org.). *Os desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. 1ª ed. Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, v. 1, 1919-1930.

Goudard G., Mendonça F.A., 2018. Les inondations urbaines à Curitiba (Brésil): risques et impacts dans le bassin versant de la rivière Belém. *Actes du XXXI Colloque Annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, France, v. 1, 104-109.

Goudard G., Mendonça F.A., 2019. ENSO et les impacts des événements pluviaux extrêmes à Curitiba (Brésil). *Actes du XXXII Colloque Annuel de l'Association Internationale de Climatologie.* Aristotle Univ Tessalonique, Tessalonique, Grécia, v. 1, 187-192.

Grimm A. M., Ferraz S. E. T., Gomes J., 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 11, n.10, 2863-2880.

Grimm A. M. 2009. Variabilidade interanual do clima do Brasil. In: Cavalcanti I. F. A., Ferreira N. J., Silva M.G.A.J., Dias M.A.F.S. (Orgs). *Tempo e clima no Brasil*. Oficina de Textos, 60 -275.

Grimm A.M., Tedeschi R.G., 2009. ENSO and extreme rainfall events in South America. *Journal of Climate.* 22: 1589–1609.

Kayano M. T., Andreoli R., 2009. Variabilidade decenal e multidecenal, In: Cavalcanti I. F. A., Ferreira N. J., Silva M.G.A.J., Dias M.A.F.S. (Orgs). *Tempo e Clima no Brasil*, Oficina de Textos, São Paulo, 375-383.

Kayano M. T. *et al*., 2016. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. *Revista Climanalise*. Edição Comemorativa de, v. 30.

Limberger L., Ely D.F., 2019. Régionalisation des précipitations dans l'état du Paraná (Brésil) en lien avec la température de surface de la mer. *Actes du XXXII Colloque Annuel de l'Association Internationale de Climatologie*. Aristotle Univ Tessalonique. Tessalonique, Grécia, v. 1, 493 – 498.

Nascimento Junior L. 2013. *As chuvas no Paraná: Variabilidade, teleconexões, e impactos de eventos extremos*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Presidente Prudente, Presidente Prudente, Brazil, 162f.

PBMC., 2014. *Impactos, vulnerabilidades e adaptação. Primeiro Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*, Volume 2, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Silva M.E.S., Silva C.B., 2012. Variabilidade Climática–processos físicos e dinâmicos nos oceanos e atmosfera. *Revista do Departamento de Geografia*, 372-406.

Wells N., 1998. *The atmosphere and ocean: a physical introduction*. 2ªed. Chichester: John Wiley & Sons.

Wold H., 1973. Nonlinear Iterative Partial Least Squares (NIPALS) Modeling: Some Current Developments. P.R. Krishnaiah [ed.]. *Multivariate Analysis II, Proceedings of an International Symposium on Multivariate Analysis held at Wright State University*, Dayton, Ohio, June 19-24, 1972, New York: Academic Press, 383-407.

EVENEMENTS PLUVIOMETRIQUES EXTREMES DANS LA GRANDE METROPOLE CASABLANCAISE : FREQUENCE DE RETOUR ET LIENS AVEC LES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

HANCHANE M.[1], SEBBAR A.[2], ILMEN R.[2], EL MOULOUDI M.[1]

1 Etudes Urbaines, USMBA-Fès, Fès, Maroc (mohamed.hanchane@usmba.ac.ma)
2 Hydrogéologie, Traitement et Épuration des Eaux et Changements Climatiques (HGT2E2C), EHTP-Casblanca/Météorologie Nationale, Casablanca, Maroc

Résumé : *Lors de la journée du 29 novembre 2010, des pluies diluviennes se sont abattues sur la ville de Casablanca. La pluviométrie enregistrée en une seule nuit a atteint un record absolu. Cet événement, d'une dangerosité extrême pour la première ville économique du pays, nous a amenés à nous interroger sur la fréquence de retour des pluies extrêmes et sur les conditions atmosphériques qui leur sont associées. L'étude porte sur une série de données pluviométriques journalières (1960-2016) pour la station de Casablanca, fournies par la Direction de la Météorologie Nationale. À partir de cette base de données, les pluies maximales enregistrées annuellement sont extraites et leurs périodes de retour sont calculées en les ajustant à la loi GEV (*Generalized Event Value*). Des cumuls pluviométriques de la décade entourant le jour de pluies extrêmes sont également calculés. Ils sont mis en relation avec la moyenne décadaire de l'indice ONA (Oscillation nord-atlantique) car ce dernier a une influence sur l'avènement des périodes sèches et humides au Maroc. Une analyse de la relation entre les événements pluviométriques extrêmes et des régimes de circulation, définis par des anomalies de pression au niveau de la mer, est étudiée.*

Mots clés : *pluies extrêmes ; période de retour ; ONA ; types de circulation atmosphériques ; Casablanca (Maroc)*

Summary: *During the day of November 29, 2010, torrential rains fell on the city of Casablanca. The rainfall recorded in one night reached an absolute record. This extremely dangerous event, produced in the first economic city of the country, led us to question the frequency of return of extreme rains and the atmospheric conditions associated with them. The study relates to a series of Casablanca daily rainfall data (1960-2016) provided by the National Meteorology Direction. From this database, the maximum rainfall recorded annually is extracted and their return periods are calculated by adjusting them to the GEV law (Generalized Event Value). Also, cumulative rainfall of the decade surrounding the day of extreme rains are calculated. They are compared with the average of a decade of the NAO index because the latter has an influence on the advent of dry and wet periods in Morocco. An analysis of the weather regimes, defined by sea level pressure anomalies, in relation to the extreme rainfall events is studied.*

Key words: *extreme rainfall; return periods; NAO; atmospheric circulation types; Casablanca (Morocco)*

Introduction

Lors de la journée du 29 novembre 2010, les pluies qui se sont abattues sur la ville de Casablanca ont atteint un niveau record absolu de 178 mm en une seule nuit ; c'est l'équivalent, en temps normal, de trois mois de précipitations d'octobre à décembre (moyenne : 176 mm pour la période 1960-2016). Cet événement d'une rareté absolue nous a amenés à nous interroger sur les conditions météorologiques à l'origine des événements pluviométriques rares et leur fréquence de retour au sein de la première ville économique du Maroc où des enjeux stratégiques sont extrêmement forts.

Au sein du Maroc Atlantique, auquel appartient la ville de Casablanca, les précipitations hivernales les plus fréquentes et les plus intenses sont en étroite relation avec l'instabilité convective, les processus d'ascendance dynamique, juste à l'est ou sous l'axe des vallées d'altitude et les déplacements vers le sud de tout le rail des perturbations de l'Atlantique Nord (Knippertz *et al.*, 2003). Ces vallées d'altitude donnent souvent naissance à une cyclogenèse locale en surface. Les dépressions qui en résultent sont souvent peu creuses et ont une courte durée de vie (Delannoy, 1997 ; Dorta *et al.*, 1993). Cette dynamique atmosphérique est associée aux variations de l'indice de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA). La corrélation entre cet indice et les précipitations du Maroc Atlantique est significativement négative (-0,54 pour Casablanca ; Delannoy, 1997).

Les événements pluviométriques extrêmes au Maroc ont été très peu abordés et souvent traités en termes de tendances, actuelle et future (Driouech *et al*., 2010 ; Tramblay *et al.*, 2012 et 2013). Les modes de la Circulation Atmosphérique à Grande Echelle (CAGE) ont été mis en relation avec les événements pluviométriques extrêmes (Driouech *et al*., 2010). Des liens entre ces derniers et les oscillations de l'ONA ont été détectés, en particulier pour les stations faisant partie du Maroc Atlantique septentrional (Tramblay *et al*., 2012), soumises à un climat sous influence océanique.

Cette étude s'intéresse plus particulièrement aux pluies maximales enregistrées chaque année dans la première ville économique du pays. Elle vise à montrer la fréquence des événements pluviométriques extrêmes au cours d'une année moyenne, leur période de retour selon un modèle GEV (Generalized Extremes Values) et leurs liens avec la dynamique atmosphérique.

1. Données et méthodologie

L'étude porte sur une des séries de données pluviométriques journalières (1960-2016) pour la ville de Casablanca, qui provient de la Direction de la Météorologie Nationale. À partir de cette base de données, les pluies maximales enregistrées chaque année sont extraites et leurs périodes de retour sont calculées en les ajustant à la loi GEV grâce au *packagein2extRemes* qui est développé sous R (Gilleland et Katz, 2016). Des cumuls décadaires entourant le jour de pluies extrêmes sont aussi calculés et mis en relation avec la moyenne décadaire de l'indice ONA sur la même période. Les données journalières de l'ONA sont obtenues à partir des données de la NOAA (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml). Pour compléter, nous avons étudié la relation entre les événements pluviométriques extrêmes et les types de circulation, déterminés à partir des anomalies de pression au niveau de la mer disponibles *via* les réanalyses de NCEP/NCAR (https://psl.noaa.gov/data/composites/day/). Les cartes des anomalies des champs de pression au niveau de la mer sont établies par rapport à la période de référence 1981-2010 et sur la fenêtre géographique 15°N-90°N et 90°O-60°E. Les données téléchargées au niveau de cette grille spatiale sont ensuite cartographiées grâce au logiciel Panoply (https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/). Ces cartes composites sont calculées sur une période de 10 jours précédant l'événement pluviométrique extrême. La classification des régimes a été réalisée visuellement selon les quatre types de circulations déjà identifiés par plusieurs auteurs (Vautard, 1990 ; Michelangeli *et al*., 1995 ; Cassou *et al*., 2004) et leurs fréquences ont été calculées.

2. Description des pluies extrêmes dans la ville de Casablanca

L'échantillon des maxima pluviométriques journaliers par an (Pjmax) est issu de la série de données journalières enregistrées à la station météorologique de Casablanca de 1960 à 2016 (Fig.1). Il s'agit d'un échantillon composé de 57 événements de pluies maximales. L'étendue de variation des maxima pluviométriques journaliers par an oscille entre un minimum de 14 mm (31 décembre 1981) et un maximum de 178 mm (29 novembre 2010). Ce dernier record absolu a plus que doublé les deux records suivants, ceux enregistrés les 21 janvier 1996 et 14 novembre 2002 (75 mm). Il représente 42% de la pluviométrie moyenne annuelle (427 mm, période 1960-2016), plus que le double de la moyenne mensuelle du mois de novembre (78 mm, période 1960-2016) et 60% du total mensuel enregistré en novembre 2010.

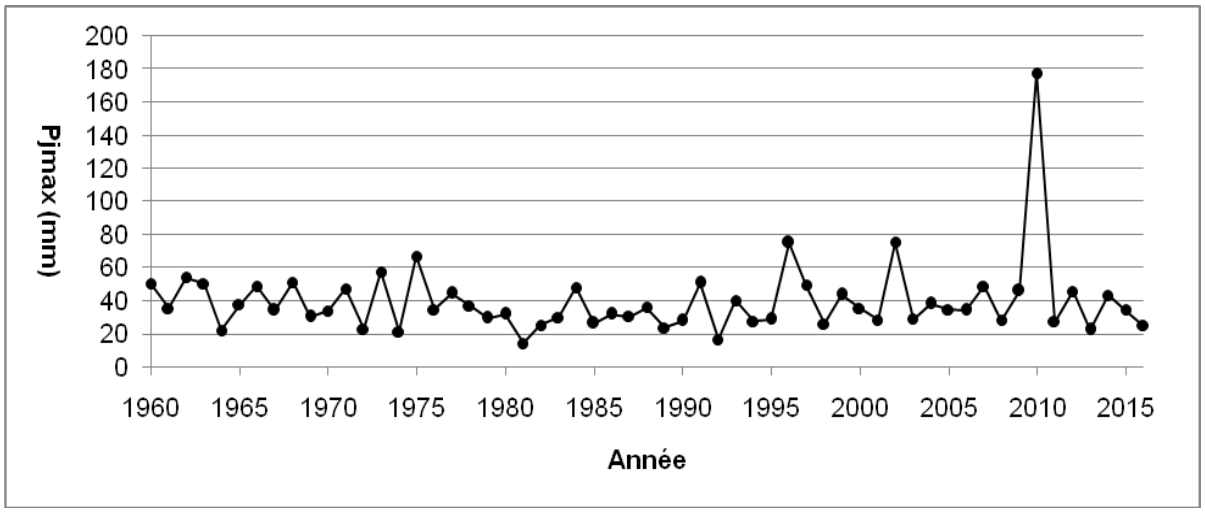


Figure 1. Les maxima pluviométriques journaliers par an à la station synoptique de Casablanca (période :1960-2016) (Source des données : Direction de la Météorologie Nationale Maroc).

On note que tous les mois de la saison des pluies, allant d'octobre à mai, peuvent enregistrer une pluviométrie extrême. Cependant, la moitié des événements rares sont enregistrés en novembre (32%) et en décembre (21%). Des événements moins fréquents et avec des proportions égales arrivent au mois d'octobre et de janvier (12 et 11% respectivement). Les trois mois de février à avril enregistrent une fréquence identique de 7% alors que l'avènement des pluies extrêmes au mois de mai est d'une fréquence faible (3%). L'effectif des pluies extrêmes comprises entre 20 et 40 mm est concentré surtout sur la période octobre-décembre alors que celui situé entre 40 et 60 mm est enregistré surtout au mois de novembre. Des pluies journalières d'une intensité supérieure à 60 mm en 24 heures sont enregistrées en novembre (événements du 14 novembre 2002 avec 75 mm et du 29 novembre 2010 avec 178 mm) et en janvier (événements du 15 janvier 1975 avec 67 mm et du 21 janvier 1996 avec 75 mm).

3. Ajustement des pluies extrêmes à la loi GEV (*Generalized Event Value*) et période de retour

En considérant les maxima journaliers enregistrés chaque année, on a opté pour une utilisation de la loi GEV (*Generalized Event Value*, à partir du *packageR* de Gilleland et Katz, 2016). Les paramètres du modèle ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. Les résultats sont reportés dans le tableau 1. Le paramètre de forme de signe positif (ξ= 0,168 ±0,084) signifie que la distribution des valeurs maximales est de type Fréchet qui suit une loi à queue lourde et montre l'importance du poids des valeurs extrêmes.

La visualisation graphique des résultats indique que les hypothèses d'utilisation de la loi d'ajustement GEV aux pluies extrêmes sont remplies (Fig.2). Néanmoins, on note la difficulté du modèle à s'ajuster à la pluie extrême du 29 novembre 2010. Il s'agit en effet d'un événement pluviométrique classé comme exceptionnel puisque la valeur enregistrée de 178 mm est nettement supérieure à celle du maximum secondaire de 75 mm, ce qui rend son ajustement par les lois statistiques habituellement utilisées difficile. Gilleland et Katz (2016) précisent que l'écart par rapport à la droite d'ajustement pour les valeurs les plus extrêmes est assez typique lors de l'analyse des valeurs extrêmes, surtout qu'il existe une incertitude considérable pour ces valeurs de telle sorte que de tels écarts à l'extrémité extrême ne soient pas nécessairement indicatifs d'hypothèses mal remplies. Sa période de retour selon la méthode d'approximation normale est de 1000 ans (Tab.1).

Tableau 1. Intervalles de confiance (CI) 95 % des paramètres de GEV selon une approximation normale et période de retour des précipitations maximales journalières enregistrées chaque année à la station synoptique de Casablanca (période : 1960-2016) (Source des données : Direction de la Météorologie Nationale Maroc).

	Limite inferieur de CI 95%	***Estimation***	***Limite supérieur de CI 95%***
Position k	27,74	30,86	33,98
Echelle α	8,52	10,91	13,30
Forme ξ	0,0042	0,168	0,332
Période de retour			
10 ans	51	61	71
50 ans	65	91	117
100 ans	69	107	144
1000 ans	71	173	275

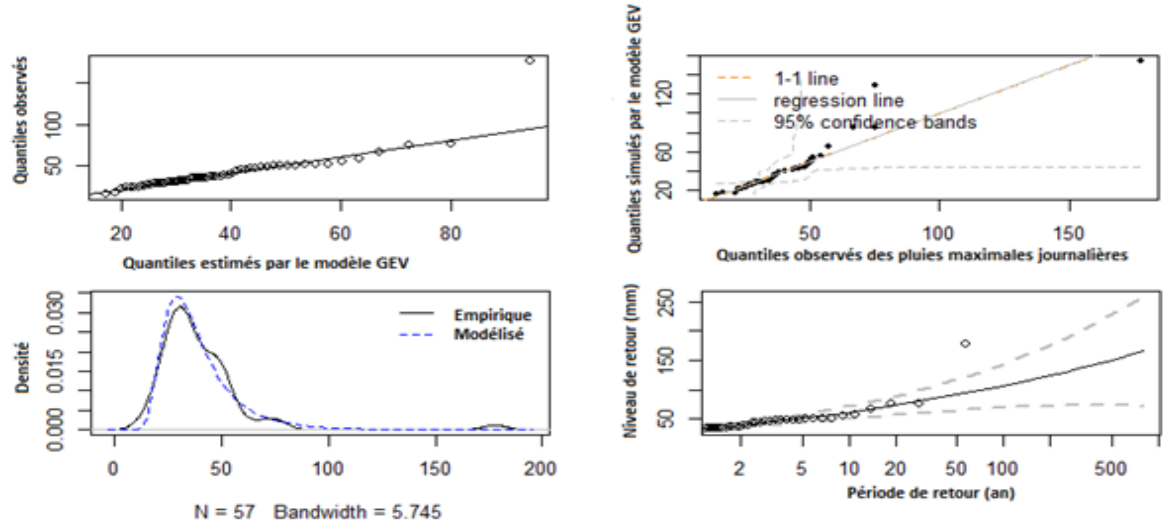


Figure 2. Ajustement du modèle GEV aux précipitations maximales journalières enregistrées à la station synoptique de Casablanca (période :1960-2016) (Source des données : Direction de la Météorologie Nationale Maroc) (*en haut à gauche : quantiles des données observées par rapport à ceux dérivés du modèle GEV ; en haut à droite : quantiles générés aléatoirement à partir du GEV et ajustés par rapport aux quantiles de données empiriques avec des intervalles de confiance à 95%, la ligne 1-1 d'exacte estimation et une ligne de régression ajustée ; en bas à gauche : adéquation entre densité empirique et densité ajustée ; en bas à droite : niveau de retour (mm) selon la période de retour (échelle logarithmique*)).

4. Lien entre les pluies extrêmes et les types de circulation atmosphérique

En mettant en relation le maximum annuel des précipitations journalières (Pjmax) et la moyenne de la même décade de l'indice ONA (Fig.3), il ressort des résultats (voir aussi Tab.2) une succession de phases positives de l'ONA pendant les périodes 1971-1975, 1986-1993 et 1998-2000. Les deux premières ont été interrompues par des phases négatives de l'ONA alors que la dernière période correspond à une suite continue de valeurs positives de l'ONA. Par ailleurs, on note une suprématie des ONA- pendant la première phase de la série (1962-1970), suivie par une série d'années consécutives de phase ONA- de 6 ans (1976-1981) et de 3 à 4 ans (1983-1985, 1996-1997, 2004-2007 et 2012-2015).

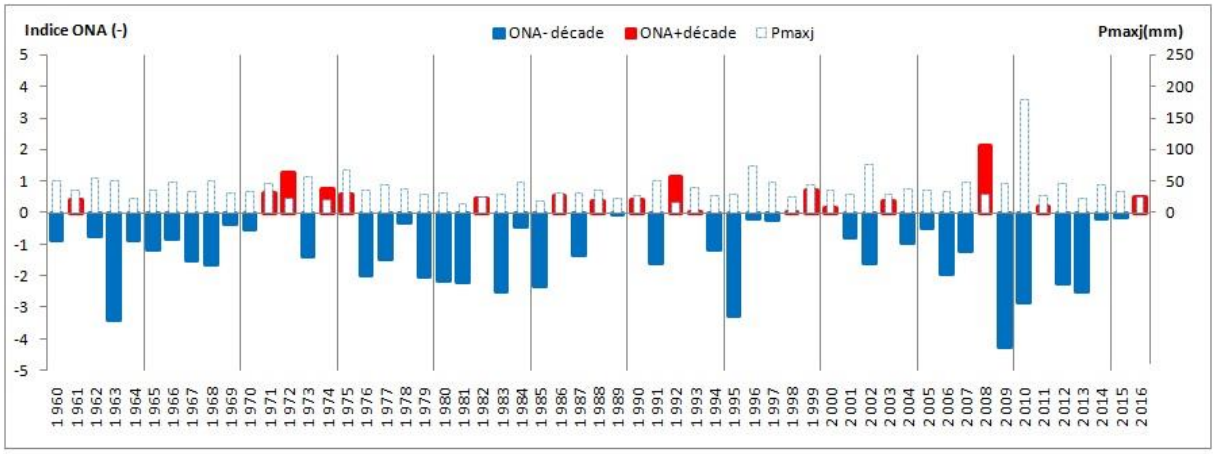


Figure 3. Évolution des maxima annuels des précipitations journalières en fonction de la moyenne décadaire de l'ONA (cas de la station synoptique de Casablanca ; période : 1960-2016) (Source des données pluviométriques : Direction de la Météorologie Nationale Maroc ; source des données de l'indice ONA : https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml).

La fréquence des événements pluviométriques extrêmes est dominée par un type de circulation ONA$^-$ (40,4%) et dorsale atlantique (AR : 35,1% des cas) qui est suivi par celui du blocage scandinave (SB : 21,1%). La phase ONA+ est minoritaire (Tab.2). Les épisodes pluvieux associés à un indice ONA+ sont légèrement dominés par un type AR (39,1%) qui est suivi, selon des proportions égales, par les types ONA- et SB (6%). Cette association « indice ONA+/épisode pluvieux extrême » peut être très rarement associée à un type de circulation ONA+ (8,7%). En revanche, l'association « ONA-/épisodes pluvieux extrêmes » est associée dans 50% des cas à un type ONA-, suivi par AR (32,4%) et SB (17,6%).

Tableau 2. Fréquence (%) des régimes de circulation associés aux pluies extrêmes à la station synoptique de Casablanca (période : 1960-2016), selon l'anomalie de l'indice NAO.

	ONA$^+$	***ONA$^-$***	***SB***	***AR***
Indice NAO+	*8,7*	*26,1*	*26,1*	*39,1*
Indice NAO-	*0*	*50*	*17*	*32,4*
Total	*3,5*	*40,4*	*21,1*	*35,1*

Conclusions et discussion

Les épisodes de pluies intenses se produisent généralement dans un contexte météorologique de fine échelle spatiale. Celui survenu le 29 novembre 2010 dans la ville de Casablanca a touché également les villes avoisinantes. Le choix de cette station météorologique a été motivé par trois raisons : la disponibilité des données pluviométriques journalières sur une longue période, sa représentativité du climat nord-atlantique à influence océanique et l'importance des enjeux socio-économiques menacés par les intempéries.

La pluviométrie extrêmement rare du 29 novembre 2010, jamais enregistrée dans l'histoire récente du climat de la ville de Casablanca et de ses environs, nous a poussés à nous interroger sur l'occurrence des pluies maximales et de leurs liens avec la dynamique atmosphérique. Cette situation météorologique rarissime est associée à un indice ONA- (-2,85) et à un régime de circulation ONA- qui est marqué par deux anomalies négatives de pression dont une centrée sur les Açores et l'autre sur les îles Baléares. La violence des pluies est expliquée par une alimentation en humidité en provenance du sud-ouest du pays en association avec une limite

frontale bien organisée au nord-ouest. En effet, la hauteur de pluie de 178 mm, enregistrée en 24 heures à la station synoptique de Casablanca, est d'une période de retour de 1000 ans, selon les résultats d'ajustement à la loi GEV des données des maxima annuels des précipitations journalières de la période 1960-2016. On retient aussi que les pluies extrêmes surviennent souvent pour la ville de Casablanca durant la période novembre-décembre. Ces événements se produisent assez souvent lors des périodes décadaires, précédant l'événement pluvieux, qui sont marquées par un indice ONA- ; mais ils peuvent avoir lieu aussi en période de phase ONA+. Ils sont beaucoup plus associés à un régime de circulation ONA- suivi par les régimes AR et SB. Par ailleurs, on assiste à une intensification du régime SB depuis le milieu des années 1970 ; ce résultat est signalé aussi par Driouech *et al*. (2010). Ce dernier type de régime peut être associé aussi bien à valeurs positives que négatives de l'indice ONA.

Bibliographie

Cassou C., Terray L., Hurrell J. W., & Deser C., 2004. *North* Atlantic Winter Climate Regimes: Spatial Asymmetry, Stationarity with Time, and Oceanic Forcing. *Journal of Climate*, 17(5), 1055–1068. Doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1055:nawcrs>2.0.co;2.

Delannoy H., 1997. Remarques sur la climatologie de la façade atlantique ibéro-marocaine au sud de 40 N. *Le climat, l 'eau et les hommes*. Presses Universitaire de Rennes, 301-317.

Dorta P., Marzol M.V., & Valladares P., 1993. Localisation et fréquence des cellules de pression dans l'Atlantique Nord, l'Europe Occidentale et le nord de l'Afrique (1983-1992). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6, 453-466.

Driouech F., Déqué M., & Sánchez-Gómez E., 2010. Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72, pp.1-10. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.

Gilleland E., & Katz R.W., 2016. extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software*, 72(8), 1-39. Doi:10.18637/jss.v072.i08.

Knippertz P., Christoph M., & Speth, P., 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric physics*, *83*(1-2), 67-88. Doi: 10.1007/s00703-002-0561-y.

Michelangeli P.A., Vautard R., & Legras B., 1995. Weather Regimes: Recurrence and Quasi Stationarity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(8*)*, 1237-1256*.* Doi:10.1175/1520-0469(1995)052<1237:wrraqs>2.0.co;2.

Tramblay Y., Badi W., Driouech F., El Adlouni S., Neppel L., & Servat E., 2012. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*, 82-83, 104-114. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.12.002

Tramblay Y., El Adlouni S., & Servat E., 2013. Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 3235–3248. Doi: 10.5194/nhess-13-3235-2013.

Vautard R., 1990. Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. *Amecican Meteorological Society*, vol. 118, 2056-2081.

EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE TEMPERATURES DE SURFACE DIURNE DANS L'AIRE MÉTROPOLITAINE DE METZ A PARTIR DE DONNEES LANDSAT

HASSANI N.[1], LEBAUT S.[1], DROGUE G.[1], SGHIR S.[2]

1 Centre de Recherche en Géographie (LOTERR EA 7304), Université de Lorraine, Nancy, France (nassima.hassani@univ-lorraine.fr)
2 Laboratoire de recherche en développement territorial, énergétique et environnemental (RDT2E), Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc

Résumé : *L'étude diachronique des températures de surface (LST) diurne d'été au niveau de l'aire métropolitaine de Metz est réalisée à l'aide de l'imagerie satellitaire Landsat sur la période 1985-2019. La méthode suivie a recours aux températures de surface calculées par l'algorithme Mono-Window développé par Qin et al. (2001). Les thermographies obtenues sont alors analysées pour identifier les zones de chaleur modérée, de chaleur intense ou de fraîcheur. Ensuite, les indices NDVI et NDBI, caractéristiques de l'évolution de l'occupation du sol sont mis en relation avec les LST. L'objectif est alors d'explorer les impacts des différents types d'occupation du sol sur leur dynamique en calculant l'indice écologique UTFVI. La comparaison des thermographies multidates et l'analyse de corrélation entre les différents indices indiquent que les zones à fort dégagement de chaleur ont connu une nette extension spatiale et une intensification entre 1985 et 2019. Cela pourrait a priori s'expliquer par le développement de plusieurs zones d'activités périphériques durant la période étudiée.*

Mots clés : *température de surface ; indices spectraux ; Landsat ; Metz Métropole*

Summary: ***Spatio-temporal evolution of diurnal surface temperatures in the Metz metropolitan area using Landsat data.*** *The diachronic study of diurnal Land Surface temperatures (LST) in the metropolitan area of Metz is achieved using Landsat satellite imagery for a period ranging from 1985 to 2019. The method followed uses the Land Surface temperatures calculated by the Mono-Window (MW) algorithm developed by Qin ad al. (2001). The thermographs obtained are then analyzed to identify areas of moderate and intense heating as well as urban cool areas. Subsequently, the NDVI and NDBI indices, which are characteristic of land use change, are connected to the LST. The objective is then to explore the impacts of different types of land use on LST by calculating the UTFVI ecological index. The comparison of the multidate thermographs and the correlation analysis between the various indices indicate that strong heating areas in the urban area of Metz experienced a clear spatial extension and intensification between 1985 and 2019. This could be explained by the development of several outlaying industrial/commercial areas during the period under study.*

Key words: *Land Surface Temperature (LST); spectral indices; Landsat; Metz Metropole*

Introduction

Cette étude s'intéresse à l'analyse des températures de surface diurnes dans la métropole de Metz à l'aide de données issues de la télédétection spatiale. Cette technique offre la possibilité de caractériser et de surveiller l'évolution du climat local des villes, en calculant la température de surface ou *Land Surface Température* (LST) par conversion du rayonnement infrarouge tellurique. L'objectif est ainsi d'étudier de manière diachronique cette variable climatique au cours de l'été météorologique entre 1985 et 2019 afin de mettre en lumière son évolution spatio-temporelle et d'identifier les facteurs qui l'influencent.

1. Données et méthodes

1.1. Zone d'étude

La métropole de Metz est située en région Grand-Est, dans le quart nord-est de la France (49° 07' N, 6° 40' E). Elle compte environ 220 000 habitants (Insee, 2016) répartis dans 44 communes, et s'étend sur 306 Km². Elle est traversée par deux cours d'eau : la Moselle et la Seille.

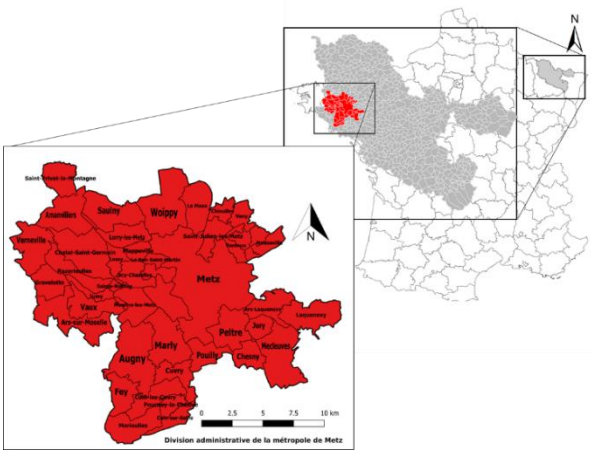


Figure 1. Carte de situation de la zone étudiée (France métropolitaine, Moselle, Metz-Métropole).

Selon la classification de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007), l'aire urbaine de Metz connait un climat dit tempéré chaud, type Dfb, avec des hivers relativement froids et des étés relativement chauds, avec une température annuelle moyenne de 9.9°C et un total pluviométrique annuel moyen de l'ordre de 750 mm. Le mois de juillet est le plus chaud de l'année avec une moyenne de 19.4°C et un record de 39.7°C enregistré par Météo-France le 25 juillet 2019 (Météo-France).

1.2. Evolution de l'occupation du sol sur la période 1985-2019

Les données représentées dans le tableau 1 ont été obtenues par une classification supervisée des images *Landsat TM* et *OLI* dans le but de cartographier l'évolution de l'occupation des sols de la métropole de Metz en 1985, 2003 et 2019. Les cartes d'occupation du sol produites ont alors été validées après comparaison avec les cartes obtenues par la classification *Corine Land Cover* et les images aériennes de *Google satellite*. Ainsi, on relève un doublement des surfaces urbanisées corrélativement à une réduction des surfaces agricoles et de celles des sols nus.

Tableau 1. Part relative des différentes classes d'occupation du sol de Metz-Métropole en 1985, 2003 et 2019

Année	**1985**	**2003**	**2019**
Classes d'occupation du sols	%	%	%
Eau	2,2	2,2	2,2
Végétation dense	25,1	13,4	33,8
Champs agricoles	56,0	66,3	45,2
Sol nu	7,6	0,3	0,1
Urbain	9,1	17,9	18,7
Total	100	100	100

1.3. Données utilisées

1.3.1. Les données Landsat

Une série d'images multi-dates fournies par les satellites *Landsat TM* 5 et *OLI/TIRS* 8 de la NASA a été utilisée pour estimer l'émissivité, la LST diurne et les indices spectraux (NDVI, NDBI et UTFVI). Ces images ont été téléchargées gratuitement sur le site de l'USGS (*United States Geological Survey*) : http://earthexplorer.usgs.gov/. Le choix d'utiliser ces données satellitaires est motivé par la relative précision des images (résolution spatiale de 30m dans le visible et le PIR, 120m pour le thermique *Landsat TM* et 100m pour le thermique *Landsat OLI*), et par les passages réguliers des satellites *Landsat* au-dessus du terrain d'étude à une fréquence de trois passages par mois à 10h UTC pour *Landsat* 5 et 10h30 UTC pour *Landsat* 8 et ce, contrairement à d'autres satellites, qui soit ne couvrent que partiellement le terrain d'étude (*ASTER*), soit présentent une résolution d'image moins précise (*NOAA-AVHRR*, *MODIS*, *Météosat*, etc). Toutefois, seules les images avec une couverture nuageuse inférieure à 10 % ont été exploitées dans le cadre de cette étude, soit celles correspondant aux étés 1985, 2003, 2006, 2010, 2015, 2018 et 2019.

1.3.2. Les données météorologiques

L'algorithme permettant d'estimer la LST requiert la connaissance de deux paramètres météorologiques, à savoir la température de l'air et l'humidité relative (Tab.2) au moment où les images ont été prises ce qui permet de les comparer entre elles.

Tableau 2. Moyennes journalières des variables météorologiques observées lors des journées d'étude par les stations d'ATMO Grand-Est, de Météo-France et du réseau REMTHAM

Jour	Température de l'air (C°)	HR (%)	Vent moyen (km/h)	Direction du vent	Pression (hPa)
09/08/1985	18.0	83	2	135	1036.0
11/08/2003	25.5	50	11	0	1019.1
18/07/2006	20.4	60	7	45	1021.3
07/08/2010	17.2	63	4	180	1020.1
04/07/2015	30.5	45	6	225	1018.9
26/06/2018	30.5	45	6	90	1023.6
29/06/2019	30.1	34	10	0	1018.2
23/08/2019	25.3	46	4	45	1024.9

1.4. Méthodologie

Celle-ci est décrite sur la figure 2. Le calcul de la LST s'est déroulé en deux phases. La première phase a consisté à répartir les images *Landsat* selon leur date d'acquisition en deux échantillons caractéristiques de situations caniculaires et non caniculaires, en s'appuyant sur l'historique établi par Météo-France. La seconde phase a consisté à caractériser d'une part, l'évolution des LST d'été à partir des sept dates disponibles et d'autre part, à identifier les pics d'intensité maximale et leur étendue spatiale en période caniculaire. La LST est calculée par l'algorithme *Mono-Window* (MW) développé par Qin *et al.* (2001) avec une marge d'erreur de 1 à 2°K (Sobrino *et al.*, 2004). Cet algorithme a pour avantage de n'utiliser qu'une seule bande thermique. En effet, bien que les données de Landsat OLI/TIRS 8 soient constituées de deux bandes thermiques (bandes 10 et 11), l'USGS recommande de ne pas utiliser la bande 11 car elle présente des erreurs dues à des anomalies de la lumière parasite (Renard *et al.*, 2019).

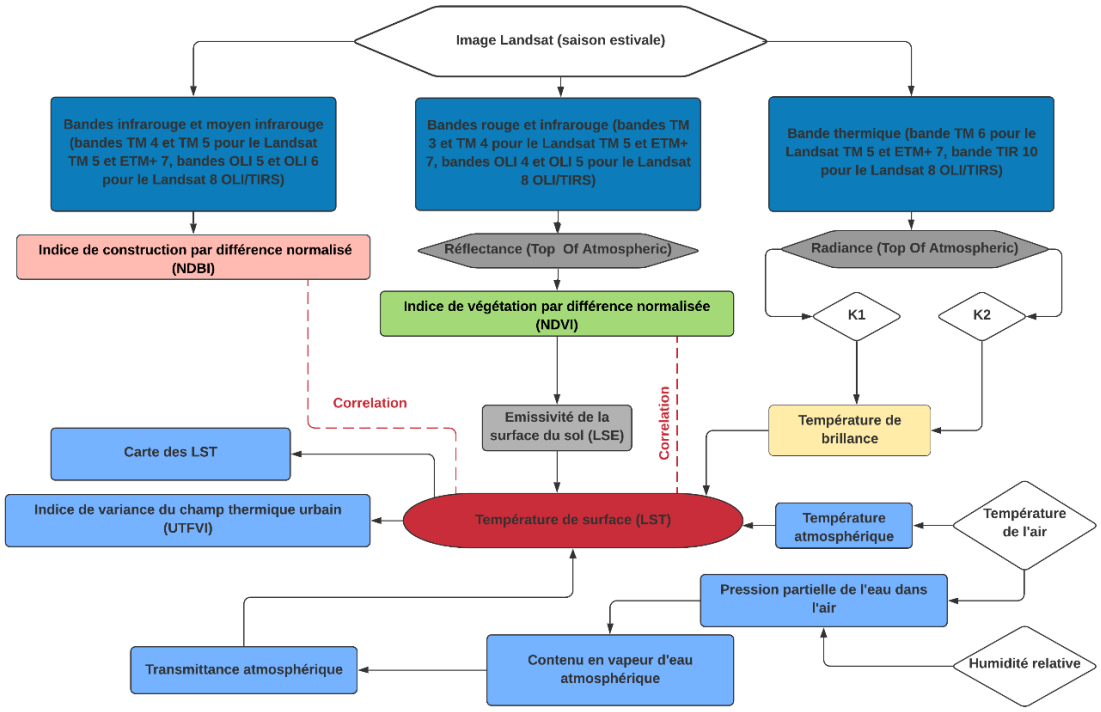


Figure 2. Chaîne de traitement décrivant la méthodologie de travail suivie pour l'extraction de la LST à partir des images Landsat

2. Résultats

2.1. Cartographie des LST en période de beau temps caniculaire

Les thermographies d'été (Fig.3) et le tableau 2 indiquent que pendant les périodes caniculaires de 2003 et 2006, les LST maximales dépassent le cadre strictement urbain et s'étendent jusqu'aux zones agricoles. En effet, des températures extrêmes sont relevées de manière identique aussi bien au centre-ville (milieu bâti dense) que dans les zones rurales dépourvues de végétation (sol nu). Cependant, pour les périodes caniculaires de 2015 et 2019, les LST élevées se concentrent dans toutes les zones urbaines denses et les zones industrielles (zones d'activités économiques ou ZAE) des communes de Metz, Woippy et Marly, ainsi qu'au niveau de l'aire de retournement des trains de Montigny-lès-Metz. Ainsi, l'extension spatiale et l'intensité de la chaleur en période caniculaire pourraient être corrélées à l'intensité et à la durée de ces périodes du fait de l'inertie thermique des surfaces au sol.

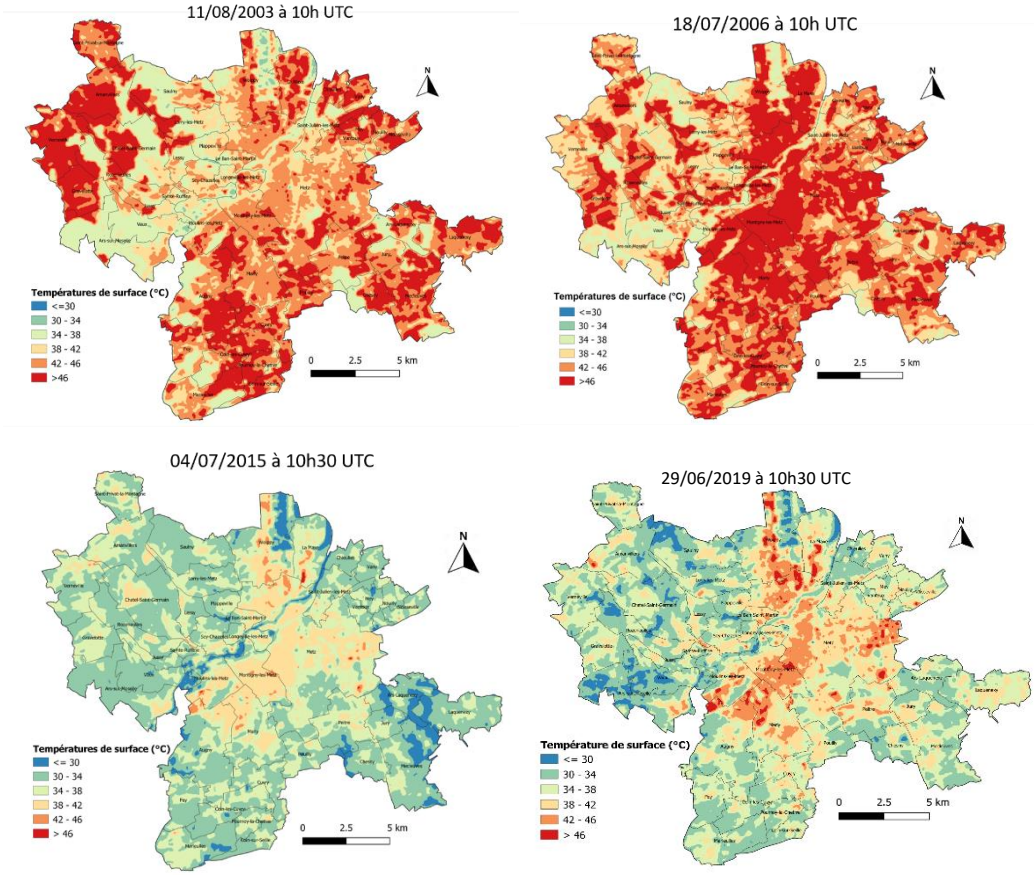


Figure 3. LST de la métropole de Metz par beau temps caniculaire : étés 2003, 2006, 2015 et 2019

Tableau 3. Statistique des LST de la métropole de Metz par beau temps caniculaire au cours des étés 2003, 2006, 2015 et 2019 (en °C)

Date	LST minimale	LST maximale	LST moyenne	Ecart type
11/08/2003	30,3	56,7	43,2	4,3
02/07/2006	32,4	57,0	39,0	3,6
04/07/2015	25,5	51,0	34,3	3,0
29/06/2019	26,7	57,4	35,9	4,0

En outre, les valeurs de NDVI maximales (non montrées) obtenues pour 2003 et 2006 sont inférieures à celles obtenues pour 2015 et 2019. Les valeurs maximales de NDBI (non montrées) pour 2003 et 2006 sont quant à elles, supérieures à celles de 2015 et 2019. Cela traduit le fait que les sols sont très chauds et très secs : or les canicules de 2003 et 2006 se sont manifestés respectivement aux mois d'août et de juillet, soit après les moissons, ce qui a pour effet de laisser de nombreuses étendues agricoles sans végétation. Les résultats de l'indice UTFVI (non montrés) de la métropole de Metz, qui mesure la qualité de vie écologique urbaine en fonction de l'intensité et de la répartition spatiale des LST, révèlent que l'aire d'étude connaît deux degrés de confort thermique : un confort thermique optimal pour une vie urbaine de qualité (UTFVI <0) et un confort thermique médiocre (UTFVI >0.02). Plus précisément, la plus grande partie de l'agglomération est affectée par des conditions de stress thermique : il s'agit des zones résidentielles et des zones d'activités ainsi que des champs agricoles nus. Le reste de l'agglomération connaît de bonnes conditions thermiques : ce sont toutes les zones rurales couvertes de végétation et les zones forestières.

2.2. Cartographie des LST en période de beau temps non caniculaire

D'après les cartes de températures présentées sur la figure 4, on remarque que les zones avec les LST les plus élevées, c'est-à-dire les zones qui dégagent le plus de chaleur, correspondent aux ZAE, et qu'elles sont plus étendues au mois de juin qu'au mois d'août, du fait qu'en général, le premier est plus chaud que le second (Tab.4).

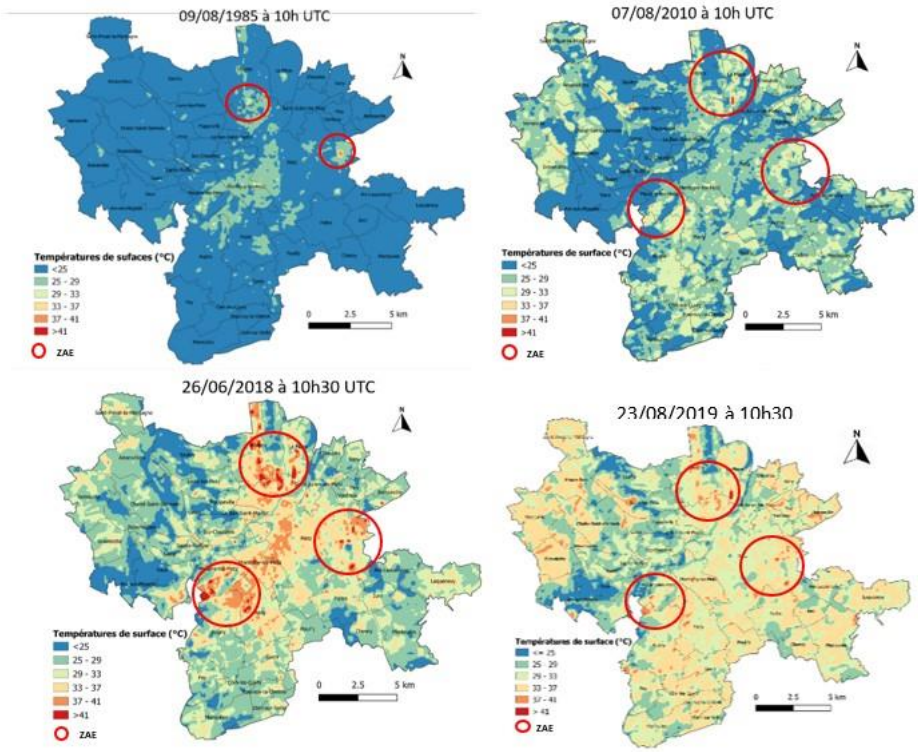


Figure 4. LST de la métropole de Metz en période non caniculaire : étés 1985, 2010, 2018 et 2019.

Tableau 4. Statistique des LST de la métropole de Metz par beau temps non caniculaire au cours des étés 1985, 2010, 2018 et 2019 (°C).

Date	LST minimale	LST maximale	LST moyenne	Ecart type
09/08/1985	12.7	39.9	20.9	2.7
07/08/2010	10.0	43.7	25.3	4.2
26/06/2018	15.9	52.8	29.4	4.0
23/08/2019	19.6	47.5	31.3	3.5

Cela montre que l'échauffement de surface nécessite un fort ensoleillement et un assèchement des sols pour se développer et atteindre son intensité maximale. Par ailleurs, lorsque l'on s'intéresse uniquement aux cartes du mois d'août, on remarque que les LST sont plus élevées dans les zones urbaines, mais également dans les champs agricoles nus car la végétation y est plus clairsemée (moisson, sols secs, etc.). L'analyse des thermographies multi-dates montre également que les zones les plus chaudes se sont étendues en périphérie entre 1985 et 2019 et ce dans toutes les directions de l'espace : en 1985, les zones les plus chaudes représentaient 26.9% du territoire métropolitain contre 37.2% en 2019. Il en ressort donc les zones de forte chaleur se sont développées au cours de la période étudiée (34 ans), cette extension étant corrélée à la croissance urbaine de l'agglomération. La part des surfaces urbanisées est en effet passée dans le même temps, de 9.1% à 18.7%. Cela démontre la relation étroite liant la distribution spatio-temporelle des LST et l'artificialisation des sols.

Conclusions et discussion

Cette étude, inédite sur le territoire de Metz-Métropole, a permis de caractériser l'évolution spatio-temporelle des températures de surface (LST) diurne sur plusieurs étés (marqués pour certains par des paroxysmes chauds remarquables) entre 1985 et 2019. Sous cet angle, l'aire urbaine de Metz-Métropole se présente comme un territoire-archipel constitué d'une mosaïque de microclimats, où se côtoient des zones chaudes et des zones plus fraîches. Le champ des LST est spatialement structuré par les surfaces dont les propriétés physiques et radiatives (faible réflectivité solaire, forte diffusivité thermique, faible capacité thermique massique) favorisent l'échauffement diurne par absorption du rayonnement solaire et par faible émissivité dans l'IR, autrement dit par les zones urbaines denses et les zones industrielles. Fait intéressant, on constate une progression du front des fortes LST en période caniculaire qui s'étend jusqu'aux espaces périphériques à la ville, dépourvus de végétation. Par ailleurs, leur intensité maximale s'est nettement accrue ces dernières années, ce qui coïncide avec l'extension relativement importante des surfaces urbanisées qu'a connu l'aire urbaine de Metz avec la création de plusieurs ZAE périphériques telles que la ZAE du Parc Technopôle, la ZAE d'Augny, la ZAE de la Maxe et la ZAE de Woippy. Cette extension s'est accompagnée d'une réduction des espaces naturels et boisés. Si cet étalement n'est pas maîtrisé et accompagné de mesures d'aménagement destinées à limiter l'échauffement (toiture végétalisée ou cool roof par exemple), on peut s'attendre à une amplification du phénomène. Les thermographies produites dans le cadre de ce travail, par leur caractère démonstrateur, serviront de support pour rendre concrète l'adaptation au changement climatique pour le grand public et l'accompagner au changement en matière de comportement et de pratique des lieux en période de forte chaleur.

Bibliographie

Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.

Qin Z., Karnieli A., Berliner P., 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719-3746.

Renard F., Alonso L., Fitts Y., Hadjiosif A., Comby J., 2019. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing*, 11(3), 299.

Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 . *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440.

DIFFERENCES DE TEMPERATURE ENTRE UNE FORET ET UN SITE OUVERT ADJACENT EN HIVER ET EN ETE

JOLY D.

UMR 6049 ThéMA, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France (daniel.joly@univ-fcomte.fr)

Résumé : *La température observée dans deux peuplements (feuillus et conifères) de la forêt de Chaux (Centre-Est de la France) est comparée à celle de la station Météo-France de Arc-et-Senans située à 4 km de distance et à la même altitude. Les écarts de température entre les deux milieux et le site ouvert sont analysés lors des tn et des tx journaliers relevés entre 2017 et 2019. Lors des tn, les écarts entre les deux milieux sont quasi inexistants, et à peine plus élevés en été (-1.1°C) qu'en hiver. Lors des tx, ils sont plus élevés (-1.6°C en hiver et -3.8°C en été). Les deux types de peuplements présentent peu de différences entre eux. L'amplitude thermique journalière est cependant beaucoup plus élevée en site ouvert qu'en forêt, un peu plus élevée sous feuillus que sous conifères.*

Mots clés *: température ; forêt ; site ouvert ; Franche-Comté*

Summary: ***Temperature differences between a forest and an adjacent open site in winter and summer.*** *The temperature observed in two stands (deciduous trees and conifers) in the forest of Chaux (central-eastern France) is compared to that of the Météo-France station of Arc-et-Senans located 4 km away and at the same altitude. Temperature differences between the two environments and the open site are analyzed for daily tn and tx readings taken between 2017 and 2019. During tn, differences are almost non-existent, and only slightly higher in summer (-1.1°C). During tx, the differences between the two environments are higher (-1.6°C in winter and -3.8°C in summer). There is little difference between the two types of stands. However, the daily thermal amplitude is much higher in open sites than in forests, a little higher under deciduous trees than under conifers.*

Key words: *temperature; forest; open site; Franche-Comté*

Introduction

La forêt agit de manière sensible sur quasiment toutes les variables du climat, notamment les températures. Grâce au couvert forestier constitué de feuilles, branches et troncs, le rayonnement solaire direct peut être intercepté en totalité ou parvenir à la surface du sol de manière atténuée sous la forme de spots de taille réduite (Porté *et al.*, 2004). De plus, l'activité photosynthétique et la transpiration des végétaux de toute nature absorbent une part non négligeable d'une énergie qui, en site ouvert, est utilisée à réchauffer l'air des basses couches. Il s'en suit que, comparativement aux espaces ouverts, les forêts présentent des températures généralement plus douces le matin et plus fraîches l'après-midi (Joly, 2015). Cette disposition offre des conditions favorables à une faune et une flore spécifique (Joly et Gillet, 2017 ; Landolt *et al.*, 2010) et des aptitudes bioclimatiques favorables aux activités récréatives, la promenade par exemple, par temps chaud (Renaud, 2010 ; Renaud and Rebetez, 2009). Ces dispositions sont aujourd'hui questionnées dans le contexte du changement climatique (Lenoir *et al.*, 2010 ; Peringer *et al.*, 2013).

Cette situation générale est localement nuancée par de nombreux facteurs au nombre desquels la nature des peuplements forestiers est primordiale. Les conditions thermiques sont susceptibles de varier d'un peuplement à un autre selon le nombre de strates arbustives et la densité des arbres (Prévosto *et al.*, 2020) ou à l'indice de surface foliaire (von Arx *et al.*, 2013). Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'analyser la réponse thermique de deux types de peuplement (feuillus et conifères) comparativement à la température relevée dans un site ouvert proche. Une attention toute particulière sera donnée à la comparaison de l'écart de température entre les deux milieux et entre l'hiver et l'été, deux saisons caractérisées par l'absence puis la présence de feuilles sur les arbres à feuilles caduques tandis que les résineux conservent leur feuillage toute l'année. L'aire d'étude est celle de la forêt de Chaux située en plaine, à cheval

entre les départements de Doubs et du Jura en Bourgogne-Franche-Comté (Fig.1). Les données enregistrées au cours de trois années (2017 à 2019) seront mobilisées.

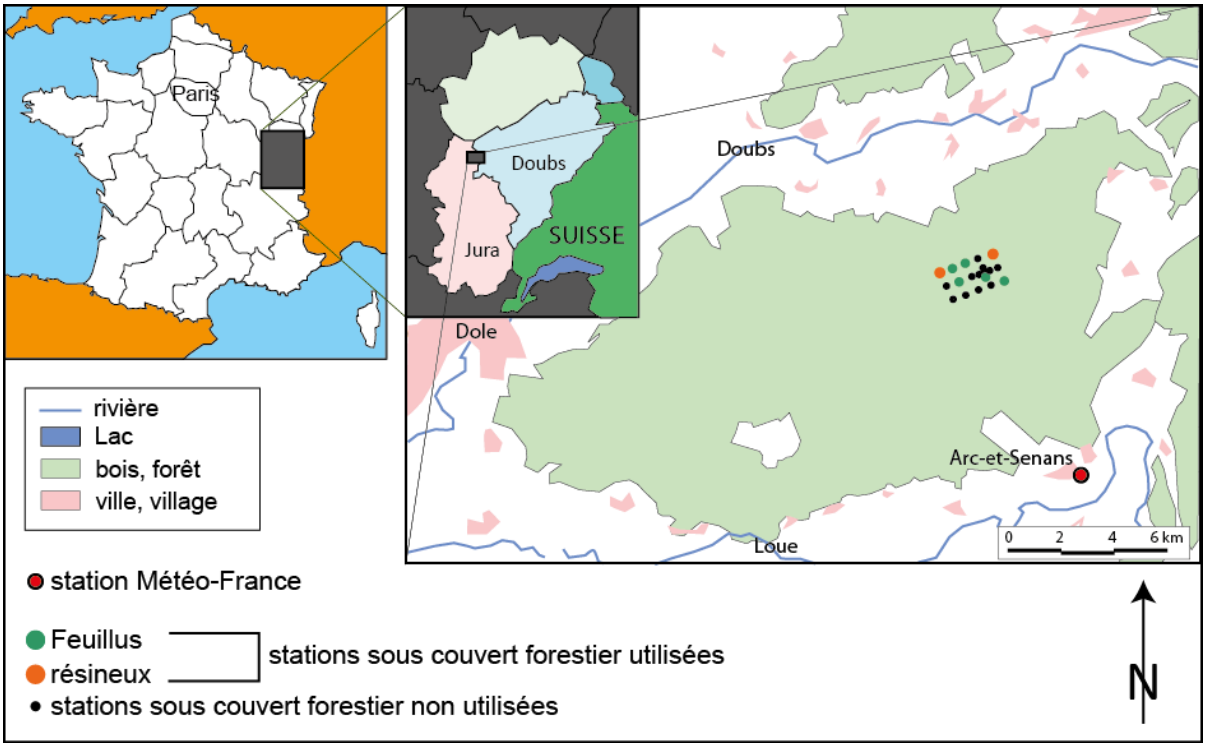


Figure 1. Localisation de l'aire d'étude

1. Données et méthodes

La température sous couvert forestier (SCF) est observée dans la forêt de Chaux dont la surface est supérieure à 200 km². Malgré son apparente homogénéité, la forêt de feuillus présente de subtiles variations dans sa composition (chênaie pédonculée, chênaie boulaie, hêtraie boulaie, hêtraie charmaie pour l'essentiel).

Les peuplements de feuillus sont dominants mais pas exclusifs puisqu'ils se juxtaposent avec des peuplements réduits de résineux (sapins, pins) qui apparaissent ponctuellement en taches de quelques hectares. La densité du couvert arbustif est très variable avec un indice foliaire inférieur à 3 dans les secteurs en phase de régénération et à 5-6 sous chênaie compacte ou plus sous sapinière dense. L'apparition des premières feuilles sur les arbres à feuilles caduques dépend des essences et du profil climatique des quelques mois antérieurs. En forêt de Chaux, les arbres redémarrent leur activité métabolique entre la fin mars à la mi-avril selon les années. Il faudra ensuite au moins trois semaines avant que la couverture foliaire soit suffisamment dense pour intercepter efficacement le rayonnement solaire. On peut ainsi considérer que le mois d'avril fait transition entre l'hiver, période de dormance et l'été. La transition entre l'été et l'hiver se produit au cours des mois d'octobre et de novembre.

La température est observée grâce à un réseau comportant 23 capteurs répartis sur une surface de 8 km². Chaque capteur est accroché sur un arbre à 1.5 m au-dessus du sol. De manière à minimiser la variation quant à la réponse thermique, seuls sont retenus 8 capteurs situés sous peuplement dense (indice de surface foliaire élevé correspondant à un recouvrement de la voûte céleste par les feuilles supérieur à 95% [estimation visuelle effectuée en été]). Six d'entre eux sont situés dans des peuplements feuillus, les deux autres sont situés sous sapinière. Les températures ont été observées au rythme d'une capture toutes les 2 minutes entre le 7 avril 2017 et le 30 novembre 2019. Compte-tenu de différents problèmes techniques, la base de données comporte 831 jours d'enregistrement (lacunes = 14%). La température minimale (tn)

et maximale (tx) journalières sont extraites de la base de données. Parallèlement, la station d'Arc-et-Senans gérée par Météo-France (MF) et située à 4.5 km de distance du barycentre des capteurs SCF fournit une température tn et tx quotidienne. Tous les capteurs et les stations MF sont situés à environ 265 m d'altitude (± 5 m) sur un ensemble topographique plan à peine ondulé.

Les séries de températures tn et tx quotidiennes sont traitées séparément pour chaque site. Les données SCF tn et tx sont d'abord moyennées en fonction du groupe auquel elles appartiennent. A la suite de cette opération, nous obtenons deux valeurs de température quotidiennes SCF à la fois pour le tn et le tx, l'une représentative des peuplements feuillus, l'autre représentative des sapinières. La différence entre chacune d'elles et la température à la station MF observée au même moment traduit l'écart de température entre chaque type de peuplement et le site ouvert de référence. Une valeur d'écart positive est obtenue lorsque la température SCF est supérieure à celle observée à la station MF ; et inversement pour une valeur d'écart négative : il fait alors plus froid en forêt qu'en site ouvert. Le traitement des données visera surtout à mettre en évidence les écarts de températures selon les tn et tx, les peuplements et les saisons (hiver vs été). Nous montrerons enfin de quelle manière agit l'augmentation de la température observée en site ouvert sur l'importance de l'écart de température entre les deux milieux au moyen d'un graphique simple prenant appui sur les tn et tx quotidiens de juillet 2019.

2. Résultats

2.1. Ecarts moyens d'hiver et d'été

En hiver, les écarts entre la tn moyenne relevée SCF et la station MF sont faibles, voire inexistants et de l'ordre de -1°C en été (Tab.1) : il fait à peine plus frais SCF qu'en site ouvert. La température sous peuplement de feuillus et sous conifères est sensiblement la même.

Tableau 1. Ecarts de température tn entre les deux types de peuplements et la station Météo-France

	Hiv 2017-2018	Hiv 2018-2019	Eté 2017	Eté 2018	Eté 2019
Feuillus	-0,1	-0,4	-1,2	-1,0	-1,3
Conifères	0 ,1	O,05	-1,1	-0,9	-1,1

Lors des tx, les écarts deviennent très élevés comparativement à ceux relevés lors des tn (Tab.2). En hiver, il fait plus frais en moyenne de 1,6°C SCF qu'en site ouvert avec une légère disparité selon le type de peuplement : la température est un peu plus douce sous feuillus que sous conifères. En été, les écarts deviennent très élevés. Les sites SCF présentent des températures plus basses que la station MF de 3,8°C en moyenne, identique pour les deux peuplements même si de petites différences entre eux apparaissent selon les années.

Tableau 2. Ecarts de température tx entre les deux types de peuplements et la station Météo-France

	Hiv 2017-2018	Hiv 2018-2019	Eté 2017	Eté 2018	Eté 2019
Feuillus	-1,6	-1,3	-4,2	-3,6	-3,6
Conifères	-1,8	-1,9	-3,9	-3,7	-3,8

Les tendances mises en évidence dans les tableaux 1 (écarts lors des tn) et 2 (tx) nous amènent à envisager le problème des écarts de température entre forêt et site ouvert d'une autre manière

avec les valeurs d'amplitude thermique journalière en chacun des trois milieux (Tab.3). On constate que l'amplitude thermique journalière est plus atténuée (1) sous couvert forestier qu'en site ouvert, (2) sous peuplement de conifères que sous peuplement de feuillus. Par rapport à celle du site ouvert, l'amplitude thermique journalière est plus faible de 1,2°C en hiver sous feuillus contre 1,85°C sous conifères. En été, toujours en comparaison avec le même référentiel, l'amplitude est plus faible de respectivement de 2,4°C et 2,8°C sous ces deux types de peuplement.

Tableau 3. Ecarts d'amplitude thermique entre les deux types de peuplements et la station Météo-France

	Hiv 2017-2018	Hiv 2018-2019	Eté 2017	Eté 2018	Eté 2019
Feuillus	-1,6	-0,8	-3,0	-2,6	-2,3
Conifères	-1,9	-1,8	-3,2	-2,9	-2,7

2.2. Variation journalière des températures

Les moyennes saisonnières mettent en évidence des tendances lourdes qui masquent les variations fines des températures d'un jour à l'autre dont l'examen est tout aussi intéressant. A titre d'exemple, nous nous appuierons sur les mois de janvier et de juillet 2019, ce dernier qui détenant le record de chaleur séculaire dans l'aire d'étude (40°C à Arc-et-Senans le 25 juillet).

2.2.1. Variation journalière des températures en janvier 2019

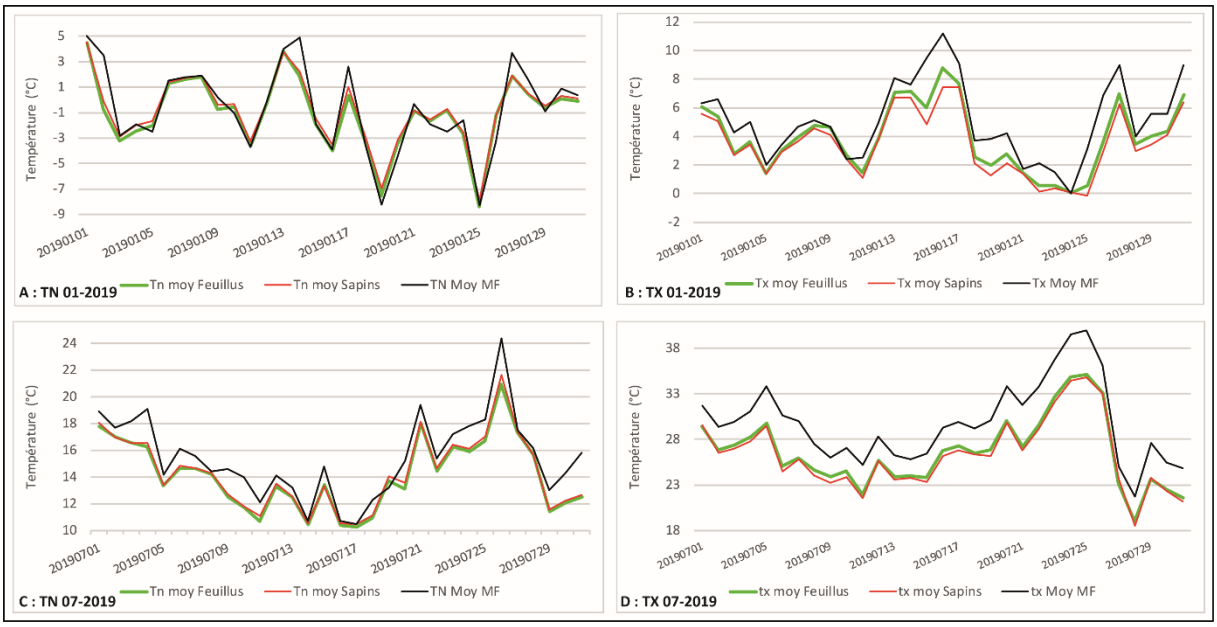


Figure 2. Tn, tx journalières en janvier et juillet 2019

En janvier 2019, la température minimale à la station MF fluctue entre -8,3°C et 5°C (Fig.2A). La tn SCF suit fidèlement celle du site ouvert tout en amortissant les pics et les creux les plus saillants. C'est quand la tn MF est la plus élevée que les écarts entre la température SCF et celle du site ouvert sont les plus importants : quand les tn MF sont supérieures à Q3=3°C, la tn moyenne SCF est de 2,3°C (écart de -1,9°C). Lors des tn les plus froides, les écarts entre les trois sites sont plus faibles en valeur absolue et positifs : il fait plus doux de 0.7°C sous forêt quand la tn MF est inférieure à -3° (Q1). La température sous sapinière est un peu plus douce (différence de +0,4°C) que sous feuillus quand les températures MF sont froides et pratiquement identiques quand la tn MF est élevée.

Lors des tx de janvier, on retrouve les mêmes tendances avec cependant un amortissement plus prononcé des températures SCF (Fig.2B). Quand les tx MF sont supérieures à Q3=6°C (moyenne 8,3°C), elles ne dépassent pas 6,2°C SCF. La forêt reste plus fraiche de 2,1°C qu'en site ouvert. Avec des tx faibles, inférieures à Q1 (< 2°C), la température SCF est de 1,1°C contre 1,7°C en site ouvert (écart -0,6°C).

2.2.2. Variation journalière des températures en juillet 2019

La variation journalière des trois variables en juillet 2019 confirme les tendances établies précédemment. Les tn enregistrés suivent une variation marquée par une faible différence entre les deux peuplements (Fig.2C). Par rapport à la station MF, les valeurs sont presque toujours plus faibles (écart moyen -1 ,1°C) mais l'écart est irrégulier : nul certains jours affectés d'une température tn faible, inférieure à 10°C, il dépasse ponctuellement les 3°C lorsque le tn est élevé, supérieur à 18°C : lorsque les températures sont fraîches (Q1=13°C), les températures s'établissent en moyenne à 11,9°C en site ouvert et à 11,1°C SCF. Lors des tx, la différence de température entre les feuillus et les conifères est également très réduite mais l'écart avec le site ouvert est plus élevé, en moyenne -3,4° (Fig.2D). Lors des tx, la température est toujours inférieure SCF avec un écart minimum et maximum qui s'établissent à respectivement -1,6°C et -5,9°C. Les écarts de température les plus élevés entre la forêt et le site ouvert se produisent préférentiellement lorsque la température dépasse Q3=33°C : il fait en moyenne plus frais SCF de 4,4°C. Ainsi, lors de la journée la plus chaude relevée depuis que la station existe (25 juillet 2019), la température à la station d'Arc-et-Senans atteint 40°C mais plafonne à 34.8°C sous conifères et 35.1°C sous feuillus.

Conclusions

L'acquisition des données, malgré sa durée réduite, s'est produite au moment des deux canicules de l'été 2019 et notamment celle de juillet. A contrario, elle n'a pas été suffisamment longue pour intégrer une ou plusieurs périodes de gel intense, le minimum ayant été de -8°C seulement. Les écarts par température froide n'ont ainsi pas pu être établis. Toutefois, les observations sur le terrain ont été assez nombreuses pour en tirer des enseignements à vertu généralisante qui vont dans le même sens que d'autres études antérieures. Les écarts de température entre les sites SCF et la station MF sont plus faibles l'hiver que l'été, lors des tn que lors des tx (de Frenne *et al.*, 2019), sous peuplement de conifères plutôt que sous peuplement de feuillus. Il en résulte que l'inertie thermique sous conifères est plus prononcée que sous feuillus, ce qui rejoint les observations de Von Arx *et al.* (2012) en Suisse. Il résulte de ces résultats un comportement thermique différent selon les milieux considérés (Renaud *et al.*, 2011). En hiver, l'absence de feuillage des peuplements à feuilles caduques permet une plus intense déperdition énergétique sous la forme de rayonnement infra-rouge que sous conifères dont les feuilles persistantes réduisent cet effet et sont plus à même de confiner l'air. Les peuplements de feuillus apparaissent donc, du point de vue thermique, intermédiaires entre les sites ouverts et les peuplements de conifères. En été, le comportement thermique des deux milieux se rapproche et devient même quasiment identique lors des tx en raison d'une évapotranspiration et d'une protection vis-à-vis du rayonnement solaire de même nature, le feuillage des deux peuplements étant beaucoup moins différencié qu'en hiver.

Même si les tendances révélées sont clairement identifiées, elles restent fragiles compte tenu de la courte durée d'observation mentionnée ci-dessus. Les écarts calculés pour les deux hivers et les trois étés de l'étude montrent des variations qui sont à mettre au compte des conditions climatiques différentes d'une année à l'autre. Dans un autre ordre d'idée, les variations journalières ont révélé que les écarts de température entre site ouvert et forêt dépendent étroitement du degré d'élévation des températures (de Frenne *et al.*, 2019). En première

approximation plus ces dernières sont élevées, plus les écarts augmentent et ce, tant pour les tn que pour les tx. Cet aspect méritera des recherches plus approfondies.

Remerciements

L'auteur remercie Météo-France pour la mise à disposition des données (convention avec l'université de Bourgogne) et l'ONF Bourgogne-Franche-Comté pour son soutien.

Bibliographie

De Frenne P., Zellweger F., Rodríguez-Sánchez F., Scheffers B.R., Hylander K., Luoto M., Vellend M., Verheyen K., Lenoir J., 2019. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 744-749. Doi:10.1038/s41559-019-0842-1

Joly D., 2015. Etude comparative de la température en forêt et en espace ouvert dans le parc Naturel Régional du Haut-Jura. *Climatologie*, 11. URL : http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=562.

Joly D., Gillet F., 2017. Interpolation of temperatures under forest cover on a regional scale in the French Jura Mountains. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 659-670. Doi:10.1002/joc.5029

Landolt E., Bäumler B., Erhardt A., *et al.*, 2010. *Flora Indicativa – Ecological Indicator Values and Biological Attributes of the Flora of Switzerland and the Alps*. Haupt, Bern, CH.

Lenoir J., Gégout J.C., Dupouey J.L., Bert D., Svenning J.C., 2010. Forest plant community changes during 1989–2007 in response to climate warming in the Jura Mountains (France and Switzerland). *Journal of Vegetation Science*, 21, 949-964.

Peringer A., Siehoff S., Chételat J., Spiegelberger T., Buttler A., Gillet F., 2013. Past and future landscape dynamics in pasture-woodlands of the Jura Mountains under land-use and climat change. *Ecology and Society* 18(3), 11. URL: www.ecologyandsociety.org/vol18/iss3/art11/

Porté A., Huard F., Dreyfus P., 2004. Microclimate beneath pine plantation, semi-mature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 175-182.

Prévosto B., Helluy M., Gavinet J., Fernandez *et al.*, 2020. Microclimate in Mediterranean pine forests: What is the influence of the shrub layer? *Agricultural and Forest Meteorology*, 107856, 282–283. Doi: doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107856.

Renaud V., 2010. *Comparaison des caractéristiques climatiques sous couvert forestier et hors couvert; Potentiel bioclimatique de la forêt pour le bien-être humain*. Thèse n°4795 (2010), EPFL de Lausanne, Suisse, 105p.

Renaud V., Innes J.L., Dobbertin M. *et al.*, 2011. Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland for different types of forests over 10 years (1998−2007). *Theoretical and Applied Climatololy*, 105, 119-127. Doi:10.1007/s00704-010-0361-0.

Renaud V., Rebetez M., 2009. Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 873-880.

Von Arx G., Dobbertin M., Rebetez M., 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166-167, 144-155.

Von Arx G., Pannatier E.G., Thimonier A., Rebetez M., 2013. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology*, 101(5), 1201-1213. Doi: doi.org/10.1111/1365-2745.12121

L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES TERRITOIRES

JUVANON DU VACHAT R.

Météo et Climat, 73, Saint Mandé, France (RJduVachat@gmail.com)

Résumé : *L'adaptation au changement climatique correspond à la nécessité de s'adapter à une planète qui se réchauffe de plus en plus. Elle diffère de l'atténuation qui vise à limiter les émissions de gaz à effet de serre. L'adaptation est indispensable, à cause de l'inertie de la machine climatique et de la durée de vie des gaz à effet de serre. Elle a aussi un caractère local ou régional. En conséquence les territoires sont la zone géographique idéale pour organiser l'adaptation. Après une revue du concept d'adaptation et des actions nationales en France (Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique, Plan National d'Adaptation au Changement Climatique) seront présentés les efforts et les actions réalisés dans trois régions : la région Ouest, la Bretagne et la Nouvelle Aquitaine.*

Mots clés *: changement climatique ; impacts ; adaptation ; territoires ; région Ouest ; Nouvelle Aquitaine*

Summary: ***Adaptation to climate change in the territories.*** *Adaptation to climate change comes from the need to adapt the global earth or country to an atmosphere more and more hot. That differs from mitigation, which is the cut of emissions of green-house gases. Such adaptation is absolutely necessary, due to the inertia of the climate system and the life times of green-house gases in the atmosphere, and it acts on local or regional domain. Then the territories appear to be the best place to define an adaptation plan. In this paper, we review the adaptation concept and present the national activities developed for that objective (Observatory ONERC and Adaptation plan PNACC). An illustration of regional adaptation plan is given with the three French regions: Ouest region, Brittany and Nouvelle Aquitaine.*

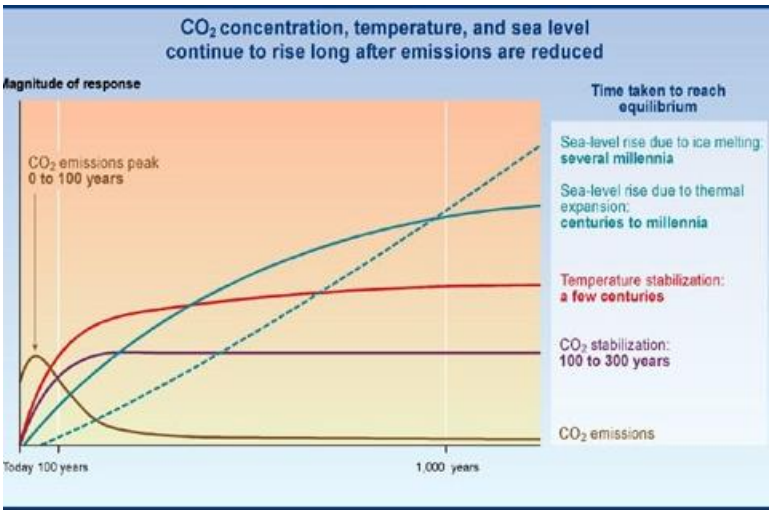
Key words: *climate change ; impacts ; adaptation ; districts ; région Ouest ; Nouvelle Aquitaine*

Introduction-Définition

L'adaptation au changement climatique provient de la nécessité de s'adapter à une planète qui se réchauffe de plus en plus (4 ou 5°C en moyenne globale en 2100 pour le scénario RCP 8.5) même si des efforts d'atténuation pour limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sont réalisés. On voit aujourd'hui, en 2020, que ces efforts ont beaucoup de mal à se réaliser pour être sur une trajectoire sobre en carbone (Académie des Sciences, 2020). Aussi, il apparaît indispensable de s'adapter au climat futur, tout en travaillant simultanément sur l'atténuation. Les deux opérations sont cependant de nature très différente : l'atténuation porte sur la physique et la chimie des émissions de GES, alors que l'adaptation porte sur les projections climatiques futures et l'identification des impacts. Ainsi on cherche à s'adapter au climat futur, défini par des simulations régionales (c'est-à-dire à échelle horizontale fine) du climat, nécessairement entachées d'incertitudes. De ce fait, l'adaptation a un caractère local ou régional et s'exprime clairement à l'échelle des territoires ou des régions. Après un bref rappel sur l'adaptation au niveau international, les actions nationales en France (ONERC, PNACC) puis au niveau des territoires seront présentées. Elles seront illustrées avec la région Ouest (Merot *et al.*, 2012), la région Bretagne, enfin la région Sud-Ouest, qui s'est transformée en Nouvelle Aquitaine en 2016, les travaux donnant lieu à deux rapports successifs (Le Treut *et al.*, 2013 et 2018).

1. Les difficultés de l'adaptation

L'adaptation est un concept délicat à manier. En outre, comme l'a souligné Godard (2010), on craint en réalisant de l'adaptation d'en oublier l'atténuation. En fait il faut faire les deux opérations, qui sont cependant de nature très différente.



La raison fondamentale pour laquelle il est important de s'y consacrer est la suivante : même si on arrête d'émettre des GES, du fait de l'inertie du climat et de la durée de vie des GES (100 ans pour le CO2 par exemple), l'effet de ce que l'on a déjà émis se fera sentir longtemps dans le futur : 100 ans pour la température, 1000 ans pour la hausse du niveau des mers.

Figure 1. Après réduction des émissions de CO2 et stabilisation des concentrations atmosphériques, la température de l'air en surface continue d'augmenter pendant un siècle ou plus (3ème rapport d'évaluation du GIEC, IPCC 2003, p. 18)

La figure 1 issue du rapport GIEC illustre ce phénomène. L'explication physique répond en partie aux interrogations. De plus, les projections sur lesquelles on peut s'appuyer sont nécessairement entachées d'incertitudes, qui ne se sont pas vraiment réduites au cours du temps (Morel, com. pers.). Par ailleurs les projections climatiques à +1,5°C ou à +2°C de réchauffement moyen planétaire pour 2100 présentent des structures très différentes, comme l'a montré le récent rapport spécial du GIEC (www.ipcc.sr1,5). Enfin, au-delà d'un réchauffement de 3°C, on pourrait craindre des résultats de simulation chaotiques et une quasi-impossibilité à s'adapter. C'est ce qui encourage fortement à suivre une trajectoire sobre en carbone, en adoptant une réduction drastique des émissions, comme l'indique le récent rapport du Sénat (Dantec et Roux, 2019).

Concrètement un certain nombre de secteurs ont commencé leur adaptation, de façon empirique ou naturelle parce que les acteurs y ont observé un changement (disparition de la neige, précocité du vignoble, précocité des arbres fruitiers, …). C'est le cas notamment de l'agriculture, de la viticulture et de la sylviculture. Par ailleurs, les évènements extrêmes météorologiques ou climatiques sont l'occasion d'un précieux retour d'expérience, comme la canicule de l'été 2003 en France, ou la tempête Xynthia en Février 2010 (Przyluski et Hallegatte, 2012). Cela donne souvent une bonne idée de l'interaction du climat avec les hommes et le milieu, même si cette influence est exagérée lors de ces épisodes. De là vient l'idée de rapprocher les deux méthodes : (i) on part des projections climatiques, ou au contraire (ii) on part des éléments bousculés par le changement climatique, et on induit leur interaction avec le climat. Alors pour faire converger ces deux méthodes, on crée un espace de discussion entre les modélisateurs du climat et les agriculteurs, viticulteurs, …, pour lancer des simulations numériques qui intègrent la connaissance et l'expertise du milieu considéré. Cette méthode coûteuse en temps et en argent, a été expérimentée dans le consortium canadien Ouranos, en travaillant sur des projets thématiques (Huard *et al.*, 2014).

2. L'adaptation au plan international

Sur le plan international, ce sont les pays en développement qui ont, les premiers, alerté les négociateurs avec le slogan « Nous émettons très peu de GES et sommes les plus touchés par les catastrophes climatiques » (régions sahéliennes et tropicales). Ce diagnostic a engendré le développement de plans d'adaptation (Conférence Climat de l'ONU à Rio, 2004) tout en consolidant le concept d'adaptation pour tous les pays, les pays du Nord étant de plus en plus impactés par les effets du réchauffement climatique. A cette conférence de Rio en 2004,

beaucoup d'idées et de méthodes ont été présentés pour développer l'adaptation dans les territoires ou les secteurs économiques, sans oublier le rôle des évènements extrêmes qui engendrent de précieux retours d'expérience (Juvanon du Vachat, 2004). C'était le cas en effet de la terrible canicule de 2003 (environ 15 000 décès), qui plaça la France au système de santé réputé à l'égal d'un pays en développement sur le plan sanitaire ! Lors de la 10[ème] Conférence des Parties (COP10) en 2004 à Buenos-Aires, la Convention Climat s'est engagée dans un programme de travail de cinq ans sur l'Adaptation, qui est devenu un enjeu majeur des négociations. A cette occasion, un Compendium sur l'Adaptation a été présenté (cf. www.unfcccc.int) fruit d'un travail d'experts, applicable à divers secteurs économiques, et incluant une méthodologie ! Le concept d'adaptation est alors passé d'un principe général (« top-down ») à une méthode pratique, locale qui ne comporte pas forcément de facteur climatique, sur lequel on agit pour réaliser l'adaptation ! Par la suite, un grand nombre de Plans Nationaux d'Adaptation ont été développés, notamment dans les Pays les Moins Avancés (PMA), à qui des fonds sont attribués pour la réalisation des projets correspondants.

3. L'adaptation au plan national (ONERC[1], PNACC[2])

3.1. L'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC)

En France, le Parlement a adopté en 2001 une loi conférant à la lutte contre l'effet de serre et à la prévention des risques liés au réchauffement climatique la qualité de priorité nationale. Cette loi a permis la création de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer (ONERC), pour prendre en compte les questions liées à ces effets. C'est à l'initiative du sénateur Paul Vergès, sénateur de La Réunion (décédé en 2016), que cette loi a été adoptée. Il voulait l'appliquer surtout aux territoires d'outre-mer, conscient de ce qui se passait à La Réunion, où il voyait les effets du changement climatique (mais aussi de la surpopulation !). Par la suite, les assemblées parlementaires l'ont étendu à tous les départements, qu'ils soient en métropole ou en outre-mer. L'ONERC est devenu opérationnel en 2003, après la promulgation de son décret de création et son transfert des services du Premier Ministre au Ministère de l'Ecologie.

La mission de l'ONERC est de collecter et diffuser les informations, les études et les recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes. L'ONERC peut également formuler des recommandations sur les mesures de prévention et d'adaptation susceptibles de limiter les risques liés au changement climatique. L'ONERC a remis au premier ministre et au Parlement en juin 2005 un rapport présentant les principales conséquences du réchauffement climatique en France et contenant des recommandations pour l'adaptation, dont voici les principales (ONERC, 2005) :

Parfaire le système d'évaluation, de suivi et de prévision des impacts du changement climatique (indicateurs spécifiques, outils disponibles pour définir des scénarios sur la France) ; Evaluer les dommages associés aux évènements extrêmes (cf. canicule 2003) et plus généralement cartographier la vulnérabilité aux risques associés au changement climatique ; Intégrer l'Adaptation au changement climatique dans la planification à tous les niveaux de décision (en particulier les collectivités locales) en cohérence avec l'Atténuation. Notons que sur ces deux derniers points des colloques ont été organisés : en juillet 2003 sur les évènements extrêmes et en septembre 2004 sur les collectivités locales.

[1] ONERC : Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique
[2] PNACC : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique

Une stratégie d'adaptation a été discutée dans un groupe de travail, qui représente les différents ministères et les secteurs économiques concernés. Cette stratégie a identifié les quatre finalités suivantes : sécurité et santé publique ; réduction des inégalités sociales devant le risque ; optimisation des coûts et des avantages ; préservation du patrimoine naturel. A partir de là l'ONERC a proposé des axes stratégiques d'action (ONERC, 2007). D'autre part des éclairages sectoriels ont été apportés sur l'adaptation dans les domaines suivants : santé (2007), villes et habitat (2010), outre-mer (2013), forêt (2014), littoral (2015), pour lesquels un rapport au Premier Ministre et au Parlement a été fourni (l'année de publication figure entre parenthèses). Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) a tiré profit de tous ces développements sectoriels ou stratégiques de l'adaptation en France.

3.2. Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC)

Dans le cadre des travaux de l'ONERC, notamment après la stratégie définie en 2007, un premier plan d'adaptation a vu le jour pour la période 2011-2015. Par la suite, dans l'élan du succès de la conférence de Paris en 2015, on a envisagé un deuxième plan d'adaptation PNACC2, fruit d'une large concertation. Ainsi près de 300 participants d'horizons variés ont participé à cette concertation en 2016 et 2017, et ont produit des recommandations pour renforcer l'adaptation de la France au changement climatique. Ceci a permis de constituer un état des lieux des besoins et des possibilités d'action selon les axes suivants : gouvernance, prévention des risques, résilience des territoires, préservation des milieux, filières économiques, amélioration des connaissances, sensibilisation, action internationale. Une trentaine de fiches ont ensuite documenté ces thèmes (ONERC, 2017).

4. L'adaptation de la région Ouest et de la région Bretagne

L'ouvrage de Mérot *et al.* (2012) aborde le changement climatique dans le Grand Ouest, constitué des quatre régions : Basse-Normandie, Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes. L'ouvrage retrace l'évolution du climat de 1950 à 2010 (température, précipitations, type de circulation atmosphérique) et esquisse les grands traits du climat futur (rapport GIEC 2007). Il analyse alors les impacts sur le milieu marin et côtier, l'agriculture, le sol, l'eau et les écosystèmes continentaux aquatiques et terrestres, en présentant à la fois l'évolution observée et les scénarios projetés dans ces domaines. Il étudie enfin la perception du changement climatique par des acteurs, engagés dans la gestion de l'eau, l'agriculture, notamment dans le cadre du programme Climaster.

Plus récemment la région Bretagne a développé une vaste concertation pour préparer la stratégie « Bretagne en 2040 », sous la forme d'une Breizh-COP, reprenant l'idée d'une COP (Conférence des Parties) régionale. Elle s'est déroulée en cinq réunions territoriales : dans le Nord de la Bretagne, le Sud, l'Est, l'Ouest et le Centre en 2018. Ces réunions ont affiné les 38 objectifs de la stratégie groupés autour de trois grands axes pour une Bretagne, (1) performante, (2) sobre, (3) unie et solidaire. Dans l'axe 2, on trouve l'objectif 22 d'adoption d'une stratégie d'adaptation au changement climatique (le 21 vise l'atténuation avec un objectif ambitieux !). Cette stratégie se décline suivant quatre actions : maîtriser le risque de submersion marine dans l'aménagement des espaces littoraux ; améliorer la résilience et l'adaptation des milieux naturels et des espèces aux impacts du changement climatique ; rendre l'agriculture plus résiliente au changement climatique ; réduire les effets d'îlots de chaleur dans les villes. C'est une démarche très intéressante pour associer l'appareil administratif territorial dans un engagement sur le changement climatique, en cohérence avec les objectifs sociaux de l'axe 3.

5. L'adaptation en région Aquitaine et Nouvelle Aquitaine

En 2013 un rapport sur le changement climatique en Aquitaine, sous la direction d'H. Le Treut a permis une large mobilisation du réseau régional de la recherche sur les thèmes : forêt, vignoble, protection de la côte, pollution atmosphérique et santé. Puis un second rapport a vu le jour en 2018 sur la Nouvelle-Aquitaine, région issue de la réforme territoriale de 2015. Il s'est étendu à de nouvelles thématiques et concerne le nouveau domaine qui s'est considérablement agrandi. En effet, la zone littorale a presque doublé, avec des marais aménagés par l'homme, des paysages de montagnes en dehors des Pyrénées (Massif Central), une agriculture différente, … Le Comité AcclimaTerra a été créé en 2011 sous la présidence d'H. Le Treut a pour mission d'apporter les connaissances nécessaires à la stratégie régionale d'adaptation au changement climatique, en faisant un état des lieux, et une veille scientifique, et en diffusant ces connaissances aux acteurs du territoire. Ce comité scientifique a contribué à créer un espace de diversité disciplinaire et géographique, qui reflète les enjeux du changement climatique sur ce vaste territoire. Plus de 370 personnes ont été impliquées, si on comptabilise les deux rapports successifs. Le but de ce rapport, qui émane de chercheurs avec leurs concepts et leurs mots, venant certes d'horizons différents, n'est pas de recommander des décisions mais d'aider dans leurs choix ceux qui ont la responsabilité des décisions et de les alerter sur des enjeux importants. D'ailleurs le rapport a été largement diffusé aux responsables politiques de la région. Pour H. Le Treut, le pari sera réussi si le rapport est vraiment relayé, sans qu'il soit nécessaire d'en refaire un autre dans cinq ans !

Conclusion

Cette longue promenade sur l'adaptation en France nous a fait découvrir à la fois une doctrine (avec réflexion et méthode) qui cherche à percoler dans tous les étages de la planification administrative, mais aussi un grand nombre de domaines économiques et de territoires qui se sont appropriés la problématique et ont défini des plans d'action. Trois exemples de territoires ont été donnés dans cet article : la région Ouest, la Bretagne et la région Aquitaine devenue la Nouvelle Aquitaine. Notons que la plupart des régions possèdent des structures analogues, comme le GREC-Sud, qui est le Groupe d'Experts sur le Climat pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ou le RECO, qui est le Réseau d'Expertise sur les changements Climatiques pour l'Occitanie. Enfin pour une synthèse d'ensemble de l'adaptation en France, le rapport sénatorial (Dantec et Roux, 2019) dégage des points précis sur lesquels des efforts sont à réaliser, et souligne la mobilisation insuffisante des différents acteurs. Ce rapport repère les domaines les plus exposés : montagne, littoral, outre-mer, ville et urbanisme, enfin prône une politique de l'eau résiliente au changement climatique et un plan d'adaptation spécifique pour l'agriculture.

Bibliographie

Académie des sciences, 2020. Face au changement climatique, le champ des possibles. Colloque Académie des sciences, 28-29 janvier 2020, Paris, France.

Dantec R., et J.-Y. Roux, 2019. Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée. Rapport de la Délégation Sénatoriale à la Prospective N° 511. 190p.

Godard O., 2010. Cette ambiguë adaptation au changement climatique. *Natures Sciences Sociétés*, 18, 287-297.

Huard D., D. Chaumont, T. Logan, M.-F. Sottile, R. D. Brown, B. G. St-Denis, P. Grenier et M. Braun, 2014. A decade of climate scenarios. The Ouranos consortium modus operandi. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 95, 1213-1225.

IPCC, 2003. Bilan 2001 des Changements climatiques - Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au 3ème Rapport d'évaluation du GIEC. Editeur R. Watson *et al.*, Grid-Arendal, Norvège, 205p.

Juvanon du Vachat R., 2004. Prévision et climatologie des phénomènes extrêmes. Vers une perspective historique. 17[ème] colloque de l'AIC, Caen, France, 185-188.

Le Treut *et al.*, 2013. *Prévoir pour agir – La région Aquitaine anticipe le changement climatique*. Presses Universitaires de Bordeaux. Réédition 2018 pour la Nouvelle Aquitaine.

Merot P., Dubreuil V., Delahaye D. et Desnos P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest - Evaluation, impacts, perceptions.* Presses Universitaires de Rennes.

ONERC, 2005. *Un climat à la dérive : comment s'adapter ?* Rapport au Premier ministre et au Parlement. La Documentation française, 109p.

ONERC, 2007. *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique*. Rapport au Premier ministre et au Parlement. La Documentation française, 96p.

ONERC, 2016. *Adaptation au changement climatique–Evaluation de la démarche nationale et recommandations*. La Documentation française, 120p.

ONERC, 2017. *Vers un 2e Plan d'adaptation au changement climatique pour la France–Enjeux et recommandations*. La Documentation française, 228p.

Przyluski V. et S. Hallegatte, 2012. *Gestion des risques naturels. Leçons de la tempête Xynthia*. Editions Quae, 164p.

IMPACT DE LA PÉJORATION CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTION MARAICHÈRE DANS LA PROVINCE DU SANGUIÉ AU BURKINA FASO

KARAMBIRI B.L.C.N.

Institut des Sciences des Sociétés (INSS), Ouagadougou, Burkina Faso (karambiri_chantal@yahoo.fr)

Résumé : *La province du Sanguié, située dans la zone climatique nord-soudanienne du Burkina Faso, est une zone à grande production maraichère. L'ensemble du Burkina Faso étant sous l'influence de la péjoration climatique, quel est l'impact de ce fait sur la production maraichère dans le Sanguié? La présente étude vise à répondre à cette question. La méthodologie suivie est quantitative. Les données de pluviométrie, de température, d'ETP de la station synoptique de Boromo ont été recueillies. Celles de la production de l'oignon, de la tomate et des choux ont été collectées auprès des services agréés du Sanguié. Les résultats obtenus montrent une variation de la pluviométrie et une hausse de la température dans le Sanguié. Cela entraîne une baisse de la production des oignons, de la tomate et des choux.*

Mots clés : *péjoration climatique ; eau ; production maraichère ; Sanguié ; Burkina Faso*

Summary: ***Impact of climatic deterioration on vegetable production in the Sanguié province of Burkina Faso.*** *The Sanguié province, located in the North Sudanian climatic zone of Burkina Faso, is an area with high vegetable production. The whole Burkina Faso area being under the influence of climatic deterioration, what is the impact of this fact on vegetable production in the Sanguié? This study aims to answer this question. The methodology followed is quantitative. Rainfall, temperature, and FTE data were collected from the Boromo synoptic station. Those of the onion, tomato and cabbage production were collected from the approved Sanguié services. The results obtained show a variation in rainfall and an increase in temperature in the Sanguié. This determines a decrease of onions, tomatoes and cabbage production.*

Key words: *climatic deterioration; water; vegetable production; Sanguié; Burkina Faso*

Introduction

Selon l'IPCC, 2013, la modification de la pluviométrie (P) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), liée aux changements climatiques, est responsable des modifications importantes du bilan hydrique climatique, dans diverses régions de la planète. Dans la plupart des pays et régions de l'Afrique, on s'attend à ce que la production agricole et l'accès à la nourriture soient sérieusement compromis par la péjoration climatique. Au Burkina Faso, l'agriculture est une activité importante et contribue à 35 % du PIB. Les travaux de Wetta *et al*., (2015), PNA (2015) ont montré que le climat du Burkina Faso est affecté par une variabilité pluviométrique, une réduction de la durée de la saison agricole et une hausse des températures minimales. Ces effets ont conduit à certains endroits à une baisse des ressources en eau. De ce fait, l'agriculture pluviale subit les répercussions de la péjoration climatique. Pour faire face à ces effets et pouvoir atteindre l'autosuffisance alimentaire, les populations se retournent vers les cultures des oignons, de la tomate, des choux, etc. La productivité maraîchère est aujourd'hui menacée par les fluctuations persistantes de certains paramètres climatiques, notamment : la température, les précipitations, le vent, l'ensoleillement (Atidegla *et al*, 2017). La province du Sanguié fait partie des provinces du pays qui pratiquent beaucoup le maraichage. Cette activité est réalisée autour des puits traditionnels et des petits barrages. Quel est l'impact de la péjoration climatique sur la production maraichère ?

1. Zone d'étude, données, matériel et méthode

1.1. Situation de la zone d'étude

La province du Sanguié est située au centre-Ouest du Burkina Faso. Elle est située entre 11°00'et 12°50' de latitude N et 2°15' et 2°55' de longitude W (Fig.1). Son Chef-lieu, la ville de Réo, est située à 115 km à l'ouest de Ouagadougou. Dans cette province la production maraichère est très importante.

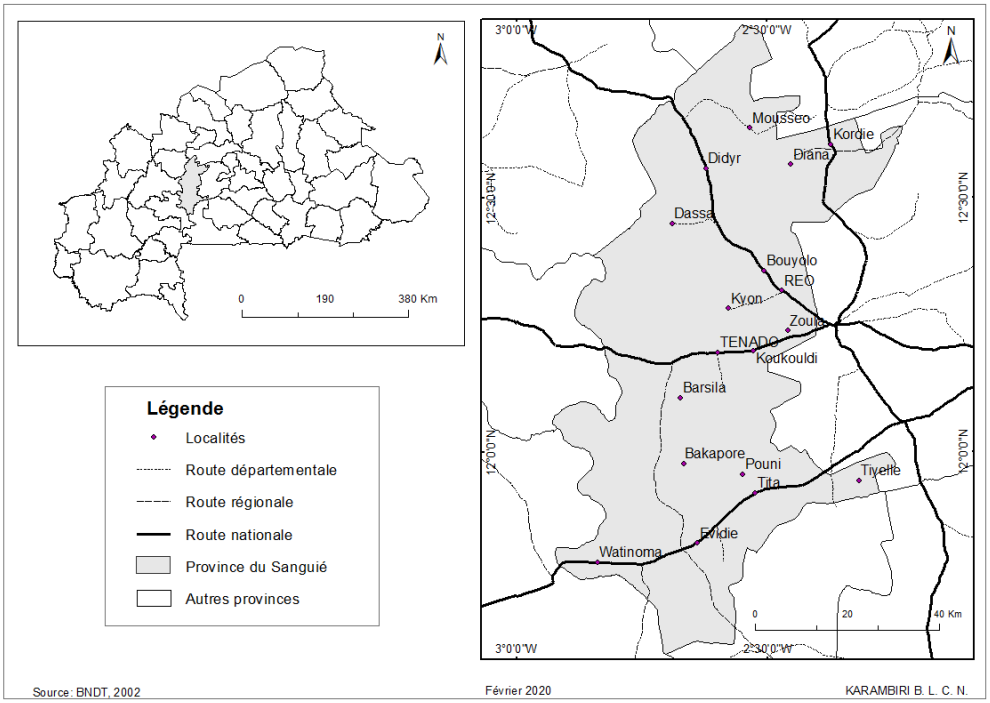


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

1.2. Les données de base de l'étude

Les données de pluviométrie, de température et d'ETP de 1988 à 2018 ayant servi à cette étude sont celle de la station synoptique de Boromo située à environ 90 km de la province de Sanguié. Celle-ci étant dépourvue de ce genre d'équipement. Ces données sont représentatives du climat de la province de Sanguié, la distance n'étant pas grande. Les données de production maraichère de 2008 à 2016 ont été collectées auprès du service de l'agriculture de Réo. La base de données disponible de la production maraichère couvre uniquement la période 2008 à 2016.

1.3. Méthode et outils de traitement des données

Pour caractériser la variabilité pluviométrique, l'Indices Standardisés de Précipitation ainsi que des tests statistiques ont été appliqués.

1.3.1. Indice standardisé de précipitation ou anomalies pluviométriques.

Cet outil consiste à normaliser (ou « standardiser ») les données de pluviométrie à l'aide d'une transformation centrée réduite. L'indice « ISP » ou « SPI » en anglais a pour formule :

$$x_i' = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)}$$

où : x_i' = anomalie centrée réduite pour l'année i

x_i = quantité mensuelle ou annuelle des précipitations dans une certaine année

$\bar{x}$ = la moyenne annuelle de la série.

σ (x)= l'écart type de la série
Les données mensuelles de la température et des précipitations ont été utilisées pour réaliser le diagramme ombrotermique.

1.3.2. Étude du bilan climatique

Le bilan climatique, lorsqu'il est positif (avec un surplus) permet la recharge en eau du sol et favorise l'écoulement (Sutcliffe et Piper, 1986). Il s'exprime ainsi :

Bc = P – ETR, avec :
Bc : bilan climatique en mm ;
P : pluie annuelle en mm ;
ETR : évapotranspiration réelle en mm.

1.4. Interprétation des données

Les normes de l'Organisation Mondiale de la Météorologie ont été appliquées : une période est sèche quand l'indice est négatif. Elle est humide lorsque l'indice est positif (ou nul), (OMM, 1012).

Tableau 1. Interprétation des valeurs de l'indice Standardisé de précipitations (Source : OMM, 2012)

Valeur SPI	Catégorie
2, 0 et plus	Extrêmement humide
De 1,5 à 1, 99	Très humide
De 1,0 à 1, 49	Modérément humide
De -0, 99 à 0,99	Proche de la normale
De -1, 0 à -1, 49	Modérément sec
De -1, 5 à -1, 99	Très sec
-2,0 à moins	Extrêmement sec

Les paramètres de dispersion à eux seuls ne suffisent pas pour mesurer la variabilité de la pluviométrie. Le Bilan climatique permet d'évaluer la disponibilité en eau surtout pour les plantes. En fonction de la valeur du Bilan climatique, l'interprétation suivante peut être faite :
Si Bc > 0, alors le bilan est excédentaire ;
Si Bc < 0, alors le bilan est déficitaire ;
Si Bc = 0, alors le bilan est équilibré.
L'application de cette méthodologie a permis d'atteindre les résultats suivants.

2. Résultats

Les résultats obtenus se situent à quatre niveaux.

2.1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie

La moyenne annuelle des totaux pluviométriques dans la zone d'étude montre une hétérogénéité. En effet de 1988 à 2018, il y'a 16 années de pluviométrie excédentaire contre 15 années de pluviométrie déficitaire comme l'indique la figure 2. Le déficit pluviométrique est plus prononcé en 1990 par rapport aux autres années. Au contraire, 2008 a enregistré les plus grandes quantités de pluie. On note une alternance d'excédents et de déficit pluviométriques sauf pour la période 1996-1999 excédentaire dans sa totalité. De 2004 à 2007, il y'a eu un déficit durant quatre années successives ; ce qui a dû avoir un impact sur la production maraichère. L'année 1990 fut une année extrêmement sèche et l'année 2008 fut très humide (Fig.2).

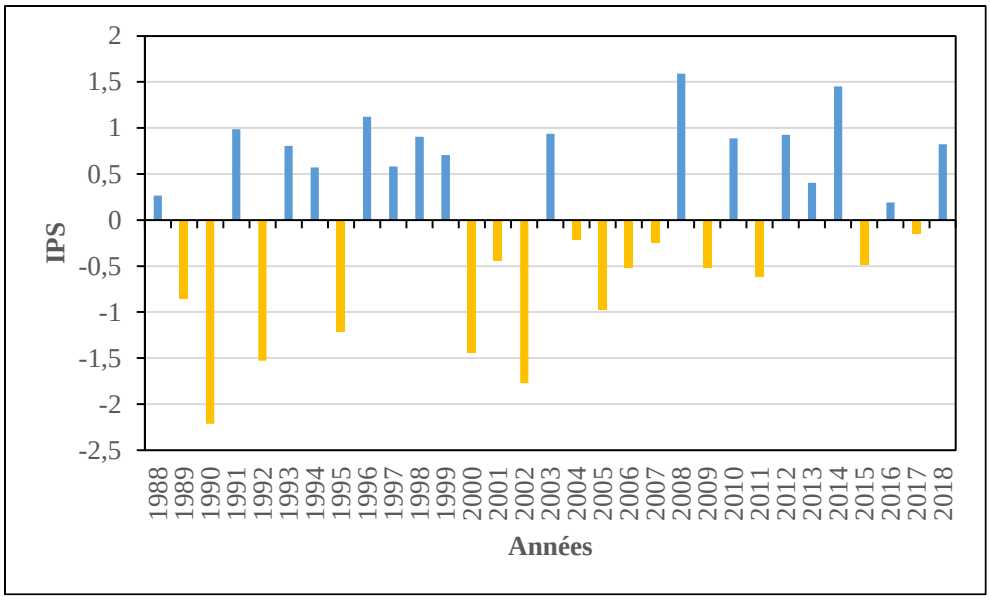


Figure 2. Variation de la pluviométrie dans la zone d'étude (Source des données : Agence de la Météorologie Nationale)

2.2. Variation interannuelle de la température moyenne annuelle

L'analyse de la figure 3a, montre que le mois de mars, avril et mai sont relativement plus chaud que les autres mois. Dans cette zone, le diagramme ombrothermique révèle cinq mois humides. La culture maraichère se déroule pendant la saison sèche qui correspond à la période de chaleur.

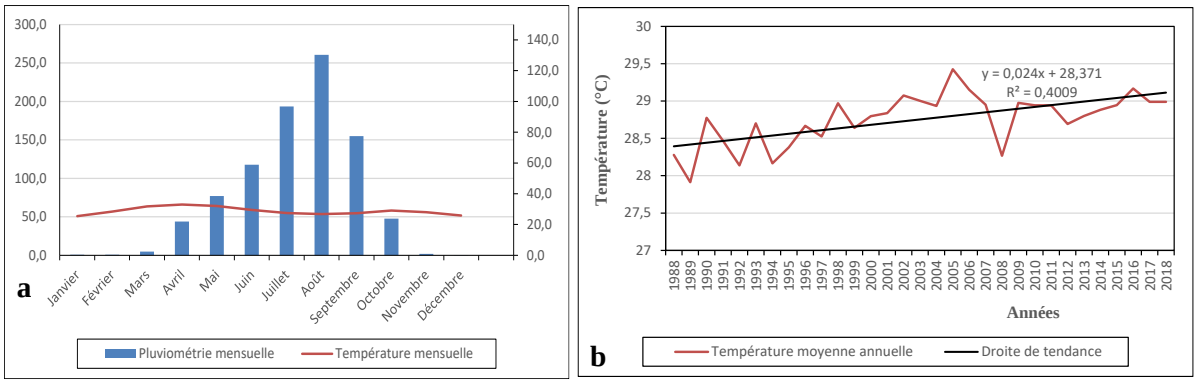


Figure 3. a : diagramme ombrothermique de la zone d'étude ; b : Variation interannuelle de la température à la station de Boromo (2019) (Source des données : Agence de la Météorologie Nationale)

La figure 3b, en plus d'une grande variabilité interannuelle, montre que la tendance des températures moyennes annuelles est légèrement à la hausse : R2 est positif (0,4).

2.3. Bilan climatique

L'étude du bilan climatique permet de connaître les mois secs et les mois humides (Fig.4). Il permet également de connaître à quelle période de l'année, il y a suffisamment d'eau pour recharger les barrages et les puits destinés à l'irrigation des cultures.

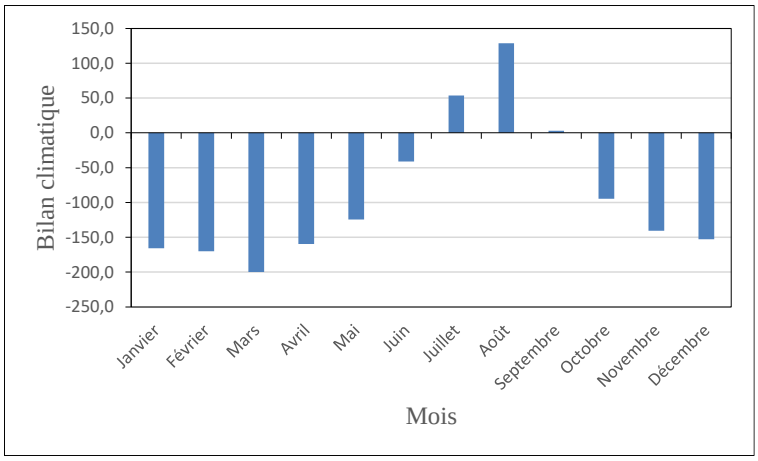


Figure 4. Évolution du bilan climatique mensuel à la station synoptique de Boromo. Source des données : Agence de la Météorologie Nationale, 2019

Le bilan climatique dans la province du Sanguié permet d'identifier deux périodes opposées. Neuf mois secs entre octobre et juin. Cette période correspond à la période de la culture maraichère. Ce sont les mois où la demande évaporatoire de l'atmosphère est très importante, avec un fort amenuisement et même l'assèchement des réserves d'eau du sol. À cette période certains puits et une partie du barrage tarissent rendant difficile la disponibilité de l'eau pour certaines parcelles.
Trois mois humides s'observent de juillet à août, avec un maximum en août. Pendant ces mois, les puits et les barrages sont alimentés en eau.

2.4. Impact de la péjoration climatique sur l'oignon, le chou et la tomate dans le Sanguié

Les données de productions montrent une variation importante de trois produits d'une année à l'autre. La différence entre l'année de forte production et celle de faible production est de 14 643 t. Les figures 5 et 6 montrent respectivement la quantité produite et la superficie emblavée de ces trois produits maraichers.

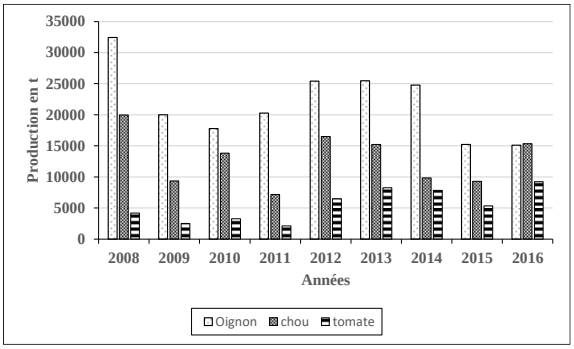


Figure 5. Évolution de la quantité de trois Maraichers dans la province du Sanguié

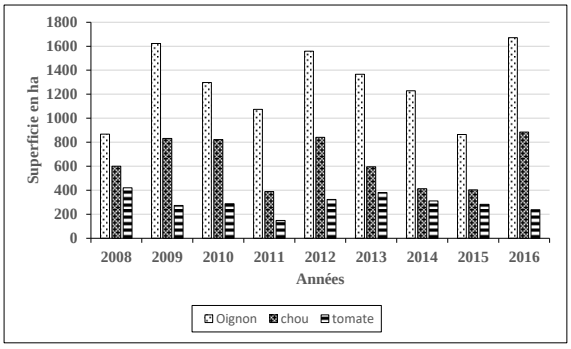


Figure 6. Évolution de la superficie emblavée d'oignon, chou et tomate dans la province du Sanguié

L'observation de ces deux figures permet de constater que la production en tonne n'est pas fonction de la superficie emblavée. La superficie peut diminuer alors que la production augmente. Par contre la production d'oignon, cultivé uniquement en saison sèche par exemple, semble dépendre de la pluviométrie. C'est en 2008 qui a été une année excessivement humide, qu'il y'a eu une grande production de 32 426 t, suivi de 2013 (année très humide) avec

25 476,85 t. Par contre en 2009, 2010, 2011 et 2015 où il y'a eu des déficits pluviométriques, la production était faible avec moins de 20 000 tonnes.

3. Discussion

La province du Sanguié est une zone où la production maraichère est très développée. Les résultats ont montré que cette province subit une péjoration climatique. Ces conclusions sont similaires aux travaux de Lompo (2019). L'auteur atteste que pour la période 1987-2016, 15 années sur 30, présentent des déficits pluviométriques. Les investigations sur le bilan climatique sont identiques à ceux de Vissin (2007), sur le bassin béninois du fleuve Niger qui trouve également trois mois humides et neuf mois secs. La péjoration climatique impacte la production maraichère. Ce résultat est conforme à celui de Atidegla *et al.*, 2017 qui trouve que l'environnement de croissance et de développement des plantes est fortement perturbé ces dernières années par la variabilité climatique. Ce qui entraine une baisse des rendements. Les mêmes résultats ont été trouvés par Ogouwalé (2006). Celui-ci montre que les impacts des péjorations pluviométriques et de la hausse des températures sur les cultures sont dus aux stress hydriques et/ou thermiques.

Conclusion

Au terme de cette étude, il ressort que la province du Sanguié est affectée par la péjoration climatique. Cela se constate par une instabilité prononcée de la pluviométrie et un bilan climatique déficitaire 9 mois de l'année. En fonction de la quantité d'eau tombée et de la température, le rendement varie. Une année déficitaire entraine une baisse du rendement des oignons, des choux et de la tomate. Le climat n'étant pas le seul facteur déterminant le rendement, il serait judicieux de mener une étude pour voir comment sont les autres déterminants du rendement que sont la fertilité du sol, la qualité des semences, les maladies et les ravageurs.

Bibliographie

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. Dans Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P. M. (eds.). *Climate Change 2013*: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press, 28p.

Atidegla S.C., Koumassi H.D. & Houssou E.S., 2017. Variabilité climatique et production maraîchère dans la plaine inondable d'Ahomey-Gblon au Bénin. *International Journal of. Biological and Chemical Sciences* 11(5) October 2017, 2254-2269.

Lompo, 2019. *Information climatique et productivité agricole pluviale dans la commune de Bagassi*. Mémoire de Master de géographie, 127p.

Ogouwalé E. 2006. *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire*. Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH/ EDP/ Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 302p.

PNA, 2015. Plan National d'Adaptation aux changements climatiques du Burkina. Volume principale, rapport final, 155p.

Sutcliffe V. J., Piper B. S., 1986. Bilan hydrologique en Guinée et au Togo-Bénin. *Hydrol. Continent*. Vol I, n° 1, 51 - 61.

Vissin E. W., 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, France, 310p.

Wetta C., Dipama J.M., Akouwerabou D., Sampana L., 2015. *Burkina Faso : revue du contexte socio-économique, politique et environnemental*. Rapport d'étude, 76

LES INONDATIONS DE 2009-2010 AU MAROC : L'EXCEPTIONNALITÉ DE L'ÉVÉNEMENT ET DIFFICULTÉS DE GESTION DANS LA RÉGION DU GHARB

KARROUK M.S.

Université Hassan II de Casablanca, FLSH Ben M'Sick, Dpt. Géographie, CEREC, LCEAT, Casablanca, Maroc (ClimDev.Maroc@GMail.Com *; CEREC@UnivH2M.Ac.Ma)*

Résumé : *L'année 2010 a succédé à une période humide au nord du Maroc depuis octobre 2008. Avec une pluviométrie exceptionnelle pour la saison, la plupart des infrastructures hydriques du bassin de Sebou, situées en amont de la région du Gharb, arrivaient à saturation. Le taux moyen de remplissage des barrages était de 96% en février 2009, contre 62% l'année précédente. Avec ses 3,8 milliards de mètres cubes de capacité, l'immense digue du barrage Al Wahda, en service depuis 1997, accusait un taux de remplissage de 100% le 25 février 2009[1]. Avec cette situation des barrages, la pluviométrie de 2010 n'avait plus de moyens d'être retenue. En l'occurrence, la plaine du Gharb s'est trouvée complètement sous l'eau. les inondations l'ont transformée en une vraie mer fermée ! Avec des dégâts variés très élevés, la situation était catastrophique.*

Mots clés : *Maroc ; Gharb ; précipitations ; inondations*

Summary: ***The 2009-2010 floods in Morocco: the exceptionality of the event and management difficulties in the Gharb region.*** *The year 2010 followed a wet period in northern Morocco since October 2008. With exceptional rainfall for the season, most of the water infrastructure in the Sebou basin, located upstream of the Gharb region, was reaching saturation.The average dam fill rate was 96% in February 2009, compared to 62% last year. With its 3.8 billion cubic meters of capacity, the immense dam of the Al Wahdareservoir, in service since 1997, had a filling rate of 100% the February 25, 2009. With this situation of the dams, the rainfall in 2010 could no longer be held back; and the country was unprotected against flooding! This is how the Gharb plain was completely under water: the floods turned it into a real closed sea! With very high varied damage, the situation was catastrophic.*

Key words: *Morocco; Gharb; precipitations; floods*

Introduction

Depuis octobre 2008 et jusqu'à la fin de l'année 2010, le Maroc a connu des inondations sur l'ensemble du territoire. Tout a commencé au nord du pays, par les inondations de Tanger, Al Hoceima, Nador et Oujda, pour s'élargir ensuite en février 2009 à la plaine du Gharb plus au sud ouest et tout le territoire national en février 2010. A cette date, un record absolu de 98% de remplissage des barrages a été observé au Maroc[2] L'année d'avant, en février 2009, ce pourcentage était de 80%.

La région du Gharb est particulièrement tributaire de ses barrages, gérés par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS) et vulnérable au risque inondation. Elle couvre trois wilayas, douze provinces et préfectures, mais surtout une zone d'influence de 40 000km^2, qui regroupe près d'un Marocain sur cinq, soit une population de l'ordre de 6,2 millions d'habitants.

1. Données et Méthodes

1.1 Cartes Synoptiques

Hémisphériques de la NOAA : NCEP/DFC, et Européennes de Aktion "Wetterpate", Institut für Meteorologie FU Berlin, de Met Office et de Deutschen Wetterdienstes (DWD).

[1]Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau.
[2]Secrétariat d'État auprès du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement (en février 2010)

1.2. Cartes Géopotentielles

Hémisphériques et Européennes de Wetterzentrale : ECMWF, GFS, GPDM 500 et 850 hPa, Pression au Sol 1015 hPa, Précipitations mm, Températures à 2m du Sol °C.

1.3. Données hydrométéorologiques

Du Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau.
De la Météorologie Nationale (DMN) : vulgarisées directement ou reprises par autres.

1.4. Les rapports officiels

Les informations sur les événements météorologiques et leurs impacts socioéconomiques sur le terrain proviennent des rapports officiels présentés par le gouvernement marocain.

La méthodologie utilisée est purement géographique ; celle d'observer, d'analyser, de confronter et de restituer. Il s'agit donc des événements vécus, que nous avons essayé d'analyser par les différentes cartes précitées. La période d'observation quotidienne est celle de 1981 à 2010 (30 ans).

2. La situation des inondations au Gharb en 2009-2010

La région du Gharb a connu la submersion de 135 000 hectares[3], déplacement de 22 000 habitants, coupure de plusieurs routes et de la voie ferroviaire.

Les dommages par km de route sont évalués à 500 000 MAD[4], ceux subis par entité d'occupation du sol (Agriculture, Bâtis, Réseaux de voiries) 668,17 millions de MAD de janvier à mars 2010.

Plus globalement, la région du Gharb, même après avoir irrigué des terres entre mai et décembre de 2009, disposait le 22/02/2010 de 5,716 milliards de m^3(Mm^3) de réserves dans ses barrages sur une capacité théorique totale de stockage de 5,786Mm^3, soit 98,96% du taux de remplissage. Avec des barrages remplis à 100%, plusieurs ont même dû faire des déversements fréquents. La situation était de 5,430 Mm^3(85,68%) le 22/02/2009.

Le tableau suivant nous donne la situation détaillée du 27 janvier 2009, et 2010[5].

Tableau 1. Situation des Barrages du bassin de Sebou (Gharb). Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau. (Source : www.water.gov.ma)

BARRAGES	CAPACITE NORMALE (Mm^3)	27/01/2010		27/01/2009	
		RESERVE (Mm^3)	TAUX DE REMPLISSAGE (%)	RESERVE (Mm^3)	TAUX DE REMPLISSAGE (%)
BAB LOUTA	34,5	33	95,7	34,5	100
IDRISS 1 er	1129,6	1129,6	100	1071,5	94,9
ALLAL EL FASSI	63,8	50,4	79	64	100
SIDI ECHAHED	161	161	100	104	64,6
SAHLA	62	57,2	92,2	60,2	97,1
BOUHOUDA	55	45,3	82,3	55	100
ASFALOU	307,1	250,4	81,5	64,9	21,1
ALWAHDA	3712,1	3602	97	3013,1	81,2

[3]Selon le ministre de l'Agriculture, qui présentait un exposé devant la commission de l'Agriculture et des affaires économiques à la Chambre des conseillers le 6 avril 2010.
[4] Dirham marocain, 1 MAD = 0,093 Euro
[5]Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau.

GARDE SEBOU	**40,1**	**32,5**	**81,1**	**27,4**	**68,3**
EL KENSERA	**220,8**	**211,5**	**95,8**	**220,8**	**100**
ENSEMBLE DES BARRAGES	**5786**	**5572,9**	**90,46**	**4715,4**	**82,72**

3. Les conditions atmosphériques responsables des inondations de 2009-2010.

Les conditions génératrices des inondations de la plaine du Gharb étaient caractérisées par une vallée froide très profonde et intense dans un milieu chaud, ce qui a causé une pluie abondante et continue pendant plusieurs jours[6]. Il s'agit des conditions atmosphériques du « Nouveau Climat »[7] planétaire, conséquences de la suprématie de la Circulation Atmosphérique Méridienne (MAC). En effet, depuis que la nouvelle distribution thermique planétaire s'est installée, principalement depuis 2006, la circulation atmosphérique à nos latitudes est caractérisée par une alternance entre les crêtes et les vallées planétaires, et ce pendant toute l'année[8]. Cette situation accélère les échanges radiatifs et thermiques latitudinaux, et véhicule une vapeur d'eau abondante dans une atmosphère réchauffée. Il en résulte l'augmentation de l'intensité des précipitations pendant cette période 2009-2010 (Fig.1).

Cette situation a mis les gestionnaires des barrages au Maroc en une situation jamais vécue auparavant. Les quantités d'eau affluant dans les réservoirs étaient immenses, et personne n'avait imaginé l'étendu de cette durée exceptionnelle des précipitations. Par conséquent, avec une pluviométrie exceptionnelle pour la saison, la plupart des infrastructures hydriques du bassin de Sebou, situées en amont de la région du Gharb, arrivaient à saturation (Tab.2, Fig.2).

Tableau 2. Les précipitations enregistrées en février 2009 (BAD, 2009)

Zones	Pluviométrie du 30/01 au 08/02/2009 (mm)	Pluviométrie totale Au 18/02/2009 (mm)	Pluviométrie de l'année dernière au 18/02/2008 (mm)
Côtière	**124,2**	**699,0**	**276**
Centrale	**148,7**	**680,5**	**285**
Interne	**108,8**	**593,5**	**186**
Moyenne	**125,3**	**655,6**	**223**

Plus précisément, le barrage Al Kansra affichait un taux de remplissage de 109%, Idriss I[er] atteignait 104%, Bab Louta 103%, Sahla 101%, et celui de Bouhouda 100%. Avec ses 3,712 milliards de mètres cubes de capacité, l'immense digue du barrage Al Wahda, accusait un taux de remplissage de 97% le 22/02/2009[9] (Fig.2).

Dans ces conditions, les digues ne pouvaient plus retenir de l'eau et les inondations étaient inévitables et leurs conséquences fatales (Fig.3). Les pertes ont touché essentiellement les cultures (Tab.3). En outre, les pertes pour le pays ont été évaluées à quelques 40 millions de journées de travail et des ressources annuelles de plus de 7 milliards MAD (BAD, 2009).

[6]Karrouk, M.S., 2017.
[7]Karrouk, M.S., 2018, 2019.
[8] Karrouk, M.S., 2017.
[9]Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau.

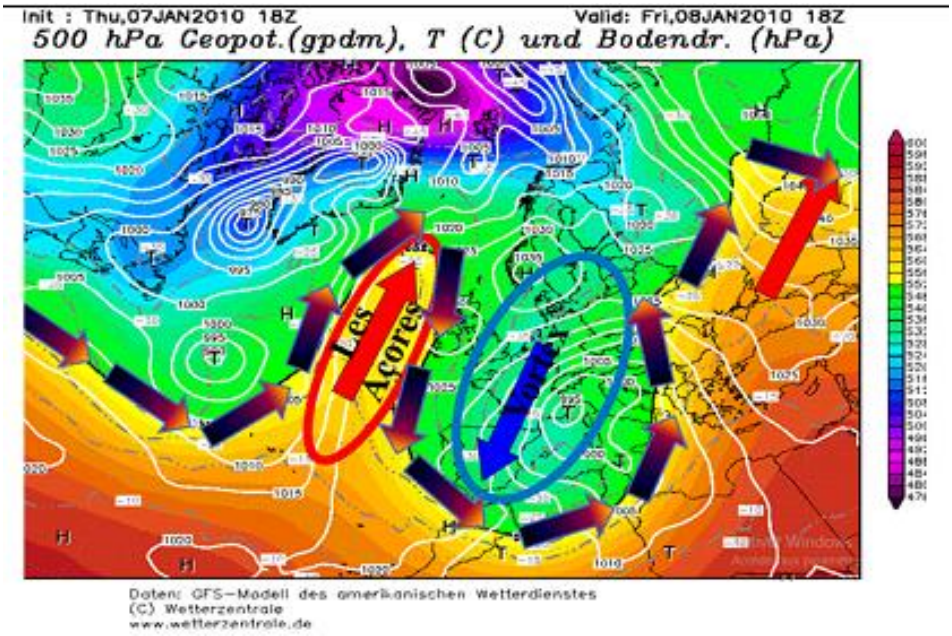


Figure 1. Situation du 07/01/2010 (Wetterzentrale) Circulation Atmosphérique Méridienne (MAC)

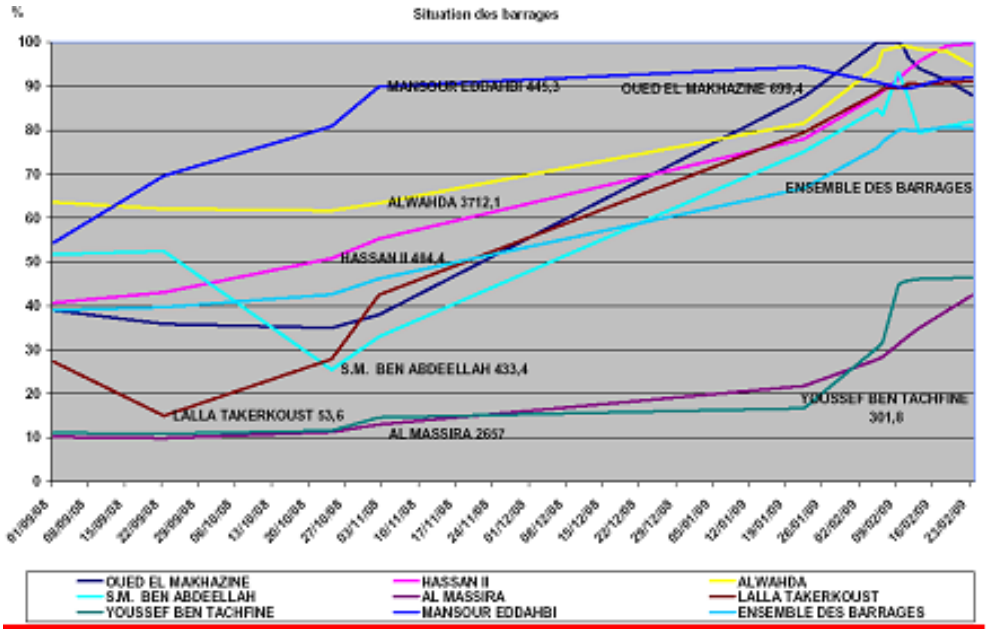


Figure 2. Evolution du taux de remplissage des principaux barrages au Maroc de 09/2008 à 02/2009

Les mêmes conditions atmosphériques et géographiques se sont prolongées l'année suivante, et provoqué les mêmes événements et les mêmes dégâts. En effet, en février mars 2010, le Gharb a connu à nouveau des inondations catastrophiques, avec des pertes aussi importantes qu'en 2009. La, carte d'inondation de la plaine du Gharb en 2010[10] (Fig.4) représente cette situation.

[10]Carte des étendues inondées obtenues à partir d'image satellite Radar datant du10mars 2010 (Source : CRTS, 2010) In Fofana O..Bouabdli A., Baghdad B., Sossey-Alaoui F., (2014)

Tableau 3. Les pertes en termes de superficie et de production enregistrées en février 2009 (BAD, 2009)

Cultures	Superficies perdues (ha)	Production agricole perdue (tonnes)
Céréales	**67 000**	**180.000**
Betterave à sucre	**4 200**	**185.000**
Canne à sucre	**50**	**3.300**
Maraichage (artichaut / tomate)	**1 500**	**28.000**
Légumineuses alimentaires	**4 000**	**5.000**
Agrumes	**8**	**40.000**
Cultures fourragères (Bersim)	**13 000**	**65.000.000 UF**

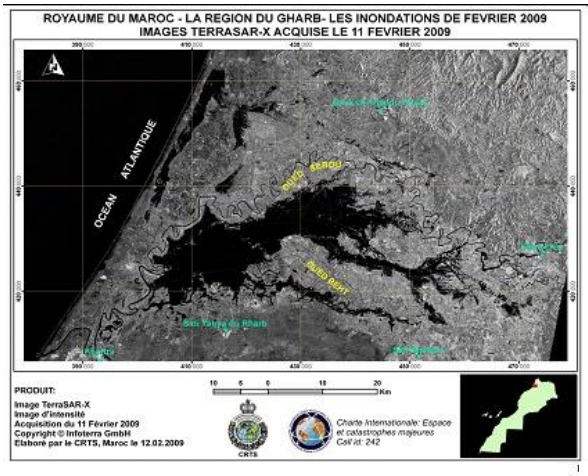


Figure 3. Inondation du Gharb en février 2009

Figure 4. Inondation du Gharb en mars 2010

4. Résultats

Le retour « exceptionnel » des fortes pluies de 2009-2010, ont causé des inondations généralisées sur le Maroc. Elles ont laissé des dégâts humains et matériels considérables, principalement dans la région du Gharb. Cette région a connu la submersion de plusieurs hectares de terres cultivées, le déplacement de nombreux habitants et la coupure de plusieurs routes et de la voie ferroviaire. Les dommages subis par l'infrastructure et par entité d'occupation du sol ont atteint des sommes colossales.

Les conditions atmosphériques, marquées par l'intrusion d'une coulée d'air froid a provoqué la pluie abondante et continue pendant plusieurs jours. Combinés avec des relâchés des barrages menaçants de déborder, le Gharb s'est transformé en un lac fermé, vu le débordement et l'immersion globale.

Les inondations les plus graves ont été enregistrées au mois de février 2009. Elles ont entraîné la mort d'une quarantaine de personnes dans le pays et ont fortement endommagé l'habitat, l'agriculture et les infrastructures socio-économiques[11].

L'analyse de la gestion de ces événements a montré des lacunes au niveau de la prise en compte des risques d'inondations dans les plans d'aménagement, au niveau de la cartographie des zones à haut risque et au niveau de la définition d'une stratégie globale et coordonnée de prévention et de lutte contre les risques d'inondations. C'est ce qui a provoqué plusieurs disfonctionnements à plusieurs niveaux.

[11]Banque Africaine de Développement (BAD), 2009.

Conclusions et discussion

Avec l'évolution récente des conditions atmosphériques au Maroc, le retour de l'eau est une opportunité pour le pays, mais qui représente un danger qui n'était ni prévu ni attendu.

La ressource en eau était marquée par une abondance relative par rapport aux décennies précédentes (1980-1995). Le taux de remplissage des barrages a atteint des records historiques jamais observés auparavant. Ce retour d'eau s'est accompagné par des événements douloureux d'inondations, dont les marocains ne sont pas habitués à gérer. C'est ce qui a coûté très cher au pays.

Ces événements hydroclimatiques extrêmes incombent à une phase de transition du bilan énergétique planétaire[12], qui a imposé une gestion différente des ressources en eau au Maroc, vu l'évolution du « Nouveau Cycle d'Eau »[13] qui a accompagné la circulation atmosphérique méridienne.

Bibliographie

Banque Africaine de Développement (BAD), 2009. Proposition visant l'octroi d'un don de 1.000.000,00 USD au titre de l'aide d'urgence au programme d'action pour atténuer les effets des inondations dans la région du Gharb, BAD Résolution N° B/MA/2009/58, 16p.

Fofana O., Bouabdli A., Baghdad B., Sossey-Alaoui F., 2014. Apport des SIG pour l'estimation des niveaux d'eaux en plaine inondée –Gharb, Maroc. *European Scientific Journal*, vol.10, No.11. ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

Karrouk M.S., 2019. The Shift of the Atmospheric Circulation Patterns and Its Impacts on Western Mediterranean. In: Zhang Z., Khélifi N., Mezghani A., Heggy E. *Springer*, Cham. 107-110.

Karrouk M.S., 2018. Dynamique des Climats du Maroc : Genèses, Evolutions et Développement des Phénomènes, Espaces et Milieux Climatiques. *Presses Académiques Francophones* (PAF). ISBN: 978-3-8416-4263-9, Sarrebruck.

Karrouk M.S., 2017. L'impact du "Nouveau Climat" réchauffé sur les extrêmes pluviométriques au Maghreb. 30ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Sfax. 457-462.

Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau. Situation journalière des principaux grands barrages. URL : http://81.192.10.228/patrimoine/barrages/situation-journaliere-des-principaux-grands-barrages/

[12]Karrouk M.S., 2019, 2018, 2017.
[13]Karrouk M.S., 2019, 2018, 2017.

HUMIDITE RELATIVE, PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D'EAU ET ILOT DE SECHERESSE A STRASBOURG (FRANCE)

KASTENDEUCH P., NAJJAR G., PHILIPPS N.

Laboratoire ICUBE, Université de Strasbourg, Strasbourg, France (kasten@unistra.fr)

Résumé : *Les différences d'humidité ont été analysées entre la ville de Strasbourg (France) et la campagne, à partir des données horaires de trois stations météorologiques sur une période de huit ans (2011-2018). Du point de vue de l'humidité relative, la ville est un îlot de sécheresse urbain (ISU) quasi permanent, avec un pic d'intensité en été et la nuit. Cet îlot de sécheresse est occasionné par l'îlot de chaleur urbain (ICU) et peut aussi être modulé par la présence de végétation. La ville peut parfois devenir exceptionnellement un îlot d'humidité urbain (IHU), ce qui se produit quand elle subit un îlot de fraicheur urbain (IFU), surtout en hiver. Du point de vue de la pression partielle en vapeur d'eau, on observe une alternance saisonnière et diurne systématique entre un ISU en été (ou en journée) et un IHU en hiver (ou la nuit).*

Mots clés : *îlot de sécheresse ; humidité de l'air ; pression de vapeur ; climat urbain ; Strasbourg*

Summary: ***Relative humidity, partial water steam pressure and drought island in Strasbourg (France).*** *The urban/rural humidity differences were analyzed for Strasbourg city (France) by means of meteorological series of three stations during a period of eight years (2011-2018). From the relative humidity point of view, the town shows a clear drought urban island (ISU) during the whole year and particularly during summer and night. This drought island is related to the urban heat island (ICU) and can be modulated by vegetation. The town can exceptionally become a moisture island (IHU), mostly in case of urban cool island (IFU). This phenomenon is more frequent in winter. From the water vapor pressure point of view, a systematic seasonal and diurnal alternation is observed between an ISU in summer (or during the day) and an IHU in winter (or at night).*

Key words: *drought island, humidity; vapour pressure; urban climate; Strasbourg*

Introduction

La zone urbaine n'affecte pas seulement la température de l'air, mais aussi d'autres variables comme l'humidité de l'air. Cette variable a été étudiée pour un certain nombre de villes dans le monde : Mexico, Londres, Vancouver, Leicester, etc. (Chandler, 1967 ; Kopec, 1973 ; Ackerman, 1987 ; Lee, 1991 ; Unger, 1999). Dans les villes citées, ces études ont montré que les agglomérations sont en général caractérisées par une humidité globalement plus faible que celle des zones rurales. La ville forme alors un îlot de sécheresse urbain (ISU), aussi bien du point de vue de l'humidité relative que de celui de la pression partielle en vapeur d'eau. Pour l'humidité relative, c'est particulièrement le cas la nuit et en été, quand les îlots de chaleur sont maximums. En effet, les variations d'humidité relative sont particulièrement sensibles aux moindres variations de températures et ces deux variables évoluent en sens inverse l'une de l'autre. En ce qui concerne le contenu en vapeur d'eau, l'ISU se manifeste surtout le jour, en été lorsque les températures dans les deux milieux sont quasiment équivalentes et que les émissions de vapeur d'eau par les surfaces artificielles sont négligeables, comparé aux surfaces naturelles.

Dans certaines circonstances exceptionnelles, le contenu de vapeur d'eau en ville peut parfois devenir supérieur à celui de la campagne (Ackerman, 1987). Ce phénomène forme alors ce que certains auteurs appellent « l'îlot d'humidité urbain » ou IHU (Richards, 2005). Selon ces auteurs, cela se produit surtout pendant les nuits claires d'été, sans vent, alors que l'humidité relative urbaine est pourtant plus faible qu'à la campagne. Cet excédent de vapeur d'eau s'explique essentiellement par la présence d'un îlot de chaleur urbain (ICU) qui maintient une forte capacité hygrométrique de l'air en ville alors qu'il se produit une élimination de vapeur d'eau à la campagne par dépôt de rosée.

Cette étude a pour objectif principal de vérifier dans quelle mesure ce qui a été constaté par ailleurs sur différentes villes dans le monde s'observe à Strasbourg, ce qui se justifie d'autant plus qu'aucun travail de ce type, à notre connaissance, n'existe pour d'autres villes françaises.

1. Site d'étude, matériel et méthodes

L'agglomération de Strasbourg (France, 48,583° N, 7,745° E) occupe une superficie de 340 km² et rassemble près de 490 000 habitants d'après les données INSEE de 2013, soit une densité de 1441 h/km². La ville est quasiment plane et contient très peu de dénivelé ce qui est un atout essentiel pour cette étude topoclimatique car on sait que le relief influence la répartition des températures et de l'humidité. Le climat régional est de type tempéré (Cfb dégradé) selon la classification de Köppen-Geiger. Le tissu urbain a fait l'objet d'une classification en Local Climate Zones (LCZ) selon la norme de Stewart et Oke (2012), par Montauban (2019).

Strasbourg bénéficie d'un réseau de stations météorologiques parmi lequel nous présentons les résultats de trois stations sélectionnées selon l'originalité du site et l'étendue de la série temporelle. La référence rurale est donnée par la station météorologique d'Entzheim qui fait partie du réseau d'observation synoptique de Météo-France, et qui se situe dans une LCZ de type D (*low plants*) avec plus de 95 % de surfaces naturelles dans un rayon de 200 m. Le milieu urbain est représenté par deux stations : 1) la station « DRIRE » qui est gérée par Atmo Grand Est et qui est installée au cœur de la ville, sur le toit d'un bâtiment à 20m, dans une LCZ de type 2 (*compact mid-rise*) et entourée par un tissu urbain très artificiel ; 2) la station « Jardin Botanique » gérée par Météo-France et qui est installée dans un parc urbain de 4,8 ha, lui-même entouré de toute part d'une LCZ de type 2.

Pour garantir une certaine robustesse statistique à ce travail, nous avons choisi d'exploiter les données horaires d'une période de huit ans (2011-2018). Tous les capteurs sont de même type sur tous les sites, ils sont régulièrement étalonnés et sont installés dans des abris de type SOCRIMA à coupelles. La pression partielle en vapeur d'eau n'étant pas directement mesurée, elle a été calculée à l'aide de la méthode classique qui consiste à combiner la pression de vapeur saturante (formule de Tetens) et l'humidité relative.

2. L'humidité relative

L'humidité relative est une variable dont le comportement dépend fortement de la température de l'air. Puisque le site DRIRE est plus chaud en moyenne annuelle (13,4°C) que le site du Jardin Botanique (12,1°C) et Entzheim (11,7°C), il n'est pas étonnant de constater qu'il s'agit aussi du site avec l'humidité relative la plus basse : 67,2% contre 73,2% et 75,4% respectivement pour les deux autres sites. Ce déficit d'humidité est bien la démonstration d'un îlot de sécheresse urbain annuel persistant (ISU). Il faut néanmoins nuancer cette affirmation puisque l'intensité de cet ISU varie dans le temps, au plan mensuel et horaire (Fig.1).

Ce déficit s'observe grâce à la différence d'humidité relative (ΔHR) calculée par rapport à la référence rurale. L'ISU entre DRIRE et Entzheim (ΔHR négatif) s'intensifie pendant les mois d'été (Fig.1, à gauche) pour deux raisons : 1) l'ICU se renforce en été dans ce quartier fortement bâti ; 2) la zone rurale est en pleine activité photosynthétique ce qui lui permet d'émettre de la vapeur d'eau. Le Jardin Botanique suit un comportement quasiment opposé, avec un ISU quasiment nul en été mais qui se renforce en hiver : comme le parc urbain émet de la vapeur d'eau en été, il limite le déficit d'humidité relative d'autant plus facilement que l'ICU y est aussi moins intense. Comme on l'observe sur la Figure 1 à droite, l'ISU est surtout un phénomène nocturne dont l'intensité augmente la nuit. Il est permanent en journée dans le quartier fortement urbanisé (DRIRE), ce qui n'est pas le cas dans le parc (Botanique). Grâce à la végétation qui l'entoure, ce site devient même parfois un léger îlot d'humidité urbain (IHU)

le matin ou fin d'après-midi. Pour la station DRIRE, l'ISU concerne 94 % des observations estivales contre 63,7 % pour Botanique (IHU = 6% et 36,3 % respectivement).

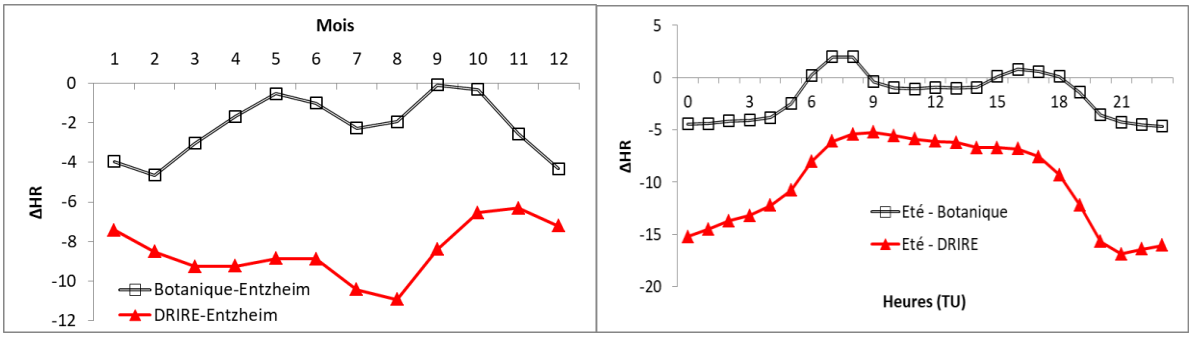


Figure 1. Evolution de la différence d'humidité relative (ΔHR) obtenue par rapport à la rréférence rurale pour deux stations urbaines à Strasbourg pendant la période 2011-2018. A gauche l'évolution mensuelle et à droite l'évolution horaire pour la saison d'été uniquement.

Charciarek (2003) a démontré que l'intensité de l'ISU ne dépend pas uniquement du niveau de végétation de la zone urbaine, mais aussi de l'intensité de l'ICU. Cette hypothèse se vérifie pour le site DRIRE (Fig.2) avec une bonne corrélation linéaire entre ICU et ISU pour la saison d'été (r = -0,85).

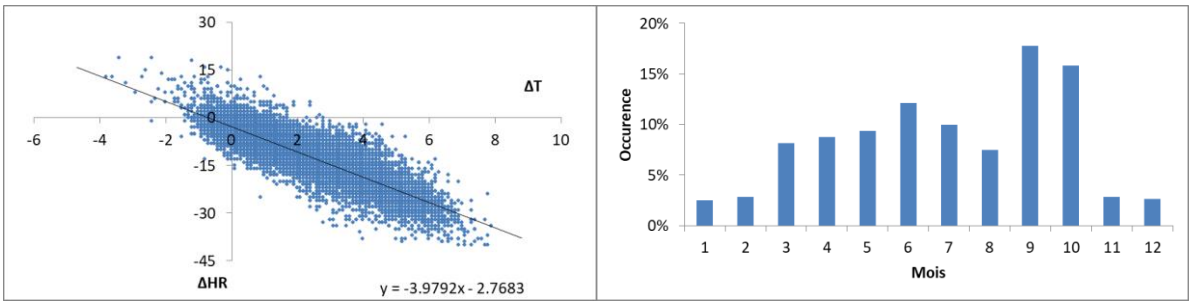


Figure 2. A gauche : Relation entre le ΔT (axe des abscisses) et le ΔHR (axe des ordonnées), pour DRIRE, en été ; à droite : Fréquence mensuelle d'apparition simultanée de l'IHU et de l'IFU pour DRIRE. Période 2011-2018.

Cette relation tendrait à prouver qu'en agissant sur l'ICU, il serait possible d'agir sur l'ISU. Elle montre aussi que, dans certains cas, cette station enregistre un îlot de fraicheur (*ΔT* négatif) en même temps qu'un îlot d'humidité (*ΔHR* positif). Cette situation correspond à un couplage entre IHU et IFU. Les analyses montrent que ce couplage se forme surtout lorsque les conditions météorologiques ne sont pas propices à un bon réchauffement de la zone urbaine au cours de la matinée (temps couvert), ce qui favorise la conservation d'une humidité relative plus élevée dans les canyons urbains confinés, alors que l'espace ouvert de la zone rurale permet déjà un certain réchauffement qui s'accompagne forcément d'une baisse de l'humidité relative. La répartition mensuelle de ce couplage révèle que le phénomène est plus fréquent en saison chaude qu'en saison froide (Fig.2, à droite). Par ailleurs, septembre et octobre apparaissent très nettement comme étant les mois les plus propices. Peut-être qu'à cette période de l'année, les champs laissés à nu par les agriculteurs s'échauffent plus facilement que les canyons urbains et que l'humidité relative y chute d'autant plus aisément que la transpiration ne s'exerce plus du fait de l'absence de végétation.

3. La pression partielle en vapeur d'eau

La variation de la pression partielle en vapeur d'eau n'est pas aussi facile à interpréter que celle de l'humidité relative pour laquelle la température joue un rôle vraiment primordial. Les variations de vapeur d'eau dépendent de l'advection ainsi que de l'évapotranspiration et de la condensation locale. Les caractéristiques du site deviennent déterminantes comme : le type des

surfaces environnantes (naturelles ou artificielles), l'état hydrique de ces surfaces, l'activité des plantes, les pratiques culturales, les sources d'émissions anthropiques.

En moyenne annuelle, la pression partielle en vapeur d'eau est assez similaire pour les trois sites. Elle est de 10,5 hPa pour DRIRE, 10,7 hPa pour Entzheim et 10,8 hPa pour Botanique. C'est une situation conforme aux observations faites par d'autres auteurs comme Ackerman (1987) à Chicago ou Charciarek (2003) pour Lodz. Cette homogénéité annuelle de la teneur en vapeur d'eau cache pourtant de subtiles différences entre sites au niveau mensuel ou horaire.

L'évolution mensuelle en vapeur d'eau est quasiment identique pour Botanique et Entzheim, comme le prouve d'ailleurs la valeur du Δe qui est toujours très proche de zéro (Fig.3, à gauche). En septembre et octobre on observe tout de même une exception puisque le Δe entre Botanique et Entzheim devient soudain positif : le parc urbain produit un léger IHU de vapeur de plus de 0,36 hPa. Cet excédent d'arrière-saison pourrait avoir deux explications complémentaires : 1) la végétation toujours active du parc continue à alimenter l'air en vapeur d'eau tandis qu'à la campagne les champs labourés ne le font plus autant ; 2) les arbres du parc réduisent la durée d'ensoleillement du site le matin et le soir, ce qui retarde le réchauffement matinal et avance le rafraichissement nocturne par rapport à la zone rurale, ce qui stabilise l'air (inversion thermique) et confine la vapeur d'eau en surface. Le comportement de DRIRE est marqué par son caractère très urbain qui se voit immédiatement sur la courbe des Δe mensuels (Fig.3, à gauche). Le contenu en vapeur d'eau y est en moyenne supérieur à celui de la campagne durant la saison froide (Δe positif d'octobre à février, situation d'IHU) et largement inférieur durant la saison chaude (Δe négatif de mars à août, situation d'ISU). L'IHU hivernal peut s'expliquer par la chaleur de la ville (ICU + chaleur anthropique) qui maintient une bonne capacité hygrométrique de l'air, tandis que le déficit estival s'explique plutôt par la faiblesse des émissions en vapeur d'eau du côté urbanisé, qui contraste avec l'intense évapotranspiration de la zone rurale. Pour simplifier l'analyse de l'évolution horaire de la vapeur d'eau, nous ne présenterons ici que les résultats de l'été (Fig.3, à droite). L'ISU est surtout présent le jour et il est très intense à DRIRE, tandis qu'à Botanique la végétation limite le déficit de manière plutôt assez efficace. Ce déficit se comble progressivement la nuit et se transforme même en un excédent de vapeur d'eau (IHU) en fin de nuit, pour les deux stations.

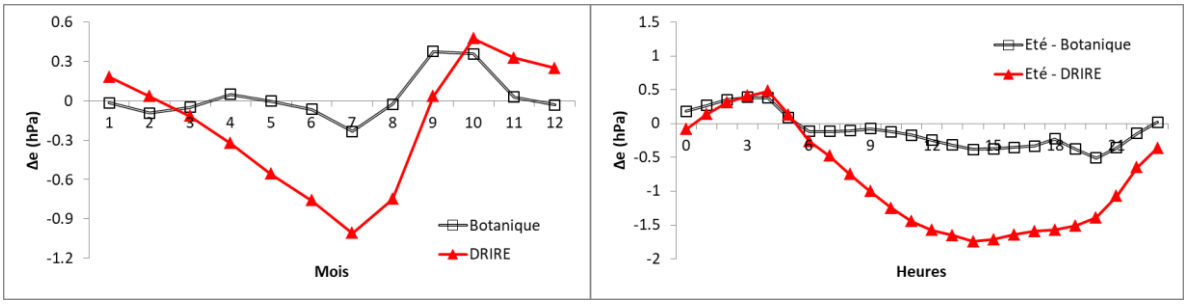


Figure 3. Evolution de la différence de vapeur d'eau (Δe) obtenue par rapport à la référence rurale pour deux stations urbaines à Strasbourg pendant la période 2011-2018. A gauche l'évolution mensuelle et à droite l'évolution horaire pour la saison d'été uniquement.

Les écarts observés dans les Δe mensuels et horaires prouvent l'existence de phénomènes d'ISU/IHU intenses à certains moments si on se réfère aux critères adoptés par Kuttler *et al.* (2007).

Les deux stations urbaines alternent entre un ISU faible à fort la moitié du temps (50,4 % et 52,7 % respectivement pour Botanique et DRIRE) et un IHU le reste du temps (Tab.1). L'îlot de sécheresse urbain n'est donc plus le phénomène dominant comme c'était le cas pour l'humidité relative. On observe même que les IHU forts (Δe > 0,5 hPa) obtiennent des fréquences non négligeables dans les deux stations : 21,3 % pour Botanique et 20,3 % pour

DRIRE (Tab.1). Comme l'IHU (de faible à fort) est un phénomène qui survient essentiellement en période froide et nocturne (Fig.4), l'évapotranspiration joue peu sur sa formation qui est essentiellement due au maintien de la bonne capacité hygrométrique de l'air en ville, du fait de l'existence de l'îlot de chaleur urbain. En outre, le phénomène d'IHU fort est marqué par une fréquence d'apparition singulière en octobre.

Tableau 1. Fréquences d'apparition de la différence de vapeur d'eau (Δe) obtenue par rapport à la rréférence rurale pour les stations urbaines DRIRE et Botanique, par classe d'intensité, sur la période 2011-2018.

	$\Delta e < -0{,}5$ hPa (fort ISU)	$-0{,}5 \leq \Delta e < 0$ hPa (faible ISU)	$0 \leq \Delta e \leq 0{,}5$ hPa (faible IHU)	$\Delta e > 0{,}5$ hPa (fort IHU)
Botanique (%)	18,7	31,7	28,3	21,3
DRIRE (%)	28,3	24,4	27,0	20,3

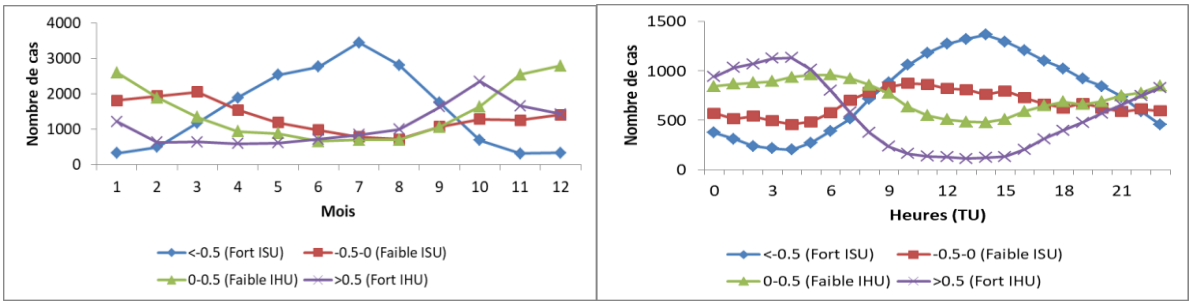


Figure 4. Fréquence d'apparition mensuelle (gauche) et horaire (droite) des classes d'intensité de Δe pour le site de la DRIRE pour la période 2011-2018.

Les ISU intenses (Δe < -0,5 hPa) ont une fréquence de 28,3 % pour DRIRE (Tab.1) et 18,7 % pour Botanique. Il s'agit d'un phénomène essentiellement diurne et de saison chaude (Fig.4). Cette différence de fréquence entre DRIRE et Botanique est beaucoup plus significative dans le cas de l'ISU intense que dans celui de l'IHU intense, ce qui prouve bien le rôle fondamental que joue la végétation en ville pour limiter les ISU : cette différence de fréquence est la conséquence directe de l'évapotranspiration qui se produit dans le parc et y atténue les ISU.

Conclusions et synthèse

Du point de vue de l'humidité relative, la ville forme un îlot de sécheresse (ISU) quasi permanent mais dont l'intensité baisse dans les parcs et varie selon l'îlot de chaleur. Ces deux facteurs constituent des leviers sur lesquels il est possible de jouer pour moduler l'intensité de l'ISU. En de rares occasions, la ville se transforme en un îlot d'humidité (IHU) en même temps qu'un îlot de fraicheur (configuration couplée). Ce couplage se produit surtout au cours des mois de septembre et octobre. En ce qui concerne la vapeur d'eau, le temps se partage beaucoup plus équitablement entre ISU et IHU. L'ISU de vapeur est un phénomène qui se produit pendant la saison chaude et le jour, tandis que l'IHU de vapeur est plutôt présent en pendant la saison froide et la nuit. L'îlot de sécheresse urbain est provoqué par l'intense évapotranspiration en zone rurale qui contraste avec la faiblesse des émissions de vapeur de la ville, surtout dans les zones les plus artificialisées : la présence d'un parc permet d'atténuer considérablement l'intensité des ISU. L'îlot d'humidité quant à lui, doit sa formation essentiellement à la bonne capacité hygrométrique de l'air en ville en hiver ou la nuit du fait de l'îlot de chaleur, alors que simultanément, à la campagne, les basses températures provoquent le départ de la vapeur par dépôt de rosée. Cet IHU de vapeur obtient une fréquence d'apparition inhabituelle au mois d'octobre tout comme pour l'IHU d'humidité relative. Les deux phénomènes sont donc concomitants.

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre du projet COOLTREES (2017-2020) financé par l'ANR.

Bibliographie

Kopec RJ., 1973. Daily spatial and secular variations of atmospheric humidity in a small city. *Journal of Applied Meteorology*, 12, 639-648.
Ackerman B., 1987. Climatology of Chicago area urban-rural differences in humidity. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 427-430.

Chandler T.J., 1967. Absolute and relative humidities in Towns. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48, 394-399.

Charciarek T., 2003. Daily course of vapour pressure and relative humidity differences between urban and rural site in Lodz. 5th international conference on urban climate, Lodz, Pologne, 1, 51-54.

Kuttler W., Weber S., Schonnefeld J., & Hesselschwerdt A., 2007. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology*, 27, 2005-2015.

Lee D.O., 1991. Urban-rural humidity differences in London. *International Journal of Climatology*, 11, 577-582.

Montauban O., 2019. *Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg.* Mémoire de projet de fin d'études, 90p.

Richards K., 2005. Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada. *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 143-163.

Stewart I., & Oke T., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

Unger J., 1999. Urban-rural humidity differences in Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, 19, 1509-1515.

INFLUENCE DES ESTIMATIONS D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE PAR LES METHODES DE PENMAN-MONTEITH ET DE OUDIN SUR LA CALIBRATION DU MODELE HYDROLOGIQUE GR4J DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME (AFRIQUE DE L'OUEST)

KODJA D. J.[1], AKOGNONGBE A.J.S.[1], AMOUSSOU E.[1,2], MAHE G.[3], VISSIN E.W.[1], PATUREL J.E.[3], HOUNDENOU C.[1,4]

1 Laboratoire Pierre Pagney, Climats, Eaux, Ecosystèmes et développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin (japhdom@gmail.com)
2 Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Parakou, Bénin
3 UMR 5599 HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, Montpellier, France
4 Institut de Géographie de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (IGATE), Cotonou, Bénin

Résumé : *L'étude vise à analyser l'impact de l'estimation des ETP par les méthodes de Penman-Monteith et de Oudin sur la simulation des débits avec le modèle GR4J dans le bassin versant de l'Ouémé. Pour y parvenir, les données de précipitations journalières, l'évapotranspiration de Penman-Monteith, de Oudin et des débits journaliers des stations hydrométriques de Bétérou et de Bonou sur la période de 1971 à 2010 ont été implémentées dans le modèle global conceptuel GR4J. Les résultats indiquent une variation entre les ETP de Penman-Monteith et celle de Oudin. Les valeurs de l'ETP de Oudin sont légèrement supérieures à celle de l'ETP de Penman-Monteith dans le secteur. Quant à la calibration, les valeurs du Nash, en calage varient de 90 à 91 % à Bonou et de 64 à 78 % à Bétérou, alors qu'en validation, elles sont de 61 à 75 % à Bétérou et de 85 à 88 % à Bonou. Il convient de dire que la formulation de l'ETP a peu d'impact sur les critères du Nash du modèle GR4J pour ces deux bassins tropicaux*

Mots clés : *Calibration ; ETP de Penman-Monteith et de Oudin ; bassin*

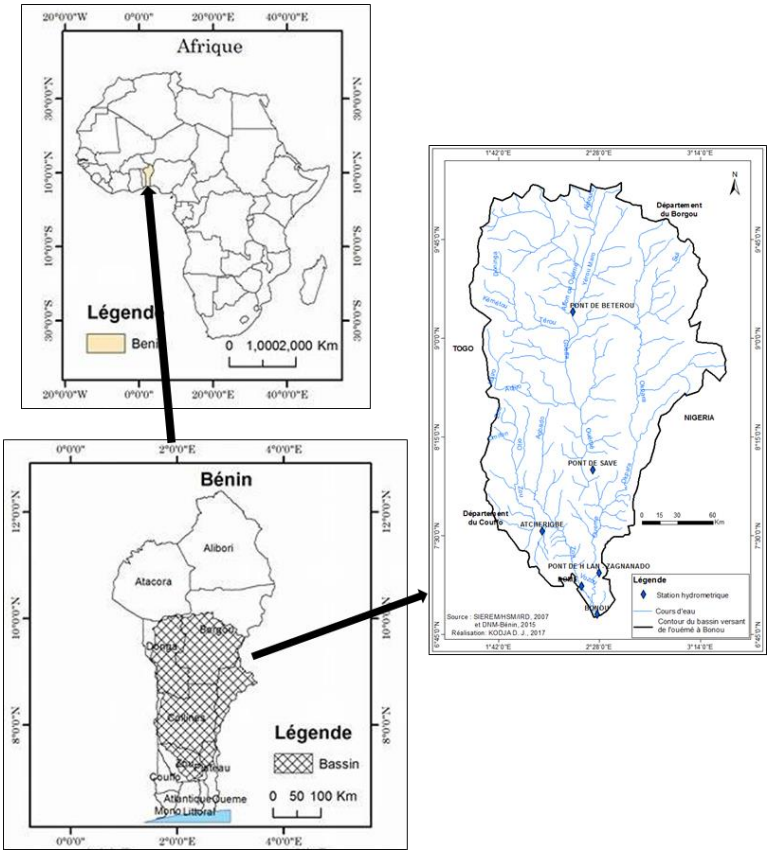
Summary: ***Influence of potential evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith and Oudin methods on the calibration of the gr4j hydrological model in the Oueme watershed (west Africa).*** *The study aims at analyzing the calibration of the hydrological model GR4J based on PET Penman-Monteith and Oudin estimate. Daily rainfall, Penman-Monteith and Oudin evapotranspiration and daily data flow from the Bétérou and Bonou hydrometric stations over the period 1971 to 2010 have been implemented in the GR4J model. Results indicate a variation between the Penman-Monteith and the Oudin PET. In addition, Oudin's PET values are slightly above those of Penman-Monteith PET in the study area. The values of the Nash, in calibration range from 90 to 91 % in Bonou and from 64 to 78 % in Bétérou, while in validation, they range from 61 to 75% in Bétérou and from 85 to 88 % in Bonou. It should be said that the formulation of the PET has little impact on the Nash criteria of the GR4J model for these two tropical basins*

Key words: *Calibration; Penman-Monteith and Oudin PET; basin*

Introduction

En raison des effets du réchauffement climatique, l'intensité et la fréquence des fortes précipitations augmenteront à l'avenir avec des incidences sur la disponibilité des ressources en eau souterraines et superficielles ainsi que les productions qui en dépendent (Crétat *et al.*, 2012). Dans ce cas, caractériser et prévoir la disponibilité de ces ressources dans l'espace et dans le temps deviennent alors indispensables pour la proposition des solutions adaptées aux projets de développement (Sighomnou, 2004). Pour Amoussou *et al.*, (2015), les modèles pluie-débits sont les outils qui peuvent permettre d'utiliser au mieux les ressources en eau et de suivre leur évolution dans le temps et dans l'espace. Ces auteurs ont renchéri que les modèles pluie-débits sont susceptibles de reproduire à l'échelle du bassin-versant les débits des fleuves et rivières à partir de la mesure ou de la simulation des pluies et de l'ETP. Ainsi dans le cas de cette étude, il s'agit d'analyser l'influence de l'ETP dans la calibration du modèle hydrologique pluie débit GR4J à partir de l'estimation des ETP par les méthodes de Penman-Monteith et de Oudin dans les bassins-versant de l'Ouémé à Bétérou et de l'Ouémé à Bonou, au Bénin. Le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou, couvre une superficie de 46 200 km² dont 10050 km² pour

le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Le secteur d'étude s'étale en amont sur le socle dahoméen tandis que le sud est sur les formations sédimentaires. D'après la figure 1, il est compris entre 10°12' et 7°58' de latitude Nord et 1°35' et 3°05' de longitude Est avec un léger débordement à l'est vers le Nigeria et à l'Ouest vers le Togo (Le Barbé *et al.*, 1993). Le climat du bassin versant de l'Ouémé est de type béninien ou subéquatorial à quatre saisons dont deux saisons pluvieuses alternées avec des saisons sèches (où se trouve l'exutoire de Bonou) et au nord le climat est de type soudanien (où se trouve l'exutoire de Bétérou) à une seule saison pluvieuse et une seule saison sèche en passant par un climat intermédiaire de type subsoudanien servant de transition entre le sud et le nord du milieu d'étude.



Son réseau hydrographique est complexe, dense et long de 510 km sur le territoire béninois avec un régime hydrologique lié à la pluviosité et un sens d'écoulement globalement orienté du nord au sud vers les plaines d'inondations du delta de l'Ouémé.

Figure 1. Situation géographique du secteur d'étude.

1. Données et Méthodes

1.1. Données

Il s'agit des données de hauteurs de pluies journalières de 30 stations ou postes pluviométriques dont 4 synoptiques et de la température journalière moyenne, l'humidité relative moyenne, l'insolation et la vitesse du vent des stations synoptiques de Savè et de Bohicon (ces données ont servi à calculer l'ETP de Penman-Monteith). Ces données proviennent des fichiers de l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin. Les données hydrométriques concernent les débits à l'exutoire de Bétérou (domaine du climat sudsoudanien) et l'exutoire de Bonou (domaine du climat subéquatorial), extraites de la base de la Direction Générale de l'Eau au Bénin.

Ces différentes données couvrent la période de 1971 à 2010 et sont complétées par celles de la base de données du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux

et leur Modélisation (SIEREM), Unité Mixte de Recherche 5569, Hydrosciences Montpellier (HSM).

1.2. Méthodes

Les stations considérées sont celles dont le taux de lacunes des hauteurs de pluies n'excède pas 5 % (Amoussou *et al.,* 2015). Une régionalisation est réalisée par la méthode de Thiessen afin d'avoir une donnée moyennée. Les données de pluie ont fait l'objet d'une analyse de rupture de stationnarité à partir des tests statistiques intégrés au logiciel Khronostat 1.01, développé par l'Unité Mixte de Recherche (UMR 5569) du laboratoire HydroSciences Montpellier. Pour cette recherche, la méthode non paramétrique de Pettitt a été utilisée.

1.2.1. Méthode de calcul de l'évapotranspiration

L'ETP n'est pas une variable mesurée, comme la pluie, mais le résultat d'un modèle combinant diverses variables climatiques (Oudin *et al.,* 2005).

- ***Evapotranspiration de Penman-Monteith :*** La méthode d'estimation de l'évapotranspiration de Penman-Monteith nécessite plusieurs paramètres climatiques dont la température de l'air (mini et maxi), l'humidité relative moyenne, l'insolation, la vitesse du vent à 2 m/s du sol, la latitude de la station climatologique considérée (Allen *et al.,* 1998) . Les données restantes sont générées par le logiciel Instat+ utilisé pour calculer l'ETP.
- ***Evapotranspiration de Oudin :*** **Cette** méthode de calcul de l'ETP, est issue des modèles de Jensen-Haise et de McGuinness (Oudin *et al.,* 2005). Ces modèles généralement utilisés en climatologie prennent en compte seulement la température moyenne journalière de l'air et le rayonnement solaire qui dépend de la latitude et des 365 jours de l'année.

1.2.2. Calibration et validation

Pour caler et valider le modèle GR4J, des sous-périodes de calage et de validation ont été retenues : 1971-1987 pour la calibration et 1993-2010 pour la validation. Il est à noter que les sous-périodes sont homogènes et appartiennent à la séquence sèche ou humide, obtenue après la rupture de stationnarité dans les chroniques de pluie.

La calibration du modèle GR4J est basée sur les critères d'optimisation et de performance du modèle à reproduire les écoulements dans le secteur d'étude grâce aux critères de Nash-Sutcliffe, (1970), soit NSE. Ainsi le critère de NSE(Q), calculé sur les débits de hautes eaux : $NSE(Q) = \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs}}$; le critère de NSE (√Q), calculé sur les racines carrées des débits : $NSE(\sqrt{Q}) = \frac{\sum (\sqrt{Q_{sim}} - \sqrt{Q_{obs}})}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})}$ et le critère de NSE Log (Q), calculé sur les logarithmes des débits : $NSE(\ln(Q) = \frac{\sum (\ln(Q_{sim}) - \ln(Q_{obs}))}{\sum (\ln(Q_{obs}) - \ln(Q_{obs}))}$.

Toutes les valeurs de ces critères sont comprises dans l'intervalle] -∞ to 1] (Ouédraogo, 2001).

2. Résultats

2.1. Evolution interannuelle de l'évapotranspiration potentielle moyenne de Penman Monteith et de Oudin dans le secteur d'étude

L'analyse de la figure 2, révèle que l'ETP estimée par la méthode de Oudin présente quasiment le même rythme que l'ETP calculée avec la méthode de Penman Monteith à Bétérou comme à Bonou.

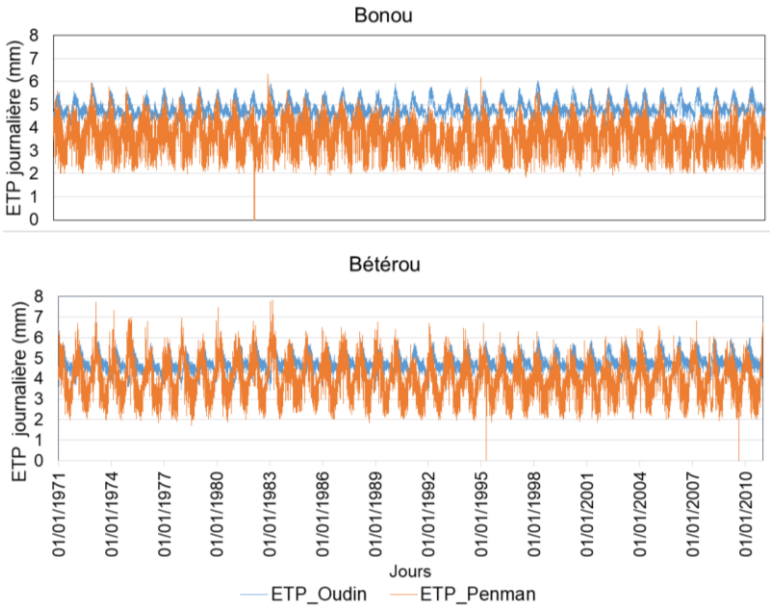


Figure 2. Evapotranspiration potentielle quotidienne calculée à partir des formules de Penman-Monteigh et Oudin, à Bétérou et Bonou.

De plus, sur la période 1971-2010, la moyenne annuelle de l'ETP à Bétérou pour l'ETP de Oudin est de 4,77 tandis que celle de Penman est de 4,02. Quant à Bonou, l'ETP moyenne de Oudin est de 4,9 et celle de Penman Monteith est de 3,7. Par ailleurs, les écarts entre l'ETP de Oudin et de Penman –Monteih sont respectivement de -15,6 % à Bétérou contre -24,7 % à Bonou. Mais, il apparaît que l'amplitude annuelle des ETP de Penman est bien plus forte que celle de Oudin alors que l'analyse des écarts indique que les valeurs de l'ETP de Oudin surestiment celles estimées par la méthode de Penman –Monteih dans les deux sous-bassins. Il convient de dire que cela peut être dû à la formulation de ces différentes ETP (Oudin *et al.*, 2005)

2.2. Variabilité des précipitations et des débits avec le modèle pluie-débit GR4J en calage et en validation à Bonou

Les figures 3 et 4 présentent l'évolution de la précipitation, des débits observés et aussi des débits simulés par le modèle GR4J avec en entrée les ETP de Oudin et celles de Penman-Monteith à Bonou en calage et en validation. L'analyse des figures 3 et 4 révèle que les débits moyens observés et simulés présentent quasiment, en calage et en validation, avec l'ETP de Oudin et de Penman-Monteith, le même rythme à Bonou avec un léger décalage au regard de la variabilité pluviométrique. De surcroît, il est constaté que les débits simulés surestiment les débits observés en période de basses eaux et les sous-estiment pendant les hautes eaux. Des constats similaires ont été observés à Bétérou et ne sont pas présentés ici.

Toutefois, les critères de Nash (NSE), constituent des indicateurs afin d'apprécier l'impact des différentes méthodes d'estimation de l'ETP sur la performance et le calage du modèle GR4J.

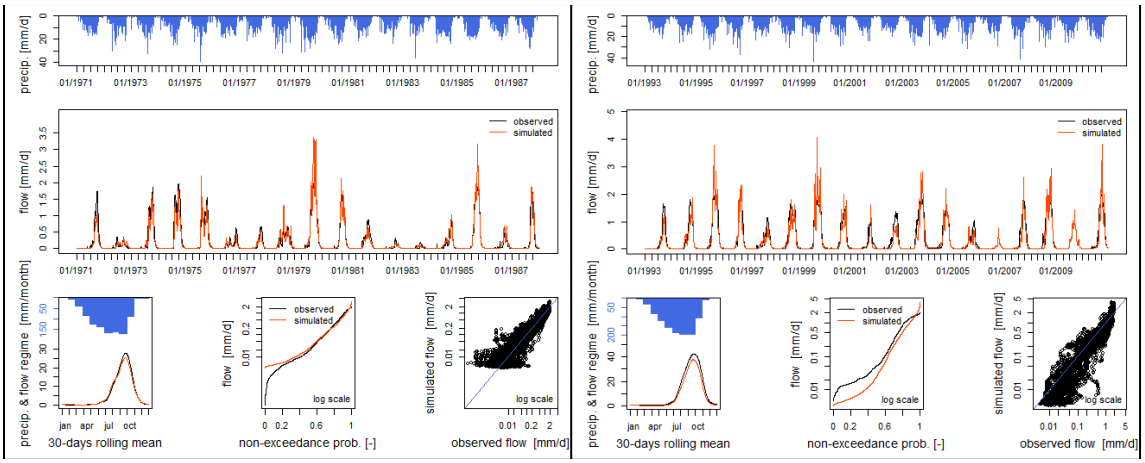


Figure 3. Variabilité des précipitations et des débits en calage et validation avec l'ETP de Oudin.

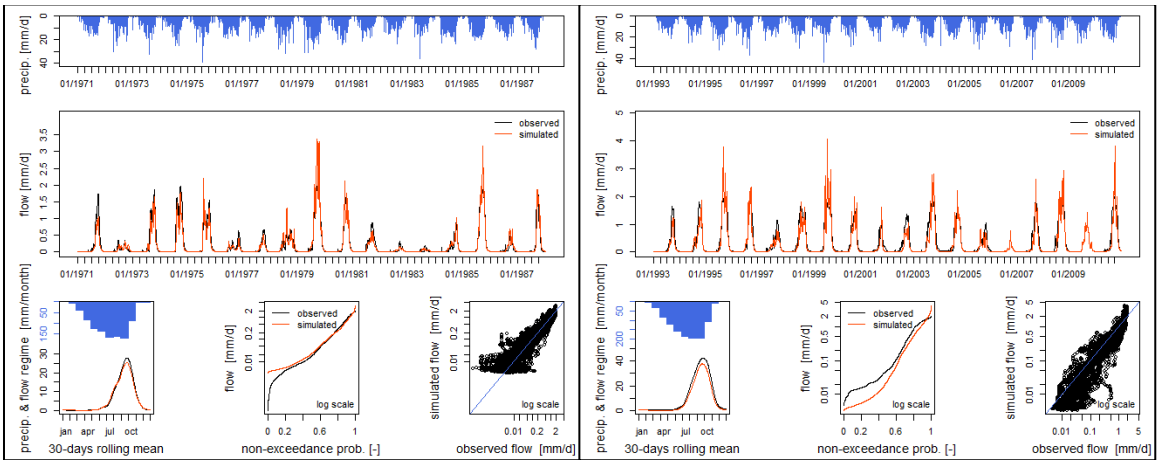


Figure 4. Variabilité des précipitations et des débits en calage et validation avec l'ETP de Penman-Monteith.

2.3. Valeurs des critères de calage et de la validation avec le modèle GR4J dans les bassins-versants de l'Ouémé à Bétérou et à Bonou

L'analyse des critères d'optimisation du modèle est aussi un indicateur pour mieux apprécier la performance du modèle (Tab.1). Ainsi les valeurs du NSE calculées sur les racines carrées des débits, sur les logarithmes des débits et sur les débits de hautes eaux à Bonou et à Bétérou donnent les mêmes valeurs correspondant à chaque critère aussi bien pour la méthode d'estimation de l'ETP de l'Oudin que de l'ETP de Penman Monteith.

Tableau 1. Valeurs des critères de calage et de la validation.

Ouémé à Bonou							
	ETP de OUDIN				***ETP de PENMAN MONTEIH -FAO***		
	$NSE\sqrt{Q}$	$NSE(ln\,(Q))$	$NSE(Q)$		$NSE\sqrt{Q}$	$NSE(ln\,(Q))$	$NSE(Q)$
Cal_1971-1987	0,91	0,83	0,83		0,91	0,83	0,83
Val_1993-2010	0,88	0,56	0,76		0,87	0,56	0,76
Cal_1993-2010	0,90	0,90	0,85		0,90	0,90	0,85
Val_1971-1987	0,85	0,60	0,75		0,85	0,60	0,75
Ouémé à Bétérou							
Cal_1971-1987	0,64	0,70	0,52		0,64	0,70	0,52
Val_1993-2010	0,75	0,78	0,59		0,75	0,78	0,59
Cal_1993-2010	0,78	0,79	0,61		0,78	0,79	0,61
Val_1971-1987	0,61	0,70	0,49		0,61	0,70	0,49

Il convient donc de dire que les méthodes d'estimation de l'ETP n'influencent pas la calibration du modèle GR4J dans le secteur d'étude. Ce qui corrobore les résultats de Dezetter (1991) et Ben Khediri et Drogue (2016) qui indiquent que les modèles pluie-débit utilisant l'ETP en entrée ne sont pas sensibles à telle ou telle autre méthode de calcul de l'ETP.

Conclusion

Au terme de cette étude, il y a lieu de retenir que la méthode d'estimation de l'ETP de Oudin et celle de Penman-Monteith n'a pas assez d'impact sur la calibration et la performance du modèle GR4J à reproduire les débits pour les deux bassins tropicaux béninois étudiés. Dans ce sens, il est important donc d'approfondir les recherches sur l'utilité des méthodes d'estimation de l'ETP dans la reproduction des débits surtout dans le contexte des changements globaux et de la révision des normes hydrologiques.

Remerciements

Sincères remerciements à tous les co-auteurs de cet article scientifique pour avoir contribué au traitement des données voire à l'analyse des résultats. Toutes nos reconnaissances aux organisateurs du 33ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), tenu à Rennes du 1er au 04 juillet 2020, malgré les vicissitudes de la pandémie de la Covid 19 qui a frappé le monde entier.

Bibliographie

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., & Smith M., 1998. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (http://www. fao. org/docrep) ARPAV (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quaderni per. *Geophysics*, 156-178.

Amoussou E., *et al.*, 2015. Application d'un modèle conceptuel à l'analyse de la dynamique hydrométéorologique des crues dans un bassin-versant en milieu tropical humide : cas du fleuve Mono. In 28ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 17-23.

Ben Khediri W. & Drogue G. 2015. Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ?. *Climatologie*, (12), 24p.

Crétat J., Richard Y., Pohl B., Rouault M., Reason C. J. C., & Fauchereau N., 2012. Recurrent daily rainfall patterns over South Africa and associated dynamics during the core of the austral summer. *International Journal of Climatology* (32): 261-273.

Dezetter A. 1991. *Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte-d'Ivoire)*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 428p.

Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., 1993. *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin.* Edition ORSTOM, 540p.

Nash J. E., Sutcliffe J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. (10), 282-290.

Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. & Loumagne C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

Ouédraogo M., 2001. *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante. Normes hydrologiques et modélisation régionale.* Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, France, 257p.

Sighomnou D., 2004. *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Yaoundé*. Thèse, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 289p.

SENSIBILITE DES RESSOURCES EN EAU AU FORÇAGE PLUVIOMETRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU BANDAMA (COTE D'IVOIRE)

KONAN K.C., TRA BI Z.A.

Laboratoire de Géographie Physique (LGP), Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire (charlykouakou26@gmail.com)

Résumé : *Le bassin versant du Bandama est le plus grand bassin de Côte d'Ivoire en termes de surface drainée (97500 km²). Cette étude vise à analyser les modifications induites par la fluctuation pluviométrique sur le comportement hydrologique du Bandama de 1960 à 2010. Le test de détection de rupture de Pettitt et l'indice de Nicholson ont été appliqués à la série climatique et hydrométrique à la station de Korhogo, Bouaflé et Grand Lahou. Les ruptures identifiées dans les décennies 70 et 80 ont engendré un déficit pluviométrique respectif de -16.84%, -20.07 et de -49.07 %. Cette diminution des quantités pluviométriques a eu pour conséquence une baisse des écoulements de surface et souterrains. Pour les débits, les résultats mettent en évidence un déficit d'écoulement estimé à -62.35% dans le haut Bandama à Korhogo, -52.52% à Nzianoa et à -42.49% à Bouaflé. Ces résultats démontrent une vidange beaucoup plus rapide des aquifères alimentant l'écoulement de base.*

Mots clés : *écoulement de surface ; bassin versant ; débits ; Bandama ; déficit*

Summary*: Sensitivity of water resources to rainfall forcing in the Bandama watershed area (Ivory Coast).* *The Bandama watershed is the largest basin in Côte d'Ivoire in terms of surface area drained (97,500 km²). This study aims to analyze the modifications induced by the rainfall fluctuation on the hydrological behavior of the Bandama from 1960 to 2010. The Pettitt rupture detection test and the Nicholson index were applied to the climatic and hydrometric series at the station of Korhogo, Bouaflé and Grand Lahou. The ruptures identified in the 1970s and 1980s generated a rainfall deficit of -16.84%, -20.07% and -49.07 % respectively. This decrease in rainfall amounts resulted in a decrease in surface and underground flows. For the flows, the results show a flow deficit estimated at -62.35% in the upper Bandama in Korhogo, -52.52% in Nzianoa and -42.49% in Bouaflé. These results demonstrate a much faster emptying of the aquifers supplying the base flow.*

Key words: *surface flow; catchment; flow; Bandama; deficit*

Introduction

L'existence des changements climatiques que subit le globe depuis une trentaine d'années n'a fait qu'augmenter la vulnérabilité de la ressource en eau, (Pilabina, 2015). En effet, les évènements climatiques extrêmes devraient devenir plus fréquents avec le réchauffement climatique. La hausse des températures comme la modification du calendrier des précipitations auront un impact négatif sur les ressources en eau, avec la modification de son cycle. De nombreuses analyses réalisées en Afrique de l'ouest et en Côte d'Ivoire, à partir de données météorologiques et hydrologiques, montrent qu'au cours de la décennie 1970-1980, la baisse des écoulements a été plus prononcée (Servat *et al.*, 1998, 1997c; Goula *et al*., 2006). L'étude des basses eaux des fleuves tropicaux montre, de ce fait, une faiblesse quasi générale des débits d'étiage, avec une accélération du tarissement. De façon générale, la variabilité des écoulements est amplifiée. Par exemple, l'analyse des chroniques, entre 1980 et 2000 sur quelques bassins versants en Côte d'Ivoire, montre la baisse des écoulements de 30% à 60%, (Servat *et al.*, 1998). Ce phénomène traduit une réduction de l'alimentation en eau des bassins fluviaux, conséquence d'une succession d'années de pluviométrie faible, (Brou, 2005). La principale conséquence de l'amenuisement de ces ressources est le tarissement de nombreux barrages aménagés pour desservir la population en eau potable. L'exemple le plus spectaculaire est celui du Lac de Kossou situé sur le bassin versant du Bandama. La détermination de l'impact des changements climatiques sur les systèmes hydrologiques et leurs ressources en eau, que ce soit à l'échelle régionale ou à l'échelle globale, constitue un enjeu majeur pour le XXIe siècle, auquel les scientifiques doivent répondre.

La situation géographique du bassin versant du Bandama, qui intègre globalement tous les climats de Côte d'Ivoire du Nord au Sud, permet de décrire à une petite échelle l'ensemble des modifications et leurs variations spatiales. En effet, le Bandama, d'une longueur de 1 050 km, est le seul parmi les quatre grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien (Fig.1). Il occupe une superficie de 97 500 km² et s'étend de 3°50' à 7° de longitude Ouest et 5° à10°20' de latitude Nord. Il renferme une partie essentielle de la Côte d'Ivoire au plan socio-économique (ancienne boucle du cacao) et constitue un atout majeur pour son développement.

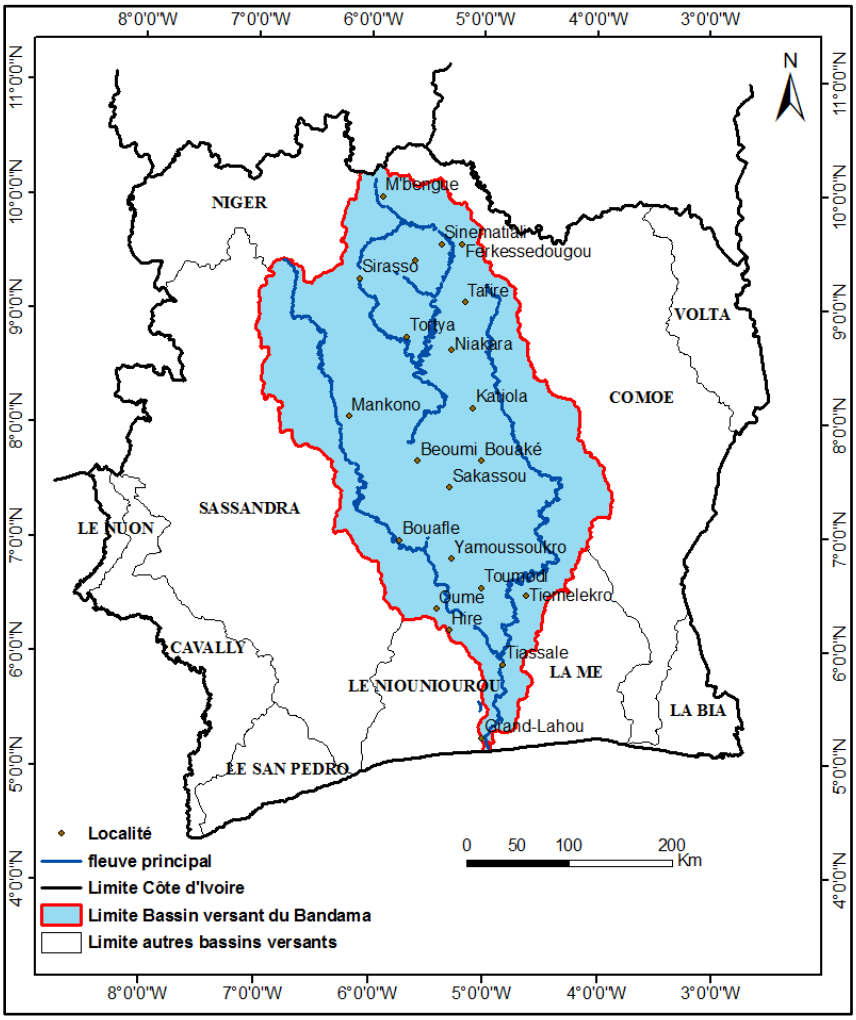


Figure 1. Présentation du Bassin versant du Bandama

1. Matériel et méthode

Les données utilisées pour cette étude sont celles du service météorologique de la SODEXAM (Société de Développement et Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique) et du service hydrologique de la Sous-Direction de l'Hydrologie. Comme les données de pluie, trois postes hydrométriques ont été choisies selon le régime climatique. Il s'agit notamment des stations de Korhogo au Nord, des stations de Bouaflé au centre et au Sud la station de Nzianoa. Ces données hydro-climatologiques ont servi à détecter d'éventuels changements de stationnarité dans les différentes séries.

La représentation graphique sur un même axe de temps des données de pluie à celles de débit permet de déterminer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface. L'analyse a été réalisée à l'échelle annuelle par l'observation des valeurs centrées réduites des

précipitations et de débits, du coefficient de tarissement et des volumes d'eau mobilisés par les aquifères.

L'indice de Nicholson permet de calculer les anomalies centrées réduites pluviométriques et hydrométriques interannuelles. Le calcul des indices pluviométriques à partir de la formule de Nicholson, (Nicholson, 1979) s'effectue comme suit :

$I_i = \frac{xi - xmoy}{\sigma(x)}$ Avec ; I_i : anomalie centrée réduite pour l'année i; x_i*(mm)* : la valeur de la variable pour une station pendant une année *i* ; *xmoy(mm)* : Moyenne interannuelle de la série; σ (x) : Ecart-type de la série.

Le test de Pettitt permet de mettre en évidence un changement de moyenne au sein d'une série chronologique (Pettitt, 1979). Elle permet ainsi de caractériser les phases d'évolution de la pluviométrie et les écoulements de surface.

Pour évaluer les tarissements sur le bassin du Bandama, nous avons adopté la méthode de Maillet améliorée par résolution dichotomique et proposée par Savané *et al*. (2003) qui se formule comme suit : $Q_{t=} Q_0\, e^{-kt}$ Q_t est le débit à l'instant t donné, Q_0 le débit initial (débit au début du tarissement) et k le coefficient de tarissement de Maillet. Ainsi, l'équation du coefficient de tarissement (k) s'écrit :

$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Qo} - \frac{1}{K}$

Le volume mobilisé par l'ensemble des aquifères est donné par l'équation **:**

$V = \int_0^{+\infty} Qo e^{-kt}\, dt = \frac{Q0}{k}$, Q_0 est exprimé en m^3/jour et k en j^{-1}

2. Résultats

2.1. Examen de l'homogénéité des séries hydroclimatiques annuelles selon le test de pettitt

Les résultats du test de Pettit montrent que les séries hydroclimatiques annuelles des différentes stations présentent une rupture au seuil de confiance de 99% largement supérieur à 0,05, qui est le seuil de signification. La détection des ruptures probables dans la série pluviométrique annuelle se traduit par une segmentation en séquences statistiquement différentes, (Tab.1).

Tableau 1. Synthèse des résultats des tests d'homogénéité sur les pluies annuelles de 1960 à 2010 dans le bassin versant du Bandama

Station	Année de rupture	Moyenne avant rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Ecart (mm)	Déficit (%)
Korhogo	1970	1383	1150	-233	-16.84
Bouaflé	1972	1390	1111	-279	-20.07
Grand Lahou	1982	1692	862	-830	-49.05

L'analyse du tableau 1 montre que la rupture a lieu un peu plus tôt dans la séquence à la station de Korhogo en 1970 et Bouaké en 1972. Quant à la station de Grand Lahou, la rupture a lieu tardivement en 1982 dans la série pluviométrique. Les déficits de pluie atteignent -16.84% à Korhogo et -20.07% à Bouaflé. Il atteint sa valeur maximum à Grand Lahou avec -49.05%.

Dans les séries de débit moyen annuel des différentes stations hydrométriques, les dates de rupture sont moins dispersées et se situent autour de 1970, (Tab.2). L'analyse du tableau 2 révèle aussi que toutes ces stations présentent un déficit de débit après la rupture. Les déficits sont en moyenne plus importants pour les cours d'eau au Nord du bassin versant du Bandama (-62.35%) que ceux de la partie Sud (-52.52%). Ces résultats obtenus sont en concordance avec les dates détectées sur les indices annuels pluviométriques de la fin des années 1970 / début des

années 1980. Nous supposons donc que la diminution des écoulements serait due à une diminution globale des précipitations.

Tableau 2. Résultats du test de Pettitt et calcul de la variation des débits moyen annuel des différents cours d'eau de 1960 à 2010

Station	Date de rupture	Moyenne avant rupture (m^3/s)	Moyenne après rupture (m^3/s)	Ecart (m^3/s)	Déficit (%)
Bandama (blanc) à Korhogo	1978	39.71	14.95	-24.76	-62.35
Marahoué à Bouafle	1971	96.29	55.50	-40.79	-42.49
Nzi à Nzianoa	1968	111.89	53.11	-58.78	-52.52

2.2. Corrélation variabilité pluviométrique et les ressources en eau

2.2.1. Analyse de la relation pluie-débit

Le graphique de fluctuation par l'indice de Nicholson reflète bien la grande variabilité hydroclimatique au niveau du bassin versant du Bandama depuis 1960 (Fig.2). Pour toutes les stations, on compte plus d'années excédentaires que d'années déficitaires avant la période de rupture. Á l'opposé de la décennie 1960, la dernière phase est caractérisée par une période sèche ponctuée de quelques années excédentaires. Les indices de pluies et de débits se superposent dans l'ensemble, quel que soit l'état d'humidité. En effet, les pluies du bassin versant du Bandama sont caractérisées par une longue et unique période sèche (1970-2010). C'est pendant cette période qu'on observe la baisse des débits avec la descente des eaux du fleuve. Cette relation est attestée par un coefficient de corrélation élevé, variant entre 0.40 et 0.60.

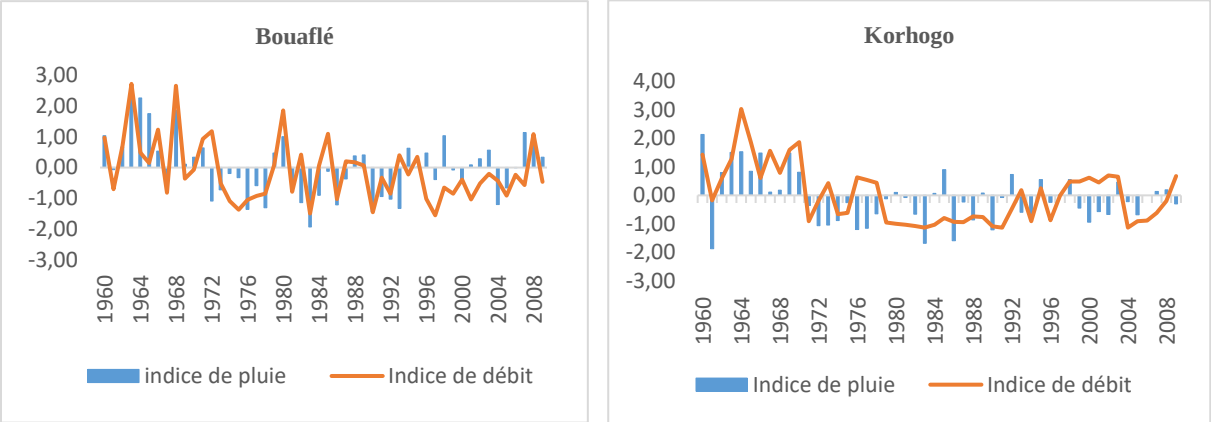


Figure 2. Sensibilité du régime hydrologique du Bandama aux variations annuelles de la pluie sur la période 1960-2010

Les déficits d'écoulement entre les périodes 1960-1970 et 1971-2010 sont plus de deux fois le déficit pluviométrique observé dans ces mêmes sous bassins. Ils sont respectivement de -62.35 % dans le Bandama blanc à Korhogo, -42.49 % dans le Marahoué et -52.52 % dans la partie Sud du Bandama.

1.2.2. Incidence des fluctuations pluviométriques sur la recharge des aquifère

L'analyse de l'évolution des coefficients de tarissement annuels sur la période 1960-1994 montrent de fortes fluctuations interannuelles (Fig.3). Sur le Bandama blanc à Tortya, de 1971 à 1994, le coefficient de tarissement à augmenter de 0.0112 j^{-1} soit une hausse de 27.51%. Sur la période 1960-1971, le coefficient de tarissement du N'zi diminue progressivement après 1971 et atteint sa plus faible valeur en 1979 avec 0.036 j^{-1}. Après 1982, intervient une montée brutale du coefficient de tarissement, jusqu'à atteindre 0.081 j^{-1} en 1989. Ces résultats montrent

que les coefficients de tarissement diminuent en période humide (1960-1971) et augmentent en période déficitaire (1972-1994).

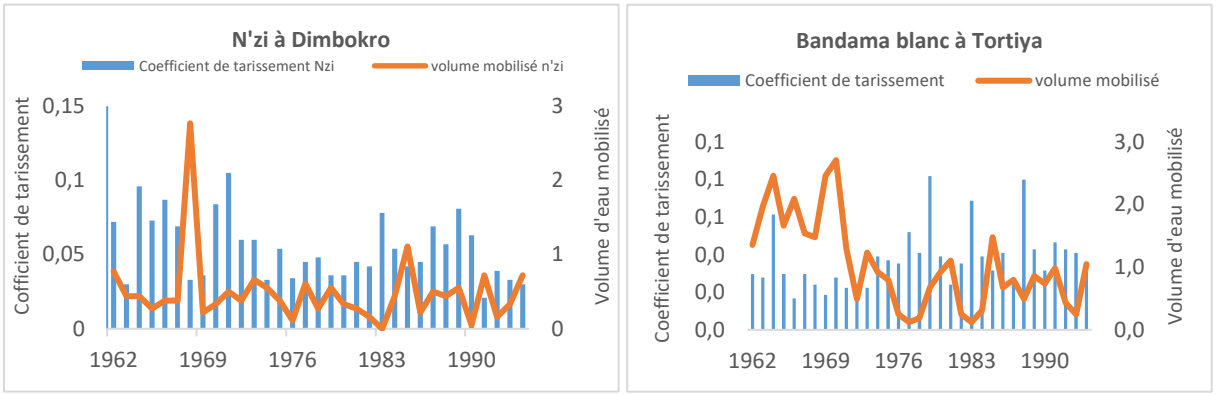


Figure 3. Evolution du Coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé du Bandama

La hausse du coefficient de tarissement généralisé des eaux du bassin versant du Bandama traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines. En effet, après 1968, les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0 et 1.11km^3 et mettent en évidence une baisse de la recharge de 48% et 65.48 % respectivement dans le N'zi et dans le Bandama blanc. Ces résultats montrent que les perturbations pluviométriques qui ont affecté la région pendant ces dernières décennies sont ressenties sur les écoulements et les réserves en eau souterraine.

Discussion et conclusion

L'analyse des données hydroclimatiques a permis d'identifier les manifestations de la variabilité hydrologique observée, depuis une trentaine d'années, sur l'ensemble du bassin versant du Bandama. La sécheresse pluviométrique la plus brutale et la plus significative a été observée autour des années 1970, à partir desquelles on note généralement une diminution importante de la pluviométrie annuelle. Ce même résultat a été obtenu en Afrique équatoriale atlantique par Ibiassi (2003), qui remarquent que les années 1970 marquent le début d'une évolution pluviométrique à la baisse. Les déficits pluviométriques calculés par rapport aux années de ruptures identifiées sont supérieurs à 10 % conformément aux travaux réalisés en Côte d'Ivoire, (Brou, 2005). Cependant, si dans le haut Bandama, cette fluctuation semble s'inscrire dans la "norme" des fluctuations des séries chronologiques, l'étude des séries longues montre qu'au sud elle revêt un caractère d'exception tant par son intensité que par sa durée.

Par ailleurs, l'incidence de cette baisse pluviométrique est observable sur les écoulements puisque les indices de débits calculés montrent un déficit hydrométrique depuis 1970. Cette rupture coïncide avec les années de grands déficits d'écoulement déterminées dans les études antérieures sur une bonne partie de l'Afrique tropicale, (Mahé et Olivry, 1995 ; Vissin, 2001). En somme, la stationnarité du régime hydrologique du Bandama s'accorde à la logique générale qui admet que les ruptures hydrométriques interviennent à la suite des ruptures pluviométriques, (Vinssin *et al.*, 2004 ; Mahé *et al.*, 1995). La succession d'années à pluviométrie déficitaire marque aussi négativement l'écoulement souterrain dans le bassin versant du Bandama. En effet, l'apparition de la période déficitaire a pour conséquence, la réduction du volume d'eau mobilisé par les aquifères de 48% sur le n'zi et 65% sur le Bandama blanc à Tortiya. Cette réduction est proche de celle observée dans les travaux effectués par Goula et *collaborateurs* (2006) dans le bassin versant du n'zo, sous bassin versant du Sassandra et situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. On a aussi observé les tendances à la hausse du coefficient de tarissement. Ainsi, les réserves d'eau souterraines diminuaient au fur et à mesure que le déficit pluviométrique se prolonge. La vidange de ce cours d'eau est similaire à celle des bassins fluviaux en zone soudano-sahélienne qui se caractérisent par la régularité d'une rupture dans leur régime de

tarissement consécutive à la période de déficit pluviométrique observée depuis les décennies 1970 (Bricquet *et al.*, 1997). La gestion des aménagements existants et la conception des projets doivent donc désormais tenir compte de cette hydraulicité déficitaire dans le Bassin versant du Bandama.

Bibliographie

Bricquet J.P., Bamba F., Mahe G., Toure M. et Olivry J.C., 1997, *Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique*. PHI-V, 6, 83-95.

Brou Y. T., 2005. *Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire*. Mémoire de synthèse des activités scientifiques. Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 212p.

Goula B. T. A., Savane I., Konan B., Fadika V., Kouadio G. B., 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 7, 12p.

Ibiassi G., M., 2003. *Caractérisation hydro climatique du bassin versant de la cuvette congolaise*. Mémoire de maitrise de géographie physique, U.M.NG, Brazzaville, 61p.

Mahé G., et Olivry, J. C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6, 109-117.

Nicholson, S. E., 1979. Revised rainfall series for the West African subtropics. *Monthly Weather Review*, 107(5), 620-623.

Pettitt A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat*., (28), 126-135.

Pilabina S., 2015. *Analyse du fonctionnement hydroclimatique du bassin versant de la Kara*. Mémoire de master, Université de Lomé, Togo, 106p.

Savané I., Coulibaly K. M., Gionan P., 2003. Étude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Science et changement planétaires*, 37-42.

Servat E., Paturel J., Lubès-NieL H., Kouame B., Masson J. M., Travaglio M., Ouedraogo M. et Boyer J., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *IAHS*, 252, 323-337.

Vissin E. W., 2001. *Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger*. Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon, France, 53p.

Vissin E.W., Houssou C.S., Boko M., Houndenou C., 2004. Impact des fluctuations pluviométriques sur les écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Actes du XVIIe colloque de l'AIC*, Caen, France, 17, 385-388.

RISQUE D'INONDATION ET DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OTI AU TOGO (AFRIQUE DE L'OUEST)

KOUNGBANANE D.[1,2], TOTIN VODOUNON H.S.[3,4], AMOUSSOU E.[3,4]

1 Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Etudes Environnementales, Département de Géographie, Université de Lomé, Lomé, Togo (dambrekoungbanane@gmail.com)
2 Centre d'Excellence Africain sur les Changements Climatiques, la Biodiversité et Agriculture Durable (CEA-CCBAD), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire (dambrekoungbanane@gmail.com)
3 Laboratoire de Climatologie & Ethnoclimatologie Tropicales, Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Parakou, Bénin (sourouhenri@yahoo.fr; ajernest@yahoo.fr)
4 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin (ajernest@yahoo.fr)

Résumé : *Les pays de l'Afrique de l'Ouest dont le bassin versant de l'Oti au Togo présentent une sensibilité accrue aux situations extrêmes, marquée par des événements d'inondation récurrents avec des conséquences dramatiques sur les écosystèmes, les établissements humains et les systèmes socio-économiques. Cette étude vise à analyser le risque d'inondation et la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti au Togo. Ainsi, pour atteindre cet objectif, les données de précipitations journalières de neuf stations météorologiques sur la période 1961-2017 et des débits journaliers de l'Oti à Mango (1961-2017) ont permis d'analyser la variabilité pluvio-hydrologique porteuse de risques d'inondation. De même, les données issues des images satellitaires des années 1987, 2002 et 2017 sont utilisées pour montrer la dynamique de l'occupation du sol et son incidence sur le risque d'inondation. Les résultats obtenus indiquent que la période 1961-1970 correspond à une première période humide, suivie de la période sèche de 1971-2010 et une reprise des pluies maximales journalières de la période 2011-2017 avec pour conséquence le risque d'inondation. De même, les indices hydrométriques connaissent une importante variation des débits maximaux journaliers annuels à partir des années 1960 et une baisse du coefficient d'écoulement. La dynamique de l'occupation du sol montre une réduction des formations naturelles au profit des formations anthropisées augmentant la vulnérabilité.*

Mots clés : *risque d'inondation ; précipitations ; dynamique de l'occupation du sol ; bassin versant de l'Oti*

Summary: ***Risk of flooding and dynamics of land occupancy in the Oti watershed in Togo (West Africa).*** *West African countries including the Oti watershed in Togo are more sensitive to extreme situations, marked by recurring flood events with dramatic consequences on ecosystems, human settlements and systems socio-economic. This study aims to analyze the risk of flooding and the dynamics of land use in the Oti watershed in Togo. To reach this objective, daily precipitation data from nine meteorological stations over the period 1961-2017 and daily flows from the Oti river at Mango (1957-2017) enabled us to analyze hydroclimatic variability carrying risks of flood. Similarly, satellite data from the years 1987, 2002 and 2017 are used to show the dynamics of land use and its impact on the risk of flooding. The hydrometric indices experienced a large variation in annual maximum daily flows from the 1960s and a decrease in the flow coefficient. The dynamics of land use show a reduction in natural formations in favor of anthropized formations increasing vulnerability.*

Key words: *flood risk; rainfall; land cover dynamics; Oti catchment area*

Introduction

Le risque d'inondation constitue aujourd'hui l'un des risques naturels les plus fréquents et qui touche le plus grand nombre d'individus (Koumassi, 2014 ; Fujiki, 2017 ; Swiss Re, 2017). En Afrique de l'Ouest en général, et au Togo en particulier, le rythme de croissance de la population est élevé et implique une forte pression humaine sur les ressources naturelles. Cette forte croissance de la population entraîne une augmentation des besoins qui se manifeste par une forte pression exercée sur les ressources en eau, l'exploitation du bois d'œuvre, l'extension des terres pour l'agriculture et la construction des habitations. Ces pratiques entraînent la destruction de la végétation et accroissent la vulnérabilité de la population. En effet, dans de nombreux cas, les plaines d'inondation offrent d'excellentes opportunités techniques et économiques de gagner sa vie facilement (Amoussou, 2015). Le risque d'inondation est lié à l'aléa pluviométrique extrême (Tchotsoua *et al.*, 2007) auxquelles sont vulnérables les

populations, les systèmes écologiques et socioéconomiques (Komi, 2016). Les modifications affectant la végétation d'un espace donné ont une influence plus ou moins directe sur les précipitations et les écoulements de surface (Vissin, 2007). Dans le bassin versant de l'Oti au Togo, les caractéristiques du couvert végétal ont une influence sur le risque d'inondation. L'objectif de la présente recherche est de caractériser le risque d'inondation et la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti au Togo.

1. Présentation du secteur d'étude

Le bassin versant de l'Oti est situé dans le bassin du fleuve volta et draine une partie des pays transfrontaliers (Burkina-Faso, Bénin, Togo et Ghana). Au Togo, il couvre entièrement les Régions des Savanes et de la Kara, le 1/3 de la Région Centrale, à peine 1/5 de la Région des Plateaux et une petite portion de la Région Maritime sur une superficie de 26 700 km^2 soit environ 47,3% de la superficie du territoire national et 4,3 % de la superficie du bassin de la Volta qui fait 400 000 km^2. La partie du bassin située dans la Région des Savanes est intéressée par cette étude et est située entre 11°22' et 10°00'N et -0°3' et 0°50'E (Fig.1).

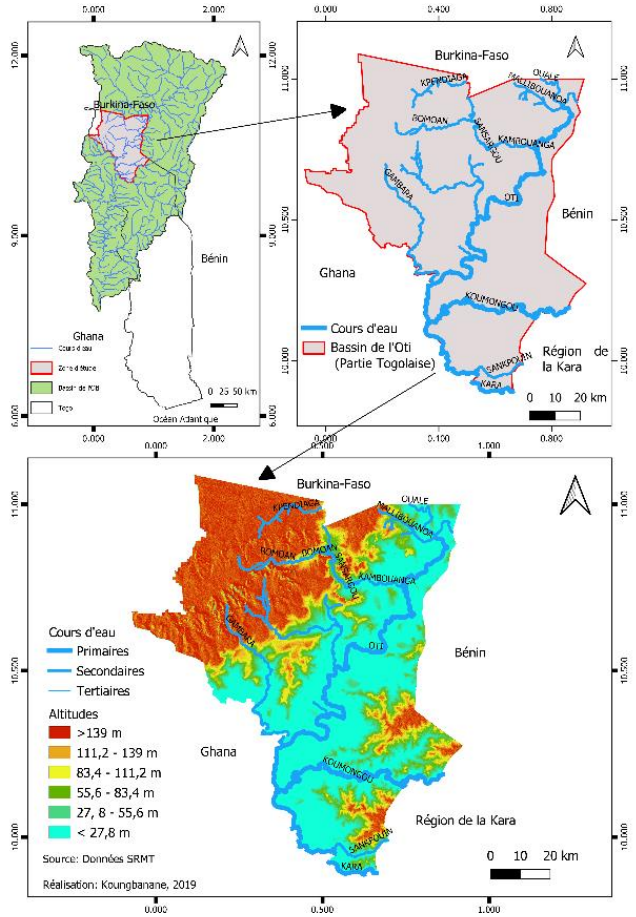


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant de l'Oti au Togo

Le bassin-versant de l'Oti fait partie intégrante du domaine du climat tropical de type soudanien où le déplacement du Front Intertropical (FIT) explique l'alternance de la saison pluvieuse et de la saison sèche.

2. Données et méthodes

Les données hydroclimatiques utilisées pour cette étude concernent les précipitations et les débits journaliers couvrant la période 1961-2017. Les relevés de pluie sont collectés sur neuf stations météorologiques (Barkoissi, Borgou, Dapaong, Guérrin-Kouka, Kanté, Mandouri,

Mango, Tankpamba, Toaga) de la Direction de la Météorologie Nationale à Lomé. Les débits de la station hydrométrique de Mango ont été obtenus à la Direction Générale de Ressources en eau, au Service de Système Intégré de l'Information sur l'Eau à Lomé (Togo).

Les données relatives à l'occupation du sol des années 1987, 2002 et 2017 obtenues après l'acquisition et le traitement des images satellitaires de type Landsat TM 1987, ETM+ 2002 et OLI 2017 de résolution 30 m ont été également utilisées. Les cartes d'occupation du sol issues de ces images ont permis d'apprécier l'état de l'évolution des unités paysagiques du secteur d'étude.

Les catégories SFI (Tab.1), ont permis de classer les valeurs maximales de débits journaliers en termes d'aléas d'inondation, pour les différents niveaux de risque (limité, modéré, significatif et critique) dans le bassin versant de l'Oti. Cette catégorisation a été possible grâce à une transposition de la classification de McKee *et al.* (1993) aux données journalières utilisées.

Tableau 1. Classification des valeurs de SFI, des catégories d'inondations et des niveaux de risques (Source : Extrait de Aghrab (2003) ; Mckee *et al.*, (1993) et Totin *et al.*, (2016))

Valeurs Seuils de SFI	**Catégories d'inondation**	**Seuils de risques**
2,0 et plus	Catastrophique	Critique
1,5-1,99	Grave	Significatif
1-1,49	Négligeable	Modéré
0-0,99	Sans effet	Limité

Le coefficient d'écoulement permet d'analyser la variation de l'écoulement dans le bassin et il évolue suivant les variations climatiques. Noté (C), il est calculé grâce la formule suivante : $C = \frac{Q}{P} \times 100$. Il correspond au rapport entre la lame ruisselée (Q) et la lame précipitée (P) annuelle.

3. Résultats et discussion

3.1. Variabilité hydro-pluviométrique et risques d'inondation

L'étude de la variabilité interannuelle des pluies maximales journalières à travers les indices pluviométriques de la moyenne des neuf (09) stations (Fig.2) indique que la période d'étude est marquée par trois phases pluviométriques. La première phase (1961-1970) correspond à une première période humide. Les anomalies positives sont fréquemment observées au cours de cette séquence et sont par exemple de 2,85 en 1964 marquant l'année la plus pluvieuse de la période d'étude. La deuxième phase couvre la période allant de 1971 à 2010 caractérisée par la baisse interannuelle des pluies maximales journalières (Kola *et al.*, 2019). La période 2011-2017 est marquée par une augmentation des pluies journalières extrêmes. Une reprise des précipitations semble s'amorcer au cours de cette période (Totin *et al.*, 2019).

L'examen de la figure 2 permet aussi de dire que tout comme les précipitations, les indices hydrométriques connaissent de fortes valeurs de débits maximaux journaliers annuels dans les années 1960. Ce qui veut dire que l'évolution dans la série des débits maximaux journaliers annuels est en lien avec les pluies journalières extrêmes. Les années isolées de fortes pluies de la période 1971-2010 ne se traduisent pas par de grandes crues et la reprise des précipitations dans les années 2010 ne se répercute que très tardivement et modérément sur les débits des crues.

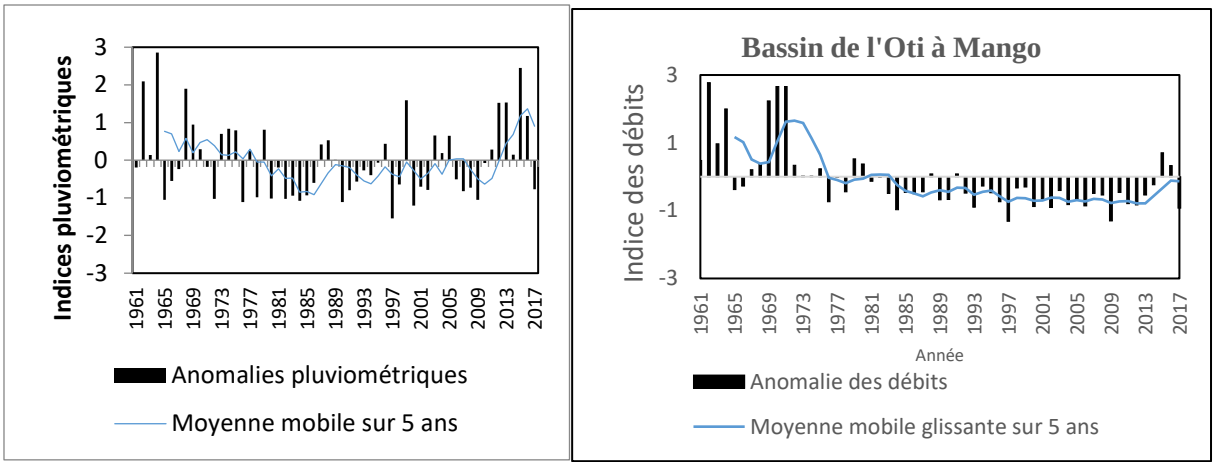


Figure 2. Indices standardisés des précipitations maximales journalières et des débits maximaux journaliers annuels dans le bassin versant de l'Oti de 1961 à 2017

3.2. Seuils hydrométriques d'aléas

Le tableau 2 présente les seuils hydrométriques des niveaux de risques d'inondation dans le bassin versant de l'Oti.

Les seuils hydrométriques des risques d'inondation sont de 1700 m^3/s, pour le risque critique, 1418,75 m^3/s pour le risque significatif, 1223,12 m^3/s pour le risque modéré et 771 m^3/s pour le risque limité. Les niveaux de risque critique et significatif sont qualifiés inacceptables et sont plus représentatifs dans le bassin versant. Les deux autres niveaux de risques d'inondation (modéré et limité) sont qualifiés d'acceptables.

Tableau 2. Seuils hydrométriques des niveaux de risques d'inondation dans le bassin de l'Oti

Débits seuils d'aléa d'inondation à Mango	Niveaux de risques d'inondation
1700 m^3/s	Critique
1418,75 m^3/s	Significatif
1223,12 m^3/s	Modéré
771 m^3/s	Limité

3.3. Analyse du coefficient d'écoulement

La figure 3 indique une variation du coefficient d'écoulement sur la période de 1961-2017 dans le bassin versant de l'Oti au Togo. Ce coefficient varie de 1,29 % à 0,002 % et a connu une baisse avec la valeur de la pente qui est de -0,01. La diminution du coefficient d'écoulement montre que les changements dans l'occupation des sols n'ont pas entraîné l'augmentation du ruissellement et c'est l'occupation des berges de l'Oti qui augmente le risque d'inondation.

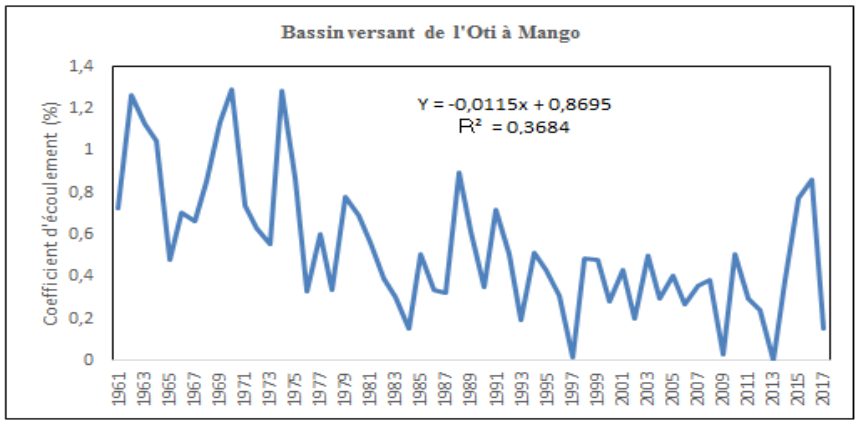


Figure 3. Variation du coefficient d'écoulement dans le bassin de l'Oti à Mango

3.4. Dynamique des unités d'occupation du sol entre 1987, 2002 et 2017

Il ressort de l'analyse de la figure 4 une réduction des formations naturelles au profit des formations anthropiques. Cela exprime la forte pression humaine exercée sur les écosystèmes et en particulier sur les formations végétales (Kankpénandja, 2016). En effet, les forêts claires, les forêts galeries, la savane arborée et la savane arbustive ont connu une régression au profit de la savane herbeuse, des champs et jachères, du bâti et des plans d'eau. Cette évolution est susceptible d'amplifier le risque d'inondation dans le secteur d'étude.

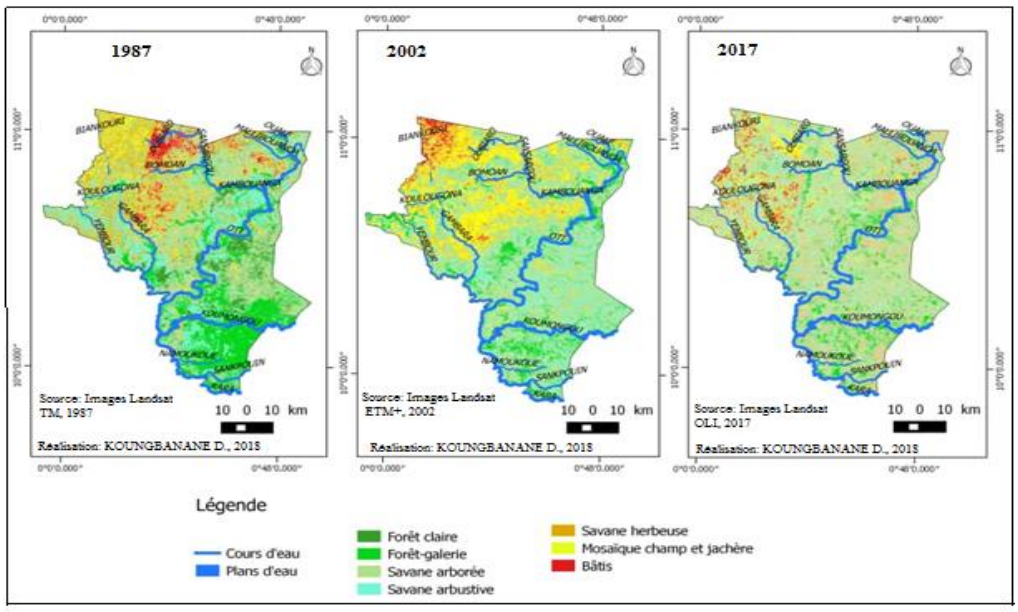


Figure 4. Etat d'occupation du sol de 1987, 2002 et 2017 dans le bassin versant de l'Oti

La figure 5 montre les écarts des changements observés entre les différentes unités d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti au Togo. De 1987 à 2002, il est observé une régression de 2,65 %, 0,87 %, 10,85 % et 0,41 % respectivement pour les forêts claires, les forêts galeries, la savane arborée et la savane arbustive. De même, entre 2002 et 2017, ces différentes unités passent respectivement à une régression de 0,70 %, 0,62 %, 5,46 % et 2,19 %. Par ailleurs, la savane herbeuse, les mosaïques de champs et jachères, les bâtis (agglomérations) ont connu respectivement une augmentation de 5,74 %, 5,73 %, 3,31 % au cours de la période 1987 à 2002. De 2002 à 2017, cette augmentation est dans cet ordre, passée à 6,24 %, 0,27 %, et 2,47 %.

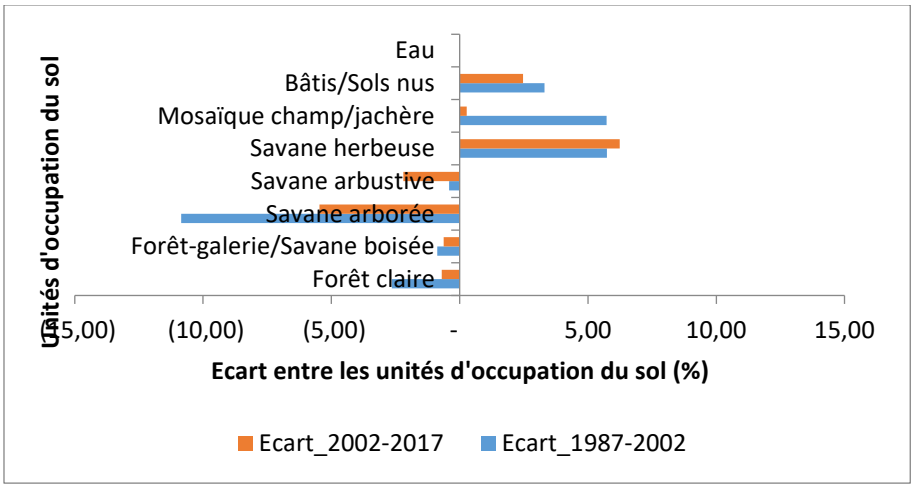


Figure 5. Dynamique des unités d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti

Conclusion

L'étude du risque d'inondation et la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti au Togo a permis de mettre en évidence les facteurs déterminants dans la survenue des inondations. L'analyse de la variabilité pluvio-hydrologique montre que la période 1960-1970 est pluviométriquement plus humide, suivie de la période sèche de 1971-2010 et une reprise des précipitations de 2011-2017. La variabilité des hauteurs de crues est relativement faible presque chaque année en dehors des crues des années 1960. De plus, le coefficient d'écoulement a connu une diminution sur la période d'étude. Ce qui veut dire que les changements d'occupation du sol n'ont pas eu d'effet d'augmenter le ruissellement et c'est l'occupation des berges de l'Oti qui augmente la vulnérabilité et par conséquent le risque d'inondation.

Bibliographie

Amoussou E., 2015. Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. Rapport publié par la Fondation Maison des Sciences de l'Homme (FMSH), Paris, France. URL : http://www.fmsh.fr - FMSH-WP-2014-90.

Fujiki K., 2017. *Etude prospective des impacts sociaux d'une inondation majeure en région Ile-de-France. Disparités socio-spatiales dans la prise en charge des populations franciliennes en situation de crise et post-crise : une analyse cartographiée et quantifiée des besoins des ménages, de l'évacuation à la reconstruction*. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France, 485p.

Kankpenandja L., 2016. *Morphogénèse et gestion des terres dans les sous-bassins versants de l'Oti au Togo*. Thèse de doctorat en Géographie physique, Université de Lomé, Togo, 345p.

Kola E., Yabi I., et Pilabina S., 2019. Changement climatique, mutation de la production agricole et perceptions paysannes dans la zone Togolaise de production du café et du cacao (Afrique de l'Ouest). *Actes du XXXII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Thessaloniki, Grèce, Mai 2019, 89-94.

Koumassi D. H., 2014. *Risques hydroclimatiques et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin-versant de la Sota*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 244p.

Komi K., 2016. *Flood risk assessment in poorly gauged river basins : a case study of the Oti river basin, Togo, west Africa*. Dissertation, PHD, University of Abomey Calavi, Benin, 161p.

Swiss Re, 2017. Catastrophes naturelles et techniques en 2016: une année de dommages tous azimuts. Sigma, N°2/2017, 50p.

Tchotsoua M., Fotsing J-M. et Moussa A., 2007. « Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun) ». *Actes des JSIRAUF*. Hanoï, Vietnam, 1-9.

Totin V. S. H., Dotsévi D. A., Amoussou E., Yabi I., Houndénou C., 2019. Variabilité et risques agro-climatiques dans le Sud-Ouest de la région des Plateaux au Togo. In XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Thessaloniki, Grèce, Mai 2019, 277-282.

Totin V. S. H., Amoussou E., Odoulami L., Boko M., Blivi B. A., 2016. Seuils pluviométriques des niveaux de risque d'inondation dans le bassin de l'Ouémé au Bénin (Afrique de l'Ouest). In XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne – Besançon, 369-374.

Vissin E.W., 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger.* Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280p.

SIMULATIONS NUMERIQUES MICRO-ECHELLES ET MESURES DE TERRAIN DU CLIMAT LORS D'UN GEL DE PRINTEMPS SUR UN VIGNOBLE EQUIPE DE TOURS ANTIGELS

LE CAP C.[1,2,3], CARLIER J.[2], QUENOL H.[3], HEITZ D.[2], BUISSON E.[1]

1 Weather Measures, Clermont-Ferrand, France (clara.le-cap@inrae.fr)
2 INRAE, UR OPAALE, Rennes, France
3 CNRS, UMR 6554 LETG, Université Rennes 2, Rennes, France

Résumé : *Les gelées printanières sont particulièrement dévastatrices pour les exploitations viticoles. Un des moyens de protéger les vignobles est le recours aux tours antigel. Toutefois, des lacunes persistent aujourd'hui sur l'action de la tour sur son environnement et sur l'implantation et l'asservissement de leur fonctionnement en fonction de la prévision locale du risque gélif. Pour faire face à cet enjeu, la CUMA des vignobles de Quincy (France) s'est associée à différents partenaires dans le cadre du projet SICTAG. Ce projet a pour objectif d'initier une démarche visant l'automatisation de la gestion d'un parc de tours antigel. Des réseaux de capteurs seront implantés dans le vignoble et des simulations numériques (WRF et OpenFOAM) seront réalisées pour caractériser le fonctionnement des tours et pour concevoir des modèles prédictifs du risque gélif à la micro-échelle du terroir. Il s'agit ici d'asservir le fonctionnement individuel des tours à des mesures de terrain pour prémunir la parcelle contre le risque de gel, et ceci de manière efficiente et à moindre coût énergétique.*

Mots clés : *gel ; tour antigel ; vignoble de Quincy ; réseau de capteurs sans fil ; simulations numériques*

Summary: ***Microscale numerical simulations and field measurements of the climate during a spring frost event in a vineyard equipped with anti-freeze towers.*** *Spring frosts are especially devastating for vine crops. One method used to protect vineyard is to resort to wind machines. However, some weaknesses currently still remain on the effect of the machine on its environment and the implementation and servitude of its operation according to frost local forecast. In order to face this concern, the agricultural cooperative of Quincy has associated with partners to develop the SICTAG Project. The aim of this project is to initiate an approach to automatize the management of the wind machines farm. Wireless sensors networks will be implemented in the vineyard and numerical simulations (WRF and OpenFOAM) will be run to characterize and assess the wind machine's operation, alone or in synergy, and to design predictive models of frost occurrence at local micro scale. The point here is to control the individual operation of the wind machines to field measurements to protect the plot against the frost, in an efficient way and at reduced energy costs.*

Key words: *frost; wind machine; Quincy vineyard; wireless sensors networks; numerical simulations*

Introduction

Dans le secteur agricole, le gel de printemps est responsable de pertes économiques importantes. Ces gelées printanières récurrentes, même pour différents scénarios du réchauffement climatique, sont hostiles au développement biologique et détruisent bon nombre de bourgeons, affectant ainsi la future récolte. Ces gelées surviennent en effet à un stade où la plante est en éveil, et donc vulnérable, ce qui cause la destruction partielle ou totale de ses bourgeons, entraînant une perte importante de production et de ressources économiques (Fraser *et al*.,2009).

Pour lutter contre ce phénomène climatique naturel, différentes méthodes ont été développées et peuvent être réparties en deux catégories (Kalma *et al*., 1992 ; Snyder and de Melo-Abreu, 2005) : (1) des moyens de lutte passifs (choix de variétés plus robustes, orientation de la parcelle, traitement chimique, travail du sol, …) ; (2) des moyens de lutte actifs (aspersion, chauffage, tour antigel, hélicoptère, bougies, ...). Cette terminologie est similaire aux contrôles passifs et actifs du domaine de la commande des écoulements de fluide. Dans le cas d'un parc de tour antigel, il s'agit d'un contrôle actif en boucle fermée. La tour antigel est un actionneur dont le fonctionnement est asservi à des données (mesures de terrain et prévisions météorologiques) ou à la décision du responsable du déclanchement des moyens de lutte, de

sorte à maintenir hors gel la couche d'air dans laquelle baigne le vignoble, à moindre coût environnemental (dépense énergétique, pollution, nuisance sonore).

Dans le vignoble de Quincy, les viticulteurs se sont mobilisés et ont investi dans un parc de tours antigel comptant aujourd'hui 55 unités et couvrant la majorité de leur culture. Le projet SICTAG pour « *Système Innovant d'aide à la décision Connectée et de gestion efficiente en temps réel des Tours Antigel du Centre-Val de Loi*re » est un Projet Européen Innovant (PEI) dont la finalité est de donner des moyens aux agriculteurs d'automatiser le fonctionnement des tours antigel en synergie de manière efficiente (Méré *et al*., 2020). Plusieurs sujets ont été identifiés et seront abordés dans le cadre de ce projet : **(1) la sectorisation et la prévision du risque gélif à court terme pour déclencher la lutte à bon escient**. Pour aborder ce sujet, nous nous appuierons sur un réseau de capteurs sans fil installé sur le vignoble et sur des simulations numériques type downscaling météo de la méso-échelle (WRF) à la micro-échelle (OpenFOAM) ; **(2) le fonctionnement des tours seules et en synergie.** Pour des configurations topographiques différentes et des situations climatiques variées, nous caractériserons l'écoulement généré par la tour grâce à un réseau de capteurs dédiés. Ces mesures permettront également d'identifier un modèle décrivant l'effet de la tour sur son environnement. Ce modèle sera implémenté dans le solveur OpenFOAM pour extrapoler la performance des tours en dehors de son fonctionnement nominal et de la situation topographique et climatique propre au terroir de Quincy ; **(3) l'automatisation du parc**. Nous utiliserons le solveur OpenFOAM à la micro-échelle du terroir complétée par la modélisation du parc de tours antigel pour évaluer l'efficacité de différentes implantations de tours et de capteurs de monitoring et de différentes stratégies de pilotage pour le rejet des effets néfastes des évènements gélifs.

Dans ce papier, la section 1 et la section 2 décrivent les différents types de gel de printemps, et le principe de fonctionnement d'une tour antigel. La section 3 présente le site d'expérimentation (le terroir de Quincy). Les sections 4 et 5 détaillent les réseaux de capteurs qui seront installés sur ce site et les simulations numériques qui seront effectuées. La section 6 donne un aperçu des résultats et de l'analyse qui pourront être présentés, principalement ici sur la caractérisation de l'écoulement généré par les tours.

1. Gel de printemps

On distingue principalement deux types de gels différents (Kalma *et al*., 1992) : (1) La gelée advective, ou gelée noire, correspond à une masse importante d'air froid ($T<0°C$) venue du Nord transportée par des vents modérés à forts. Elle sévit plus particulièrement sur les plateaux situés aux hautes altitudes et il n'existe à ce jour aucun moyen de lutte efficace pour la contrer ; (2) La gelée radiative, ou gelée blanche, est un phénomène nocturne qui apparaît sous des conditions atmosphériques calmes et claires (vent nul à faible et ciel dégagé). La nuit, le sol se refroidit en restituant la chaleur de la journée par réémission du rayonnement solaire, plus ou moins fortement selon son émissivité et les couches d'air proches du sol se refroidissent par conduction. Un gradient de température positif communément appelé couche d'inversion se met ainsi en place. De plus, si le ciel est dégagé, aucun nuage ne retient le rayonnement et celui-ci est alors dispersé dans les plus hautes couches de l'atmosphère. Le gel apparaît lorsque la température de l'air passe en dessous de la température de rosée. L'humidité de l'air se condense alors en glace et recouvre les plantes, d'où son nom de gelée blanche. A plus petite échelle, le changement d'état de la matière est accompagné d'une variation de l'enthalpie par conversion de la chaleur latente contenue dans l'humidité en chaleur sensible. La tour antigel a été pensée pour cette situation climatique, pour laquelle un brassage de l'air sur une hauteur suffisante permet de casser cette stratification. On peut simplement modéliser la formation de gel lors d'une gelée radiative en effectuant le bilan des transferts d'énergie (en $W.m^2$) à la surface sol/atmosphère (Snyder et de Melo Abreu, 2005)

$$R_{Sd} + R_{Su} + R_{Ld} + R_{Lu} = G + H + LE$$

R_{Sd} et R_{Su} les flux d'énergie par radiation de courtes longueurs d'onde reçues (le soleil la journée, signe positif) et émises (le jour et la nuit, signe négatif) ;

R_{Ld} et R_{Lu} les flux d'énergie par radiation de grandes longueurs d'onde reçues et émises ;

G la densité de flux de chaleur dans le sol ;

H la densité de flux de chaleur sensible ;

L la chaleur latente de vaporisation d'eau ;

E la densité de flux des molécules contenues dans l'air.

Durant une nuit de gel, le bilan radiatif (à gauche) se traduit par un flux d'énergie qui s'échappe du sol (G), une baisse de la température (H) et un dépôt de gel par condensation de l'humidité de l'air (LE). On peut établir un bilan équivalent pour l'interaction plante/atmosphère. Le passage d'un état de la matière où les molécules ont une certaine liberté dans leurs liaisons (ici le gaz) à un état plus contraint (la glace) est exothermique, le processus libère alors de la chaleur dans l'environnement proche de la matière. Cette réaction est toutefois trop éphémère et légère pour considérer un réchauffement pérenne de la plante.

2. Fonctionnement de la tour antigel

Le modèle classique d'une tour antigel est un ventilateur axial situé au sommet d'un mât (Yazdanpanah, 2011 ; Hu *et al*., 2018). Le ventilateur est généralement constitué d'un moyeu quasi-horizontal, inclinable de quelques degrés vers le bas, pour orienter le jet de sorte à ce qu'il balaye les cultures d'un flux d'air. Le moyeu est équipé de deux pâles et est en rotation autour du mât, pour augmenter la surface couverte. Typiquement, la hauteur du mât est de 10m, l'envergure des pâles est de 5-6m et tourne à une fréquence d'environ 500rpm, l'inclinaison du moyeu est de -7 degré et la période de rotation est de quelques minutes (Fraser *et al*., 2009). Les ventilateurs généralement utilisés ont une poussée telle qu'ils ont une portée d'environ 100m, permettant ainsi de couvrir quelques hectares de terrain. A noter que depuis peu sont commercialisées des tours mobiles moins hautes et équipées d'un ventilateur axial à 5 pâles de 2m d'envergure.

Le principe de fonctionnement d'une tour antigel repose en premier lieu sur la présence d'une stratification thermique qui s'établie lors de conditions climatiques conduisant à une inversion de température. La tour antigel est particulièrement efficace pour une gelée radiative avec à minima entre 1.5°C et 2°C d'inversion thermique entre 1.5 et 15m de hauteur (Kalma *et al.*, 1992) et par vent faible avec un maximum à 2.5m. s^{-1}, au-delà un risque d'endommagement des pâles est présent (Snyder et de Melo Abreu, 2005). Le ventilateur balaye la parcelle cultivée avec un air chaud, de quelques degrés au-dessus de 0, prélevé en altitude. Cet air chaud se mélange rapidement avec l'air froid (quelques degrés au-dessous de 0) au niveau du sol, du fait de la turbulence générée par le jet et de son interaction avec le sol. La stratification thermique est momentanément supprimée L'air présente alors une température relativement homogène et légèrement positive. Le risque gélif est écarté si la période de rotation du ventilateur est plus petite que le temps caractéristique de la restratification. Il est à noter que plusieurs tours sont généralement nécessaires pour protéger des cultures parfois étendues, et fonctionnent en « synergie » pour accroître l'efficacité de ce moyen de lutte (Snyder et de Melo Abreu, 2005). Aussi, les tours peuvent être associées à un système de chauffage positionné au pied du mât. L'air chaud produit monte par gravité et est capté à l'aspiration du ventilateur axial pour participer à l'élévation de température au niveau de la vigne.

3. Site d'expérimentation

Le vignoble de Quincy s'étend sur une zone délimitée de 700 hectares dans la région viticole du Centre Loire. Il est bordé par de grandes forêts situées au nord et à l'ouest, et la rivière du Cher à l'est. Il repose sur des terroirs de graves sableuses et/ou argileuses déposées en terrasses alluviales anciennes, perchées sur des coteaux de calcaire lacustre. Ce terroir constitue un plateau qui s'incline vers l'est en pente douce vers le Cher et offre ainsi une ouverture aux vents de Nord-Est. Ce plateau est entaillé de petits vallons qui constituent autant d'entrées froides.

Le vignoble de Quincy possède 23 tours stationnaires non chauffées et 32 tours stationnaires chauffées au pied du mât par un brûleur. La figure 1 illustre une parcelle de vigne dans un vallon du vignoble de Quincy, équipée de tours antigel fonctionnant en synergie. La tour chauffée (à droite sur la photo) mesure 10.5m de hauteur et l'envergure de ses pâles est de 5.4m. Les tours non chauffées qu'on aperçoit au loin sur la photo font environ 10m de hauteur et ont une envergure de pâle de 6.04m.

Figure 1. Photo des tours antigel implantées dans le vignoble de Quincy

4. Réseaux de capteurs

Des campagnes de mesures seront menées pendant la durée du projet (2020-2022), principalement, au printemps et à l'automne et sur l'ensemble du territoire. Elles permettront notamment d'acquérir des données locales sur la température, l'hygrométrie, et la vitesse du vent et seront menées à deux échelles de temps différentes, l'une liée au temps caractéristique météorologique à l'échelle du vignoble, l'autre liée au temps caractéristique de la tour antigel.

La mesure de la météorologie locale sera effectuée à l'aide d'un réseau de capteurs sans fil spécifique destiné à la prévision du risque gélif. Il sera constitué de plusieurs stations météo et de capteurs reliés à une application afin de suivre l'évolution de la météo en temps réel. La fréquence d'acquisition sera de l'ordre du 1/4h et le monitoring sera maintenu durant la saison, voire s'étendra sur la durée totale du projet.

L'aéraulique générée par les différentes tours antigel sera mesurée via un deuxième réseau de capteurs dédiés. Nous souhaitons obtenir des cartographies de température de l'air et de quantités cinétiques de l'écoulement (vitesse et agitation turbulente) autour des tours. Ces mesures permettront d'analyser le comportement du jet dans différentes situations topographiques et météorologiques. Pour ce faire, une quarantaine de points de mesure seront distribués autour de la tour à caractériser. En chaque point de mesure, un mât de 1.5m supportera un anémomètre et un thermomètre en son sommet (au-dessus de la vigne), et un second thermomètre et un hygromètre en son milieu (à mi-hauteur de la vigne). Le temps de réponse (et le pas de temps d'acquisition) de l'anémomètre et des deux thermomètres doit être inférieur à la seconde pour estimer la forme (probablement en spirale) de l'axe du jet généré par la tour et le temps de restratification de l'air après le passage du jet et après l'arrêt de tour. Ces mesures seront complétées par la mesure de profils de stratification thermique sur une hauteur de 20m, avec idéalement le profil de couche limite en vitesse.

5. Simulations numériques

Des simulations aux micro-échelles météorologiques seront réalisées avec prise en compte de simulations méso-échelles (WRF et Arome) et des mesures de terrain issues principalement d'un réseau de capteurs sans fil décrit section 4 pour guider et alimenter les conditions initiales et aux bords. Ces simulations permettront : **(1)** de cartographier le risque de gel sur le territoire pour différentes situations météorologiques ; **(2)** d'optimiser la couverture du réseau de stations météo pour une meilleure prévision du risque gélif ; **(3)** de proposer une implantation à priori du parc de tours fixes et de le compléter par des tours mobiles.

Le modèle ARW-WRF a déjà été évalué dans sa capacité à reproduire les variations spatiales et temporelles de procédés atmosphériques avec une résolution de 500m dans des vignobles sud-africains (Soltanzadeh *et al*., 2017). Des simulations de l'écoulement généré par les tours antigel seront réalisées en s'appuyant sur une modélisation de type Blade Element Momentum BEM (Lanzafame *et al.*, 2007) à valider par comparaison avec les mesures de terrain et des mesures sur maquettes à échelle réduite en environnement maîtrisé. Plusieurs simulations sont nécessaires à différentes échelles de temps (relative à la pâle, à la rotation et à la production de gel). Ces simulations permettront d'étendre la compréhension du fonctionnement des tours au-delà de leur mode de fonctionnement nominal et pour des situations topographiques et climatiques différentes de celles de Quincy. A terme, en appliquant un downscaling méso-échelle WRF vers micro échelle OpenFOAM, les deux modèles seront couplés afin de simuler le fonctionnement des tours dans l'environnement du vignoble et sous climat local, permettant de modéliser au mieux la prédiction du risque gélif à l'échelle du terroir. La technique d'assimilation de données permet de préciser les conditions initiales et aux limites dans le solveur micro-échelle (Defforge *et al*., 2019). Toutefois, il n'est à ce jour pas prévu dans le projet d'appliquer cette technique pour la restitution de l'écoulement.

6. Quelques éléments d'analyse

L'efficacité de la tour varie en fonction de l'intensité de l'inversion thermique et de la topographie du terrain. On peut ainsi mettre en évidence l'influence de la stratification en mesurant l'effet de la tour sur une même parcelle pour deux nuits de gel à l'intensité différente. L'influence de la topographie sur le rendement de la tour peut être quant à elle caractérisée en menant des mesures durant une même nuit sur deux parcelles de configurations géographiques différentes. On peut ainsi mesurer l'influence horizontale et verticale de la tour antigel sur le réchauffement de l'air en traçant le profil de la température suivant l'altitude (Fig.2) ou en traçant les isothermes à proximité de la tour (Fig.3). Par ailleurs, la vitesse du flux d'air généré par la tour dépend de multiples facteurs comme la conception des pâles, la vitesse de rotation, la puissance du rotor, le temps de révolution et les conditions environnantes (Beyà-Marshall *et al*., 2019 ; Yongguang *et al*., 2016). De plus, la stratification nocturne joue un rôle important dans l'écoulement, impliquant une variation de la densité de l'air suivant sa température et son hygrométrie en fonction l'altitude. Le vent extérieur peut lui aussi freiner ou augmenter la portée du jet suivant sa direction (Ribeiro *et al*., 2006). La figure 3 met ainsi en évidence l'effet du vent sur la portée du jet à travers la parcelle. On remarque la forme elliptique des isothermes qui traduit l'étirement de l'action de la tour sous celle du vent.

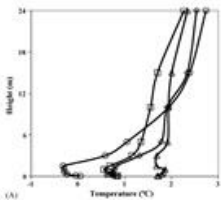


Figure 2. Profil de température mesuré à 30m de la tour avant opération (○) et 1min (◇), 3min (□) et 5min (△) après démarrage (Ribeiro *et al*., 2006)

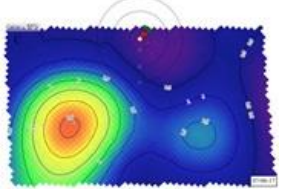


Figure 3. Isothermes de température à proximité de la tour (Beyà-Marshall *et al*., 2019)

Conclusion

Pour faire front contre les dégâts du gel, les viticulteurs de Quincy ont, au fil des années, modifiés leurs pratiques. Ils se sont unis pour équiper leur terroir d'un parc conséquent de tours antigel. Il se sont également mobilisés pour associer différents partenaires (viticulteurs, entreprises innovantes et centre de recherche) dans le projet SICTAG, avec pour objectif de comprendre et optimiser ce moyen de lutte. Ainsi, durant ce projet, des mesures de terrain et des simulations numériques de différentes envergures mais complémentaires seront réalisées. Elles doivent notamment permettre de répondre aux questions en suspens et aux attentes des viticulteurs comme la caractérisation du fonctionnement d'une tour antigel, la prédiction et la cartographie à l'échelle du terroir du risque de gel, la capacité du parc de tours à rejeter le risque gélif, en travaillant seules et en synergie, et la mise en place de l'automatisation du parc.

Bibliographie

Beyá-Marshall V., Herrera J., Santibáñez F., & Fichet T., 2019. Microclimate modification under the effect of stationary and portable wind machines. *Agricultural and forest meteorology*, 269, 351-363.

Defforge C. L., Carissimo B., Bocquet M., Bresson R., & Armand P., 2019. Improving CFD atmospheric simulations at local scale for wind resource assessment using the iterative ensemble Kalman smoother. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 243-257.

Fraser H., Silngerland K., Ker K., Fisher H., & Brewster R., 2008. Wind machines for minimizing cold injury. InfoSheet Ontario Ministry of Agriculture. Food and Rural Affairs.

Hu Y., Asante E. A., Lu Y., Mahmood A., Buttar N. A., & Yuan S., 2018. Review of air disturbance technology for plant frost protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 21-28.

Kalma J.D., Laughlin G.P., Caprio J.M., & Hamer P. J. C., 1992. The Bioclimatology of Frost: Its Occurrence, Impact and Protection, volume 2. Springer Berlin Heidelberg.

Lanzafame R., & Messina M., 2007. Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory. *Renewable energy*, 32(14), 2291-2305.

Méré J.F., Buisson E., Carlier J., Delannoue G., Mesnil P.C., Rabin C., Guérin L. & Lepennetier A., 2020. SICTAG'Mag.

Ribeiro A.C., De Melo-Abreu J.P., & Snyder R.L., 2006. Apple orchard frost protection with wind machine operation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4), 71-81.

Snyder R. L. & Paulo de Melo-Abreu J., 2005. Frost protection: fundamentals, practice and economics. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Soltanzadeh I., Bonnardot V., Sturman A., Quénol H., & Zawar-Reza P., 2017. Assessment of the ARW-WRF model over complex terrain: the case of the Stellenbosch Wine of Origin district of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1407-1427.

Yazdanpanah H., & Stigter C. J., 2011. Selective inverted sink efficiency for spring frost protection in almond orchards northwest of Isfahan, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1-2), 27-35.

Yongguang H., Ping L., Amoah A. E., Wenye W., & Pingping L., 2016. Control system of a performance test-bed for frost protection wind machines. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(6), 36-43.

OBSERVATOIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR L'AGRICULTURE : RESULTATS PRELIMINAIRES EN BRETAGNE

LIGNEAU L.[1], TILLY S.[2,1], BARAER F.[3], DUBREUIL V.[2], BONNARDOT V.[2]

1 Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Rennes, France (laurence.ligneau@bretagne.chambagri.fr)
2 LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, Rennes, France (valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr ; sylvain.tilly.22@outlook.fr ; vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)
3 Météo-France, Rennes, France (franck.baraer@meteo.fr)

Résumé : *Dans la continuité des recherches sur le changement climatique et ses impacts en Bretagne, la Chambre d'Agriculture de Bretagne a mis en place un observatoire régional sur l'agriculture et le changement climatique selon la méthode nationale « ORACLE ». Une analyse régionale fondée sur des observations climatiques et agricoles a été entreprise pour identifier la manifestation du changement climatique sur diverses productions agricoles. Les données climatiques de 5 stations représentatives des sous-régions agricoles ont été analysées sur la période 1960-2018 et des indices agro climatiques pour différentes cultures ont été calculés. La démarche rétrospective d'ORACLE est complétée par une démarche prospective avec le calcul des indices agro climatiques à partir de projections issues du portail DRIAS afin de soutenir les réflexions sur l'adaptation du monde agricole à l'évolution du climat breton. Les exemples pour le blé et le maïs sont donnés.*

Mots clés : *changement climatique ; agriculture ; Bretagne*

Summary: ***Climate change observatory for agriculture: preliminary results in Brittany.*** *In the continuity of researches on climate change and its impacts in Brittany, the Chamber of Agriculture of Brittany set up a regional observatory on agriculture and climate change according to the national "ORACLE" framework. A regional analysis based on climatic and agricultural observations was undertaken with the aim of identifying the impacts of climate change on various agricultural productions. Climatic data from 5 stations representative of agricultural sub-regions were analysed and agro climatic indices for different crops were calculated over the 1960-2018 period to facilitate awareness of climate change-related issues for agriculture. A prospective approach with the calculation of agro climatic indices based on projections from the DRIAS portal was also undertaken in order to support reflections on the adaptation of the agricultural sector to climate change in Brittany. Examples are given for wheat and maize.*

Key words*: climate change; agriculture; Brittany*

Introduction

Les effets du changement climatique sur l'agriculture sont perceptibles en Bretagne depuis plusieurs décennies (Mérot *et al.*, 2012) ; avec notamment une recrudescence des accidents climatiques comme les sécheresses (Dubreuil *et al.*, 2012) ou encore des décalages et raccourcissements des cycles physiologiques ou des impacts sur les rendements des différentes cultures (Dubreuil *et al*., 2019). Ces effets déjà avérés ont besoin d'être précisés notamment sur les productions à fort enjeu en Bretagne comme le blé et le maïs, d'être modélisés pour évaluer les évolutions potentielles jusqu'en 2100 afin d'anticiper sur les solutions d'adaptation à mettre en œuvre. Ces solutions doivent cependant être déployées au cas par cas, en fonction des systèmes agricoles, du contexte climatique local et de la multitude de facteurs pouvant conditionner la culture. C'est dans ce cadre que la Chambre d'Agriculture de Bretagne a mis en place un observatoire régional sur l'agriculture et le changement climatique selon la méthode nationale « ORACLE » à l'image de ce qui a déjà été fait par exemple en Pays de la Loire (Oracle collectif, 2018). La démarche rétrospective d'ORACLE est ici complétée par une démarche prospective en utilisant les données de changement climatique afin de soutenir les réflexions sur l'adaptation du monde agricole à l'évolution du climat à l'échelle régionale. Le travail présenté ici est extrait de résultats préliminaires pour la Bretagne (Tilly, 2019) en ciblant sur deux cultures d'importance majeure pour l'élevage de la région : le blé et le maïs.

1. Site, données et méthodes

Des données climatiques journalières issues de cinq stations météorologiques du réseau Météo-France (Fig.1) et représentatives des nuances climatiques régionales de la Bretagne, ont été utilisées pour calculer des indices agroclimatiques sur la période 1960-2018. Les projections climatiques issues du modèle CNRM-Aladin et extraites du portail DRIAS (http://www.drias-climat.fr/) ont été utilisées pour évaluer l'évolution de ces indices à l'horizon 2100 sous les conditions de scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Moss *et al*., 2010). Le biais du modèle (différence moyenne entre les indices calculés avec les données observées et ceux calculés avec les données modélisées sur la période de référence 1960-2005) a été appliqué sur les données futures pour « gommer » la sous-estimation thermique du modèle. Les résultats sont commentés en terme de tendances plutôt qu'en valeurs brutes.

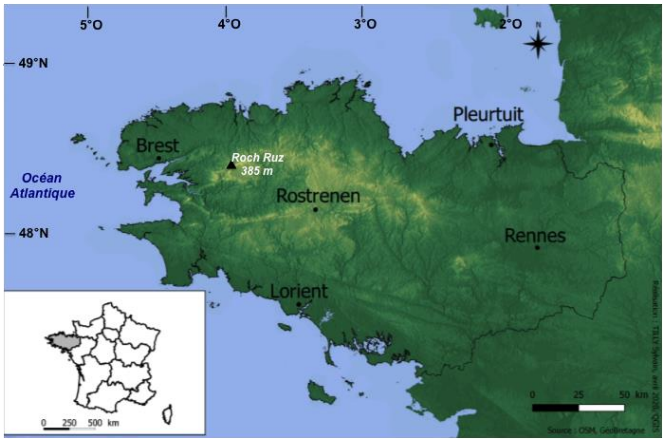


Figure 1. Localisation de la région d'étude (Région Bretagne dans le nord-ouest de la France) et des 5 stations météorologiques : Brest-Guipavas (99 m), Rostrenen (250 m), Pleurtuit (67 m), Lorient-Lann Bihoué (49 m) et Rennes Saint-Jacques (37 m) utilisées dans cette étude.

Les indicateurs agro climatiques sélectionnés pour cette présentation sont ceux pour le maïs ensilage et le blé tendre d'hiver. Ils s'appuient sur les connaissances bibliographiques ou empiriques et ont été adaptés pour la région Bretagne par le comité de pilotage de l'étude à la Chambre d'Agriculture.

L'indicateur agro climatique retenu pour le maïs est la date théorique de récolte. Celle-ci est déterminée à partir d'un cumul de température (en base 6 et plafonnement à 30°C) depuis le 1er mai ; les semis en Bretagne intervenant généralement entre fin avril et début mai pour les variétés dites « précoces » les plus répandues sur le territoire breton. Sur conseil des experts, un cumul moyen d'environ 1425 degrés-jour est nécessaire au cycle du maïs ensilage (entre le semis et la récolte) pour atteindre 32% de matière sèche, synonyme du début de période optimale de récolte. La date théorique de récolte maïs ensilage a ainsi été calculée en utilisant le franchissement de 1425 degrés-jour à partir du 1er mai, correspondant à la valeur moyenne de la fourchette des variétés précoces (1390-1460 degré-jours).

Pour les céréales à paille, dont le blé tendre d'hiver, elles sont notamment sensibles au phénomène d'échaudage, accident intervenant lorsque la température maximale journalière atteint ou dépasse les 25°C sur la période allant de l'épiaison à la maturité physiologique. En Bretagne, cette phase sensible (incluant le remplissage des grains) débute généralement à partir de mi-mai sur les secteurs les plus précoces (Ille-et-Vilaine notamment) jusqu'à fin juin sur certains secteurs (Finistère notamment). De telles températures pendant cette période peuvent impacter le poids de mille grains (PMG), une des composantes principales du rendement. L'indice agro climatique qui a été calculé pour le blé tendre est donc le nombre de jours avec

une température maximale supérieure ou égale à 25°C sur la période allant du 15 mai au 30 juin.

Des données annuelles de rendement moyen breton de blé tendre et de maïs ensilage issues des archives de la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF) sur la période 1981-2017 (Agreste, 2018) ont également été utilisées pour déterminer l'évolution des rendements de ces cultures en Bretagne.

A partir de l'évolution des rendements, en parallèle avec celle des indices agro climatiques sur la période 1960-2018 et celle projetée à l'horizon 2100, un travail de réflexion avec les experts a ensuite été fait sur les pistes de stratégies d'adaptation aux changements climatiques à envisager.

2. Résultats

2.1. Précocité, raccourcissement du cycle du maïs et augmentation des rendements

La date de récolte théorique du maïs calculée sur la période 1960-2018 montre une récolte théorique de plus en plus précoce. En prenant l'exemple pour Brest (Fig.2), on observe que la date moyenne de récolte théorique est le 28 septembre pour la période 1991-2018, soit trois semaines d'avance par rapport à la période 1961-1990. La date de franchissement des 1425 degrés-jour à partir du 1er mai est atteinte avant le 1er octobre à peine plus de 1 année sur 10 avant les années 1990, contre 7 années sur 10 sur la période 1991-2018. L'indice calculé avec les données modélisées sur la période de référence présentait une surestimation de 5 jours. En retirant ce biais des projections, quel que soit le scénario d'émissions considéré l'indice indique une accentuation de la précocité, avec, par exemple en scénario pessimiste RCP 8.5, une date théorique évoluant approximativement vers le début septembre en moyenne pour la période 2051-2080 et le 20 août sur la période 2081-2100.

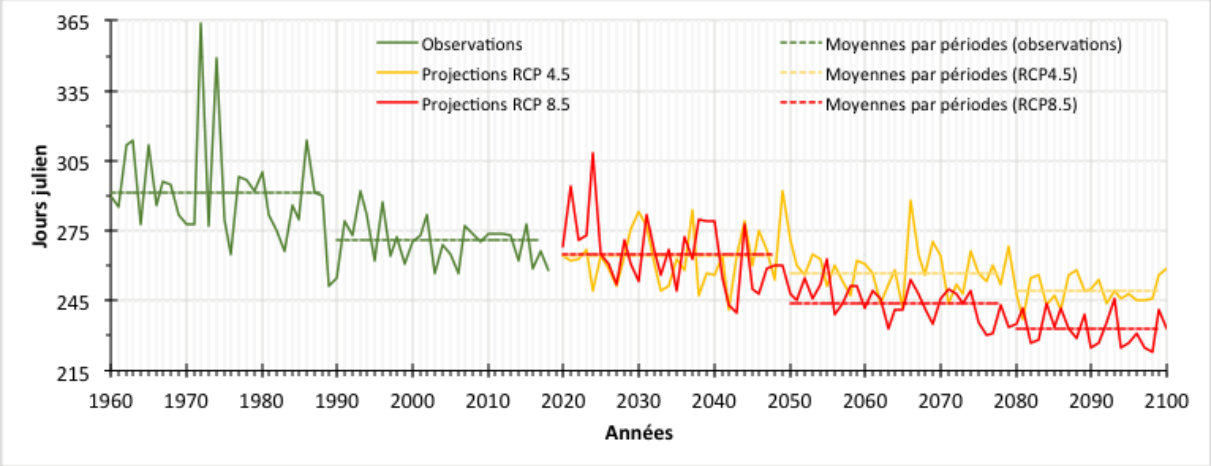


Figure 2. Date (en jour julien) de récolte théorique pour le maïs ensilage (date de franchissement du seuil de 1425°J à partir du 1er mai) pour Brest. Données observées 1960-2018 ; données projetées (biais corrigé) modèle CNRM-Aladin, scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 pour la période 2020-2100 ; et moyennes par périodes (1961-1990 ; 1991-2018 ; 2021-2050 ; 2051-2080 ; 2081-2100).

Parallèlement, l'analyse des données de rendement du maïs ensilage en moyenne pour la région Bretagne montre une forte augmentation sur la période 1981 – 2017 (+0,123 t MS/ha/an) quelle que soit la zone agro climatique (Tilly, 2019). Plusieurs hypothèses peuvent être proposées. D'une part, une avancée des dates de semis - réalisée plus ou moins consciemment par les agriculteurs - combinée à l'utilisation de variétés plus tardives, toutes deux permises par l'augmentation des températures. Par ailleurs, d'autres facteurs tels que l'intensification, l'amélioration de la technicité, l'adaptation de la précocité au type de sol, ou encore les progrès

génétiques ont favorisé cette hausse de rendements. Cependant, si le gain de disponibilité thermique peut être vu comme une opportunité (possibilités de cultures dérobées, etc.), il ne faut cependant pas oublier que la multiplication des stress thermiques et hydriques risque de pénaliser davantage la culture de maïs demain, avec de potentielles incidences sur les rendements.

En terme de solutions d'adaptation pour le maïs, en raison de l'amélioration de la disponibilité thermique, il est possible de favoriser l'usage de variétés plus tardives dans le cas où la culture n'est pas sujette au stress hydrique (sol profond notamment). Cette option pourrait permettre d'augmenter encore plus les rendements. Sur certains secteurs, il pourrait être difficile de garantir des rendements stables sans irriguer, même si aucun signal pluviométrique n'est significatif au niveau de la région, l'évapotranspiration quant à elle augmente en raison de l'augmentation des températures. Si l'amélioration du matériel (aspersion, goutte à goutte) et des conditions d'utilisation (absence de vent) peut permettre de limiter les pertes en eau (Renoux, 2015), ce levier (irrigation) est en revanche très incertain en raison des attentes sociétales et environnementales et de la priorisation des usages. Les retenues d'eau avec remplissage en hiver pour l'irrigation estivale pourraient être une alternative intéressante, mais leurs impacts environnementaux ne doivent pas être négligés.

Une stratégie d'esquive peut également être envisagée afin d'éviter que les périodes de stress hydrique coïncident avec les phases les plus sensibles de la culture (10 jours avant la floraison et 3 semaines après). Cela peut s'obtenir par l'utilisation de variétés plus précoces (cycle court) à combiner – ou non – avec des dates de semis plus précoces. Ce second levier est notamment rendu possible grâce à la diminution du nombre de jours de gel, à condition que les gels tardifs soient également moins nombreux. Dans les secteurs marqués par de forts stress hydriques, il est également envisageable de semer moins dense pour réduire la concurrence à l'eau. Détruire plus tôt la culture précédente peut également être une alternative intéressante afin qu'elle entame moins les réserves hydriques du futur maïs. Aussi, il s'agit de sélectionner des variétés plus tolérantes aux conditions de stress hydriques et thermiques.

Par ailleurs, lorsque l'eau est la ressource limitante, la substitution du maïs fourrage par du sorgho peut être envisagée. En effet, dans des conditions de fortes sécheresses, le sorgho offre généralement des rendements supérieurs au maïs fourrage, car il valorise mieux l'eau disponible, sans toutefois offrir les mêmes qualités fourragères.

2.2. Augmentation du risque d'échaudage pour le blé et plafonnement des rendements

Le nombre annuel moyen de jours échaudant (avec une température maximale supérieure ou égale à 25°C) sur la période sensible pour le blé (entre le 15 mai et le 30 juin) est très variable mais il a augmenté de manière significative en Bretagne et particulièrement à l'est, dans le bassin rennais où le caractère océanique du climat est dégradé par rapport au reste de la Bretagne. En effet à Rennes, il est passé de 5 sur la période 1960-1990 à 12 sur la période 1991-2018 (Fig.3). Les années enregistrant un nombre de jours échaudant supérieur à 10 sont de plus en plus fréquentes ; seulement une année sur 10 sur la période 1961-1990, contre 9 années sur 10 sur la période 1991-2018. L'indice calculé avec les données modélisées sur la période de référence présentait une sous-estimation de 4 jours. En corrigeant ce biais sur les projections, le nombre annuel de jours échaudant serait également variable au sein de la tendance à la hausse, 16 à 20 jours échaudant sembleraient être une moyenne sur la deuxième moitié du siècle en considérant le scénario RCP8.5.

Parallèlement, le rendement moyen régional de blé tendre, depuis 1968 et jusqu'à la fin des années 1990 a augmenté de façon nette et régulière passant d'environ 30 q/ha à plus de 70 q/ha (Agreste, 2018). Cette augmentation s'explique par l'amélioration variétale, combinée à

l'intensification de l'agriculture et l'accroissement de la technicité (fertilisation, protection phytosanitaire, préparation du sol, semis, récolte, etc.). En revanche, à partir de la seconde moitié des années 1990, on note un « plafonnement ». Ce phénomène de plafonnement, observable en France métropolitaine, résulterait notamment du changement climatique qui a accru les stress hydriques et thermiques (échaudage notamment) en fin de cycle cultural (Gate *et al*. 2009).

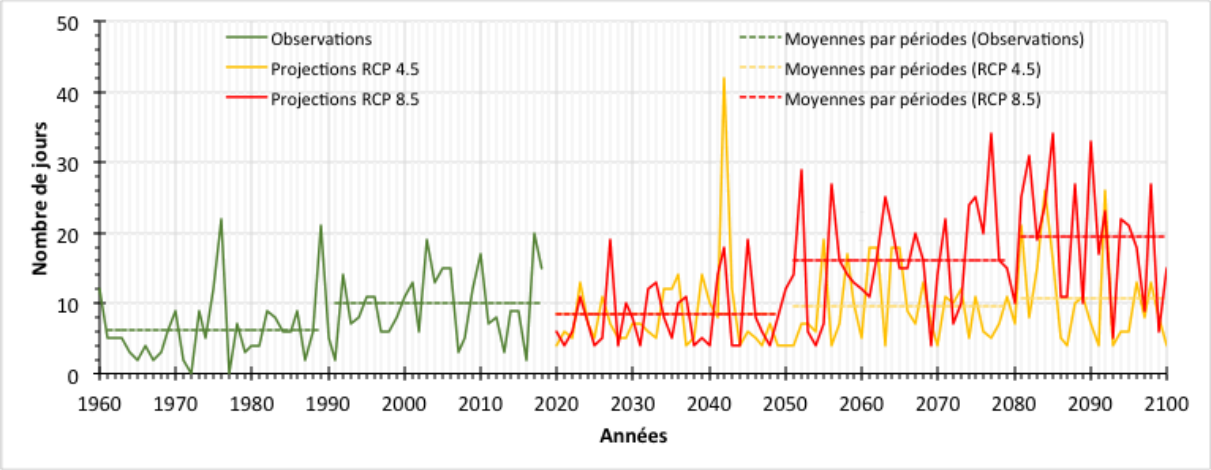


Figure 3. Nombre de jours avec une température maximale supérieure ou égale à 25°C sur la période allant du 15 mai au 30 juin pour Rennes. Données observées à Rennes pour 1960-2018 ; données projetées (biais corrigé) modèle CNRM-Aladin, scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 pour la période 2020-2100 ; et moyennes par périodes (1961-1990 ; 1991-2018 ; 2021-2050 ; 2051-2080 ; 2081-2100).

En ce qui concerne les solutions d'adaptation, il est possible d'esquiver ces jours d'échaudage en avançant les dates de semis mais cette option est déconseillée aujourd'hui au regard des risques associés (adventices, piétin échaudage, pucerons d'automne, gel de printemps, etc.) comme cela a également été évoqué en Normandie (Beauvais *et al.*, 2019). Ainsi, la stratégie d'esquive la plus judicieuse serait d'opter plutôt pour des variétés à épiaison plus précoce (pour réduire le risque d'échaudage en fin de cycle) et stables au stade épi 1 cm (pour ne pas accentuer le risque face au gel tardif). Bien qu'étant généralement moins productives que les variétés tardives, ces variétés impliquent des décalages de cycles bien plus importants que les avancements de phases générés par des semis précoces ; la période d'échaudage est ainsi considérablement avancée vers des mois plus frais.

D'autre part, dans les terrains séchant disposant d'une faible réserve utile, la substitution du blé par de l'orge pourrait être bénéfique (Gate *et al*., 2009). Aussi, l'amélioration variétale doit se poursuivre vers des variétés plus tolérantes aux stress thermiques et hydriques.

Le mélange pois - céréales peut être une alternative intéressante face aux incertitudes climatiques. Il permet notamment de limiter les pertes de rendement dues aux maladies, aux adventices et à la verse, et favorise un blé plus riche en protéines. De plus, les besoins en eau et en nutriments de ces cultures sont différents et décalés dans le temps, ce qui limite la concurrence à l'eau. Mais la complexité du travail supplémentaire (fabrication du mélange, gestion des bio-agresseurs, tri à la récolte, etc.) et la variabilité de la proportion de pois dans la récolte annuelle peuvent freiner l'utilisation de cette pratique (Boissinot, 2015). Des mélanges de variétés de blé sont aussi envisageables.

Conclusion

Les effets sur la précocité des maïs ou l'augmentation des risques d'échaudage sur blé sont déjà effectifs en Bretagne et l'adaptation est en cours.

De nombreux paramètres agro climatiques restent à suivre pour évaluer comment les risques ont et vont évoluer ; par exemple, étudier l'évolution des risques de gel ou d'excès d'eau en périodes critiques, l'évolution des conditions climatiques favorables aux maladies fongiques, aux ravageurs, aux adventices ou encore aux verses. Si de tels risques et/ou pressions sont amenés à s'intensifier, les mesures d'adaptations associées devront être déployées.

De même d'autres indicateurs agro climatiques restent à étudier, pour répondre aux questions des producteurs de légumes, grandes cultures et aux éleveurs. L'augmentation des températures est amenée à se poursuivre avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, auxquelles l'agriculture contribue.

À ce titre, il ne faut cependant pas oublier que l'agriculture a un rôle important à jouer en termes d'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre) en améliorant son bilan. Demain, le stockage du carbone devra s'amplifier avec le maintien des prairies et du bocage, l'agroforesterie, l'implantation de couverts végétaux, etc. Les engins agricoles seront plus performants et moins consommateurs et émetteurs, les énergies renouvelables ou « innovantes » devront continuer à se déployer. Déjà bien engagés ces dernières années, ces efforts devront se poursuivre et s'accélérer collectivement afin que l'agriculture soit à terme moins impactée par le changement climatique.

Remerciements

A la Région Bretagne et l'ADEME pour le financement de cette étude.

Bibliographie

AGRESTE, 2018. Synthèse Bretagne : La Bretagne agricole et alimentaire. Agreste, la statistique agricole. Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF Bretagne), Rennes, 4p.

Beauvais F., Cantat O., Madeline P., 2019. Changement climatique et céréaliculture en Normandie : quelles perspectives pour 2100 ? XXXII^{ème} Colloque International de l'AIC : Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques, Mai 2019, Thessaloniki, Grèce, 71-76.

Boissinot F., 2015. Cultiver du blé panifiable : Une association réussie avec le pois protéagineux. *Grain de réussite,* Les agriculteurs témoignent de leurs réussites, N°2, p.6.

Dubreuil V., Même K., Bonnardot V., Aubert J.F., Veger A.C. & Melec D., 2019. Changement climatique et dates de floraison des pommiers dans le Val de Rance (Bretagne). XXXII^{ème} Colloque de l'AIC : Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques, Mai 2019, Thessaloniki, Grèce, 83-88.

Dubreuil V., Planchon O., Lamy C., Bonnardot V., Quénol H., 2012. Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances. In Mérot Ph. *et al.*, *Changement climatique dans l'Ouest,* Rennes, Presses Universitaires de Rennes, chap.1, 19-30.

Gate P., Vignier L., Deudon O. et Gouache D., 2009. Changement climatique : impact sur le blé en France et pistes d'adaptation. Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore. Paris, 85-99.

Mérot *et al.* (dir.), 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions. Espace et Territoires*, Rennes, Edition PUR, 458p.

Moss *et al.*, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463,. Doi:10.1038/nature08823.

ORACLE (Collectif), 2018. *État des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Pays de la Loire*. Ed. Pays de la Loire, Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire, 172p.

Renoux J.-P., 2015. Les experts maïs. Episode 2. L'irrigation : une chance pour l'agriculture française. www.agpm.com

Tilly S., 2019. *Le programme ORACLE-Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE-valorisation des premiers résultats en région Bretagne*. Mémoire de Master 2 GAED-ETA, Université Rennes 2, France, 81p.

VEGETATION AND SOIL HUMIDITY AS ANALYSIS ELEMENTS OF THE ISLAND OF SURFACE HEAT IN THE CITY OF NATAL (RN), BRAZIL

LIMA A.P.[1], SOUSA G.S.[1], SANT'ANNA NETO J.L.[2], AMORIM M.C.C.T.[2]

1 Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculty of Science and Technology, Presidente Prudente, Brazil (p.lima@unesp.br ; guilherme.s.sousa@unesp.br)
2 Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculty of Science and Technology, Presidente Prudente Brazil (joaolimasantannaneto@gmail.com ; margarete.amorim@unesp.br)

Summary: *The development of urban areas with balanced thermal scenarios is a challenge for society, especially in tropical and equatorial environments, where temperatures naturally manifest high values, which can favor the occurrence of climatic phenomena such as the Islands of Urban Surface Heat. Thus, this study aimed to diagnose the interference of vegetation and the amount of water in the soil in the generation of surface heat islands in the city of Natal, located on the coast of northeastern Brazil. In this sense, the surface temperature intensity and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) charts were drawn up using images from the Landsat 8 satellite (OLI/TIRS) using parameters and remote sensing techniques; as well as the Climatological Water Balance (Thornthwaite & Mather, 1995) to verify deficiencies and surplus water in the soil. The results showed the importance of the presence and distribution of different vegetated areas, as a potential element in attenuating surface temperature intensities in urban environments located in tropical and equatorial areas, in order to indicate possible strategies for mitigating the Heat Islands of Surface (ICUS) and consequently with regard to improving the quality of life of the population in cities.*

Key words: *vegetation (NDVI); soil moisture; heat island, Brazilian coastal city*

Résumé : ***La végétation et l'humidité du sol comme éléments d'analyse de l'îlot de chaleur de surface dans la ville de natal (RN), Brésil***. *Le développement de zones urbaines avec des scénarios thermiques équilibrés est un défi pour la société, surtout dans les environnements tropicaux et équatoriaux, où les températures manifestent naturellement des valeurs élevées, ce qui peut favoriser la survenance de phénomènes climatiques tels que les Îles de Chaleur de Surface Urbaine. Ainsi, cette étude visait à diagnostiquer l'interférence de la végétation et la quantité d'eau dans le sol dans la génération d'îlots de chaleur de surface dans la ville de Natal, située sur la côte du nord-est du Brésil. En ce sens, les graphiques d'intensité de température de surface et NDVI (indice de végétation par différence normalisée) ont été élaborés à partir d'images du satellite Landsat 8 (OLI / TIRS) à l'aide de paramètres et de techniques de télédétection; ainsi que le bilan hydrique climatologique (Thornthwaite & Mather, 1995) pour vérifier les carences et les excédents d'eau dans le sol. Les résultats ont montré l'importance de la présence et distribution de différentes zones de végétation, comme élément potentiel d'atténuation des intensités de température de surface dans les environnements urbains situés dans les zones tropicales et équatoriales, afin d'indiquer des stratégies possibles pour atténuer les Îlots de Chaleur Urbain (ICU) et par conséquent en ce qui concerne l'amélioration de la qualité de vie de la population dans les villes.*

Mots clés : *végétation (NDVI) ; humidité du sol ; île de Chaleur ; ville côtière brésilienne*

Introduction

Studies on the climate of cities in tropical environments (Amorim, 2018; Dorigon and Amorim, 2019; Lombardo, 1985; Lucena *et al*., 2013; Rampazzo, 2019) have shown scenarios in which the elements present in cities can influence the characteristics surface thermal and therefore impact people's comfort and quality of life. Among the studied phenomena, the Island of Urban Heat Surface (ICUS), diagnosed through the differences in temperatures between urban targets and rural targets (VOOGT & OKE, 2003), presents itself as a relevant object of analysis. In combination with the object described above, another important element that integrates this process is water and the quantity available at ground level, since such variations in the form of occupation and use of urban land influence, not only the energy balance, but also in the local water balance. However, in Brazil, few studies associated with this theme deal with the reality of coastal cities, from this perspective. Thus, the objective of this work was to

elaborate temperature intensity and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) charts for the city of Natal, considering two episodes with different amounts of water in the soil, indicated by the Climatological Water Balance, Thus, the analysis of the results intended to focus on how this element contributes to the intensification or mitigation of the urban surface heat islands.

Natal is located in the coastal area of the Northeast Region of Brazil. It is the political and administrative capital of the state of Rio Grande do Norte and has an estimated population of more than 880 thousand inhabitants, according to the IBGE (2019). The Christmas climate according to the classification of Köppen (1900) and Dubreuil *et al*. (2018) is as characterized as rainy tropical (hot and humid). The average annual temperature is 29.6°C, with a good distribution of rainfall throughout the year, in which the average annual rainfall is 1,721.4 mm (INMET, 2018). Due to its geographic position, the city is directly influenced by the trade winds from the southeast (SE), which favor the maintenance of relative air humidity at rates above 70%.

1. Materials and Methods

The methodological procedures adopted consisted of the following steps, so that the software IDRISI Selva[1] and ArcGis 10.7.1[2] were used.

1.1. Elaboration of the surface temperature intensity and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) charts

The cards were created with images from the Landsat 8 satellite (OLI/TIRS), scene WRS Row: 214; Path: 064 of April 18 and August 8 of the year 2017, through parameters and remote sensing techniques[3]. These periods were chosen because the images have less cloud cover. For the generation of the surface temperature chart, the band 10 - thermal infrared channel/TIRS 1 was used. The procedures for obtaining the temperature intensities in Celsius degree (°C) were performed according to the parameters and procedures indicated, consisting of the conversion of the gray levels (NC) of the image to radiance, subsequently to Kelvin temperature and degrees Celsius and finally, subtracting the lowest temperature value from the image, in order to obtain the temperature intensity values. From the spectral bands of red and near infrared, bands 4 and 5, respectively, the NDVI map was generated, which allowed the identification of vegetative density and its distribution. This index has a scale ranging from -1 to +1, with lower values associated with less vegetation, and higher values related to greater vegetation density.

1.2. Elaboration of the Climatological Water Balance

This step was performed with the method of Thornthwaite & Mather (1995) for the period from January to December 2017, in order to characterize water availability, at the time of taking the images. Climatological Water Balance consists in an estimation for a chosen region, in this case represented by the city of Natal and nearby, that is based on average monthly data of precipitation, evapotranspiration and available water capacity (soil water-holding capacity). Thus, with the temperature data obtained from the NASA database (National Aeronautics and Space Administration)[4], potential evapotranspiration (PET) was calculated. And from these PET values and precipitation data (P), from the same source, the storage variation[5], the accumulated negative, the change in humidity, the actual evapotranspiration (AET), deficiency (DEF) and surplus (SUR)

[1] Idrisi is a registered trademark of Clark University.
[2] ArcGIS is a registered trademark of the Environmental Systems Research Institute (ESRI).
[3] Available on the USGS website <https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.>.
[4] Available at: https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/.
[5] The adopted Available Water Capacity (CAD) was 125 mm.

of water in the soil on a monthly scale. According to the preferred method, the negative alterations are soil water with drawals (SWD), while the positive alterations are soil water recharge (SWR).

2. Results

The results showed intensities that varied from zero to 15 for April and from zero to 13 for August 2017, equivalent respectively to the absolute temperatures of 23.4 (min.) to 43.7°C (max.), and 24.3 (min.) to 40.7°C (max.). The thermal charts of April and August 2017 (Fig.1A, B) indicated that the highest temperature intensities were recorded in urban areas, which correspond to densely built environments with a predominance of impermeable areas, indicating an interval in the intensity scale between 7°C and 15°C. These areas showed, in the NDVI charts, average values around 0.20 (Fig.1C, D), evidenced in the cutout number 4, representative of the highest temperature intensities (15°C and 13°C) and impermeability when compared to the other selected clipping.

The lowest temperature intensities, below 2°C, were found in places that have denser vegetation, so that the NVDI values remained above 0.24 reaching the maximum of the variation scale, 0.64 in April and 0.58 in August, as shown in cutout 2, representing a lowland area and cutout 3 representing forest remnants (Parque das Dunas).

The representative cutout 1 of the area of agriculture of urban and/or periurban origin presented, in relation to the other areas, a different pattern in the scale of variation of the temperature intensities, corresponding to 4°C in April and 5°C in August, while that the NDVI values remained higher than 0.27, this is due to the vegetative density and the amount of water available in the soil in the months prior to taking the image, either by the capacity to replace the rain or by the frequency with which this area is irrigated, treating up from a cultivation area.

The analysis of the influence of humidity in the period in question and through the Climatological Water Balance (Fig.1E) it was found that the first image taking period happened several months marked by water deficit, and for April it was estimated 40mm of deficit, due to median rainfall in previous months, which did not exceed 100mm monthly.

In the second moment of taking the image - beginning of August - there was a period of recharge and water surplus, due to the occurrence of significant precipitation in monthly values of May, June and July (equal to or greater than 180mm/month). During this period, precipitation (greater than 300mm) strongly exceeded evapotranspiration, resulting in recharge and excess water in the soil.

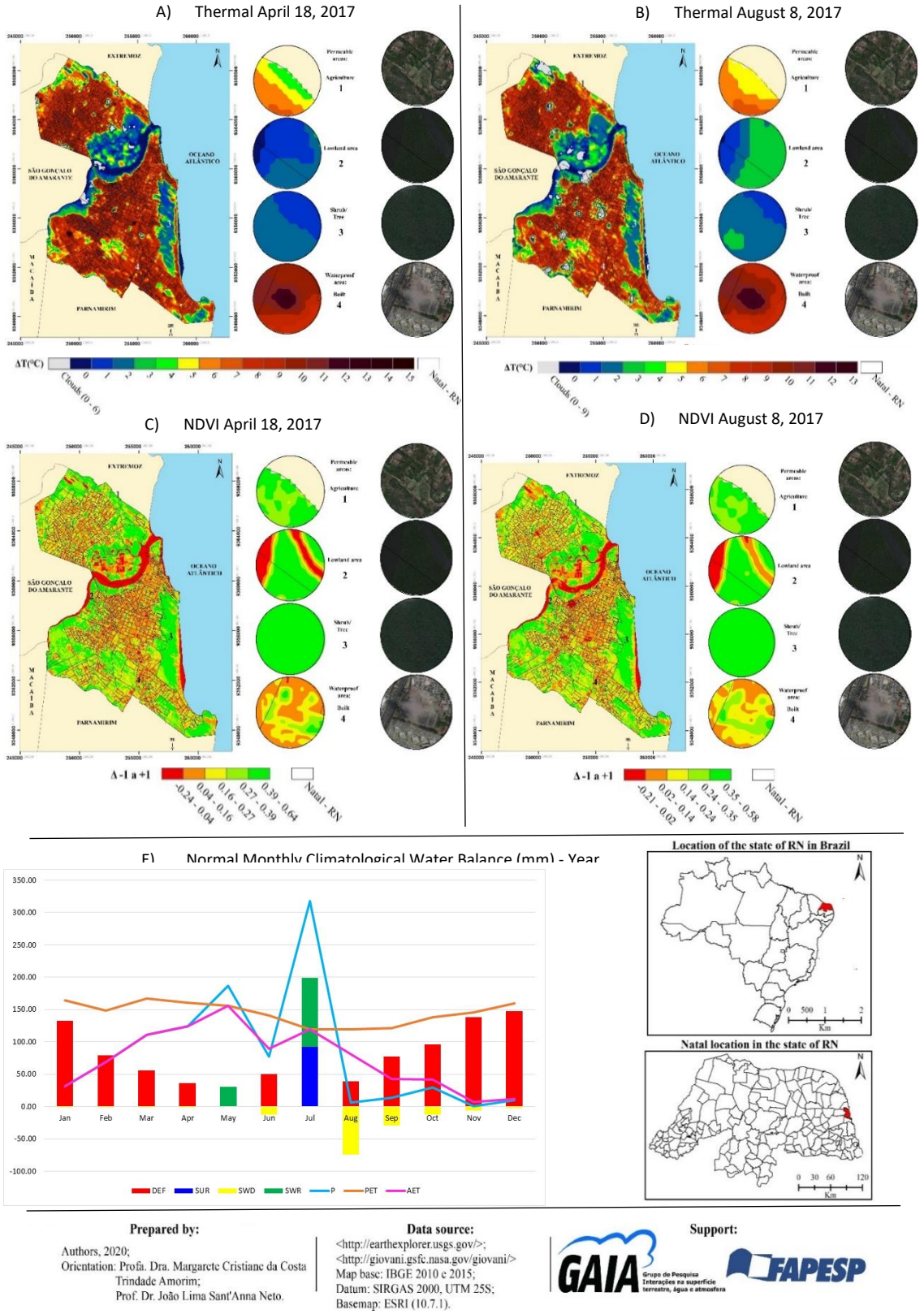


Figure 1. Thermal and NDVI charts of 04/18 and 08/08 2017, and graph of the Climatological Water Balance for the year 2017

Because of this, it was observed in the second episode analyzed and in comparison, with April, that, in general, when considering the whole of the city, there was an increase in the areas that present higher values in the NDVI scale. This is due to the presence of water in the soil that makes it possible to recover the vigor and exuberance of the vegetative mass.

However, when verifying the temperature intensities, it was noticed that the August thermal chart showed areas with intensity values higher than April, as in cutouts 1, 2 and 3, increasing respectively 1°C in each one.
This result can be justified, considering the period of taking the representative image of the beginning of August. Thus, it is important to consider the plant's phytological capacity to respond to the amount of water retained in the soil and consequently increase its vigor and exuberance.
On the other hand, even with this result, the vegetated areas, even though they were 1°C warmer compared to April, presented lower temperature intensities when compared to densely built and waterproofed areas typical of the urban environment, in which there is in cutout 4, representing 13°C of temperature intensity at the beginning of August.
Therefore, it can be said that the vegetated areas of different shapes and compositions in the city are important for maintaining thermal balance, in order to enable situations of more comfort and quality of life for the inhabitants and regulars of the city in a healthy and sustainable way.

Final considerations

The thermal and NDVI charts showed the influence of vegetation on the thermal characteristics of the city of Natal in correlation with the amount of water in the soil, so that the most vegetated areas exhibited lower temperature intensities, as well as densely built and waterproofed urban areas showed higher temperature intensities in both periods.
The Climatological Water Balance made it possible to obtain information on water deficiencies and surpluses in the soil for the year 2017, based on the water supply represented by Precipitation (P) and the atmospheric demand represented by Evapotranspiration (potential / actual), and to verify the presence/availability of water for the different Landsat 8 satellite image taking periods.
The results showed that the presence of water in the second episode, at the beginning of August, generated a slightly milder thermal scenario in which the most vigorous vegetation is found, except for the number 1 cutout, where an area of urban and/or periurban agriculture that exhibited an increase in temperature intensity as opposed to an increase in the NDVI value. Besides, in the driest period, between September and April, with severe water deficiency, probably irrigation is needed to maintain urban agricultural activity.
Although this area has presented this result, this type of land use is considered important within the dynamics of cities, as a possibility to increase the permeability areas in their spaces. In addition to configuring a way of improving food safety and health, urban environmental quality, generating a source of income and employment and consequently improving the quality of life of people in cities. For this reason, it is important to carry out new research that brings to the core of its purposes the purpose of investigating the potential of these areas in relation to aspects related to the climate of cities.
On the other hand, the areas that present a denser vegetation cover with shrub and tree sizes, as in the cutouts number 2 and 3, indicated a good correlation between surface temperature, NDVI and amount of water in the soil, being an indication of the environmental potential and landscape that this type of coverage and land use represents in the dynamics of cities.

In this way, the most vegetated urban areas, mainly in shrub and tree density, represent more permeability in the soil, more groundwater springs recovery, more conservation and preservation of biodiversity in terms of fauna and flora and consequently more balance in the thermal capacity of the different coverings present in urban spaces with regard to the retention and release of heat to the environment (DUBBELING, 2014).

Therefore, urban vegetation is considered an important element to attenuate high temperatures, typical of tropical and equatorial environments, and to ease the conditions of surface urban heat islands, since the vegetated areas represent, in terms of temperature, surface, lower intensities when compared to impermeable and densely built areas, which in turn, results in a better quality of life for people who reside or frequent cities marked by these climatic dynamics.

Acknowledgments

The authors would like to thank CAPES - Edital 042/2014 - Socioeconomic Development in Brazil (PGPSE), process: 88887.115964/2016-01; CNPq-Research Productivity Scholarship-process: 307191/2018-4; to FAPESP-master's scholarship-process: 2019/03960-1.

Literature

Amorim M.C.C.T., 2018. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 9 (2018) 10-16.

Dorigon L. P., Amorim M. C. C. T., 2019. Spatial modeling of an urban Brazilian heat island in a tropical continental climate. *Urban Climate*, v. 28, p.100461

Dubbeling M. A., 2019. Agricultura urbana como estratégia de redução de riscos e desastres diante da mudança climática. *Revista de Agricultura Urbana*. n. 27, 2 -12.

Dubreuil V., Pechutti Fante K., Planchon O., & Sant'Anna Neto J. L., 2017. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo*, (41).

Gartland I., 2010. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. São Paulo: Oficina de textos, 256p.

Jensen J. R., 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 604p.

Lombardo M. A., 1985. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo, Hucitec, 244p.

Lucena A.J., Rotunno Filho O.C., Almeida França J.R., Faria Peres L., Xavier L.N.R., 2013. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. *Theor. Appl. Climatol*. 111 (3–4), 497–511.

Meneses P. R, Almeida T. de (Orgs.)., 2012. Introdução ao Processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília, UNB/CNPq, 266p. URL: < http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8> (Acessado em: 30 jan. 2020).

Oke T. R., 1978. *Boundary Layer Climates*. London, Methuem & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 372p.

Rampazzo C.R., 2015. *Clima e Produção do espaço urbano: contribuição ao estudo da geografia do clima no contexto das cidades de São Carlos e Marília (SP).* Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, Brésil.

Stewart I. D., 2011. *Redefining the urban heat island. Vancouver.* Thesis (Doctor of Philosophy), The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, 368p.

Thornthwaite C., Mather J. R., 1995. *The water balance*. Publications in climatology, Laboratory of Climatology, New Gersey, v.8.

Voogt J. A., & Oke T. R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE DIFFÉRENTS ENSEMBLES DE DONNÉES DE GRILLE PAR RAPPORT AUX DONNÉES OBSERVÉES DE PRÉCIPITATION DANS L'ÉTAT DU PARANÁ (BRÉSIL)

LIMBERGER L.[1], ELY D.F.[2], GAMERO P.[3], MANGILI F. B.[3], SCHMENGLER M.[3]

1 Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paranà, Brasil (leila.limberger@unioeste.br)
2 Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Paranà , Brasil (deise.ely@gmail.com)
3 Núcleo de Inteligência Territorial, Parque Tecnológico de Itaipu (NIT/PTI), Brasil (paulo.gamero@pti.org.br; fabianamangili@gmail.com; moacir.schmengler@pti.org.br)

Résumé: *Afin d'identifier les différents ensembles de données de grille qui représentent le mieux les précipitations quotidiennes dans l'État du Paraná, les ensembles CHIRPS, CPC, GPCP, GPM et TRMM ont été analysés. Ces données ont été comparées à celles provenant de neuf stations météorologiques dans l'État du Paraná - Brésil. Des statistiques descriptives de base, des techniques de corrélation et de régression linéaires ont été utilisées. Les résultats montrent que la meilleure association entre les données météos observées est celle avec les données CPC, suivie par CHIRPS et GPCP. Cela peut être attribué au fait que le CPC dispose d'un algorithme basé sur les données des stations météorologiques et que le Paraná a une forte densité de stations. Ainsi, pour les zones qui composent le bassin qui alimente le lac Itaipu, qui ne disposent pas de stations météorologiques, il est suggéré d'utiliser l'ensemble de données CPC.*

Mots clés: *Lac Itaipu; CPC; GPCP; CHIRPS*

Summary: ***Evaluation of the performance of different ensemble of grid datasets with respect to observed rainfall data in the state of Paraná (Brazil).*** *In order to identify which grid data set better represents daily rainfall in Paraná State, we analyzed CHIRPS, CPC, GPCP, GPM and TRMM data set. These data were compared with data from nine meteorological stations in the Paraná State – Brazil. Basic descriptive statistics, linear correlation and linear regression techniques were used. The results show that the best association with the observed data was registered by the CPC, followed by CHIRPS and GPCP. This is due to the fact that the CPC data set has an algorithm based on meteorological stations data and the Paraná State has a high density of stations. Thus, for the areas that make up the basin that feeds the Itaipu lake, which do not have meteorological stations, the use of the CPC data set is suggested.*

Key words: *Itaipu Lake; CPC; GPCP; CHIRPS*

Introduction

Pour l'étude de la variabilité climatique, il est essentiel d'obtenir une base de données d'échantillons représentative, dans laquelle les valeurs mesurées peuvent représenter la distribuition de l'objet étudié. Cependant, au Brésil, de nombreux réseaux de collecte de données météorologiques sont devenus obsolètes ou ont été fermés, même dans des régions où ils étaient déjà rares. En raison de ces difficultés, actuellement, les performances des ensembles de données atmosphériques distribués dans des grilles équivalentes ont été testées, générées soit à partir d'observations issues de stations météorologiques, d'informations de télédétection ou de modèles de prévisions météorologiques. Le principal avantage des données obtenues à distance est qu'elles peuvent disposer de données en temps réel et couvrir une zone complète, quel que soit le terrain ou le climat, ce qui facilite l'analyse de la variabilité temporelle et spatiale des précipitations dans une région (Teegavarupu, 2012).

Il convient de considérer que toutes les méthodes de mesure de la pluie présentent des avantages et des inconvénients; ainsi, malgré les erreurs dans les données des ensembles de grilles, celles-ci peuvent être très utiles, en particulier pour les zones où il n'y a pas d'enregistrement disponibles ou lorsque la densité des stations y est très faible.

Actuellement, les performances des ensembles de données atmosphériques distribuées dans des grilles régulièrement espacées, générées par de grands centres de recherche météorologique à

partir d'observations provenant de stations météorologiques et des données satellitaires, ont été testées. Gulizia et Camiloni (2015) ont analysé les données mensuelles de pluie en Amérique du Sud à partir de trois ensembles de données (CRU, GPCC et UDel) et ont trouvé de faibles variations statistiquement non significatives entre elles. Limberger et Silva (2018) ont testé les données de pluie CRU, GPCC et Reanalysis I du NCEP / NCAR pour le bassin de l'Amazonie brésilienne et ont identifié une plus grande corrélation linéaire et des meilleures performances de le GPCC avec les données observées. Silva *et al.* (2019) ont étudié la faisabilité d'utiliser les données de précipitations quotidiennes de CHIRPS, TRMM et GPCC en les comparant avec celles enregistrées dans les stations météo situées dans l'État du Paraná et de São Paulo et ont conclut qu'elles représentent fidèlement la variabilité climatique des stations analysées.

L'objectif de cette recherche est d'identifier le modèle de données de grille régulièrement espacées qui mieux représente les données observées de précipitations pour l'État du Paraná, qui intègre la majeure partie du bassin versant qui alimente le lac de Itaipu mais aussi des zones de l'État du Mato Grosso do Sud et Paraguay avec une faible densité ou une absence de stations météorologiques. Et, ainsi, vérifier quel ensemble de données du réseau est le plus approprié pour faire des prévisions hydrologiques et qui permet de considérer les zones avec des données météorologiques insuffisantes.

1. Matériel et méthodes

1.1. Données

Des données sur les précipitations quotidiennes provenant de neuf stations météorologiques situées dans l'État du Paraná et des données sur les précipitations quotidiennes provenant des ensembles CHIRPS, CPC, GPCP, GPM et TRMM ont été utilisées.

Le *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) produit des données de précipitations quotidiennes, pentadaires et mensuelles pour les latitudes comprises entre 50° S et 50° N, avec une résolution spatiale de 0,05°. Il se compose de données satellitaires et de stations météorologiques pour estimer la pluie à partir de la température depuis le sommet des nuages (Funk *et al.*, 2015), pour la période qui commence en 1981 jusqu'à nos jours. Le *Climate Prediction Center* (CPC) du *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) a developpé le *Global Unified Gauged-Based Analysis of Daily Precipitation* à l'aide d'un logarithme qui prend en compte les données de pré-précipitations de 16 000 stations (Chen *et al.*, 2008), pour toutes les coordonnées du Globe avec une résolution spatiale de 0,5° pour la période de 1979 à nos jours. Le *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) est basé sur la combinaison de données pluviométriques journaliers provenant des micro-ondes, infrarouges et radar observées par une collaboration internationale de satellites, en plus des données de stations météorologiques avec une résolution spatiale de 1° pour toutes les latitudes et longitudes, de 1979 à nos jours (Pendergrass *et al.*, 2016). *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) résulte d'une mission entre la NASA (États-Unis) et la JAXA (Japon). Satellite lancé en 1997, dont la mission s'est terminée en 2015, avec l´objectif de collecter des informations sur les précipitations dans la région tropicale, entre 60° des latitudes N et S (NASA, 2020). Ses capteurs sont composés du générateur de micro-ondes, du radar de précipitation, du radiomètre visible et infrarouge, du capteur d'énergie rayonnante de surface et de nuages et du capteur d'image de rayons (Araujo *et al.*, 2017) qui ont produit des données de précipitations pour une résolution temporelle de 3 heures à 1 mois avec une résolution spatiale de 0,25°. Une mise à jour du TRMM, Global Precipitation Measurement (GPM), a été lancée en 2014 avec un raffinement de la résolution spatiale à 0,1° et t grâce à un algorithme, il est possible de produire une extrapolation des données de l'an 2000 à la présent (NASA, 2020).

1.2. Méthodes

Pour effectuer la comparaison avec les ensembles de données atmosphériques distribués dans des grilles équivalentes, neuf stations météorologiques ont été sélectionnées, deux pour chacune des cinq régions homogènes définies par Limberger et Ely (2019), à l'exception de la région Est, qui n'avait qu'une seule station sélectionnée. Les stations choisies n'ont pas présentées de données quotidiennes manquantes entre 1977 et 2018, à savoir: Région Centre-Sud: Inácio Martins et Palmas; Région Ouest / Sud-Ouest: Francisco Beltrão et São Miguel do Iguaçu; Région orientale: Piraquara; Région du Midwest: Pallottine et Formosa do Oeste; Région Nord: Londrina et Cidade Gaúcha. Les données de précipitations quotidiennes pour ces ensembles ont été extraites du format NetCDF à l'aide du logiciel GrADS (Berman *et al.*, 2001), en tenant compte des coordonnées géographiques de chacune des stations retenues.

La comparaison entre les données observées (stations météorologiques) et les données de grille a été effectuée à l'aide de statistiques descriptives, de tests de régression et de corrélation linéaires dans le logiciel R pour l'ensemble de la période de l'étude. Dans cette étude, nous ne presentons que les graphiques de l'année2018 pour évaluer la performance des données, en raison de la grande quantitié de données dans les séries temporelles.

2. Résultats et discussion

Les statistiques descriptives des données (Tab.1) indiquent qu'aucun ensemble analysé n'a atteint le total accumulé dans la série historique (87019,8 mm à la station Francisco Beltrão, station qui a enregistré la valeur la plus élevée). Le CPC a produit un total accumulé au cours des 41 années les plus proches de celui observé (82680,4 mm). Dans le cas de la moyenne, la valeur de l'ensemble observé était de 5,7 mm / jour, la même valeur enregistrée par le CPC, le GPCP enregistrant 5,6 mm et le CHIRPS, 5,5 mm, montrant un excellent résultat. Quant aux valeurs journalières maximales enregistrées, la station météo a atteint 183,6 mm en une journée et le CPC a enregistré 123,7 mm, c'est-à-dire la valeur la plus proche de celle observée mais inférieure; seul le GPM a enregistré une valeur plus élevée, 282,5 mm. L'écart type à la station de F. Beltrão était de 14,4 mm; l'ensemble le plus proche de cette valeur était le GPCP, avec 12,6 mm.

Tableau 1. Statistiques descriptives de base de la station Francisco Beltrão pour la période de 1977 à 2018

	Observées	*CHIRPS*	*CPC*	*GPCP*	*GPM*	*TRMM*
Total accumulé dans la série historique (mm)	87019,8	77002,4	82680,4	45782,6	*	*
Moyenne (mm/jour)	5,7	5,5	5,7	5,6	2,0	0,4
Minimum (mm/jour)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum (mm/jour)	183,6	116,2	123,7	99,9	282,5	106,3
Écart type (mm)	14,4	12,2	11,3	12,6	9,7	2,5

* n'a pas été pris en compte en raison de la série chronologique trop courte

Le tableau 2 résume le résultat de la comparaison des ensembles de données par rapport à celui observé, avec ceux dont les valeurs sont les plus proches.

Tableau 2. Ensembles de grilles qui ont obtenu une meilleure approximation avec les valeurs observées pour la période de 1977 à 2018

	Total	*Moyenne*	*Maximum*	*Écart type*
Inácio Martins	CPC	CPC	CPC	CHIRPS
Palmas	CPC	GPCP	CPC	GPCP
Francisco Beltrão	CPC	CPC	CPC	GPCP
São Miguel do Iguaçu	CHIRPS	CHIRPS	CPC	GPCP

Piraquara	CPC	CPC	CHIRPS	GPCP
Palotina	CHIRPS	CHIRPS	CHIRPS	GPCP
Formosa do Oeste	CPC	CHIRPS	GPM	GPCP
Londrina	CHIRPS	GPCP	GPM	CHIRPS
Cidade Gaúcha	CPC	CHIRPS	CPC	GPCP

En général, la CPC a présenté les résultats les plus proches de ceux observés pour la valeur totale et la valeur maximale, accompagnée de CHIRPS. Le GPCP était l'ensemble qui se rapprochait le plus de celui observé pour l'écart type; tandis que pour la moyenne des observations, CHIRPS est l'ensemble qui représente le mieux les postes analysés.

L'application de tests de corrélation linéaire et de régression linéaire (basés sur l'analyse de l'erreur quadratique moyenne - RMSE) pour l'ensemble de la série historique indique que le CPC a mieux performé dans toutes les stations météorologiques analysées, avec un résultat bien supérieur aux autres ensembles de données utilisées (Tab.3).

Tableau 3. Résultats de la comparaison entre les valeurs observées et les ensembles de données de grille CHIRPS, CPC, GPCP, GPM et TRMM pour la période de 1977 à 2018 (ou en considérant la période de données disponible de l'ensemble de grille)

Station	*Statistique*	*CHIRPS*	*CPC*	*GPCP*	*GPM*	*TRMM*
Inácio Martins	*Corrélation*	0,48	0,71	0,06	0,01	0,01
	RMSE	11,57	8,40	16,32	12,84	12,81
Palmas	*Corrélation*	0,54	0,85	0,47	-0,03	0,00
	RMSE	11,96	7,34	13,55	17,34	14,85
Francisco Beltrão	*Corrélation*	0,56	0,78	0,47	-0,02	0,01
	RMSE	12,79	9,03	14,10	17,50	15,32
São Miguel do Iguaçu	*Corrélation*	0,51	0,65	0,50	0,02	0,00
	RMSE	11,84	9,81	12,75	14,87	13,36
Piraquara	*Corrélation*	0,44	0,76	0,46	-0,02	0,01
	RMSE	10,67	6,28	10,18	12,18	10,40
Palotina	*Corrélation*	0,56	0,75	0,50	-0,01	0,00
	RMSE	11,07	8,46	12,22	14,13	13,20
Formosa do Oeste	*Corrélation*	0,48	0,64	0,48	0,00	0,00
	RMSE	11,60	9,63	12,69	14,90	14,02
Londrina	*Corrélation*	0,53	0,89	0,47	-0,01	0,00
	RMSE	10,87	5,30	11,50	14,01	12,56
Cidade Gaúcha	*Corrélation*	0,52	0,72	0,51	0,00	0,01
	RMSE	10,17	7,95	11,37	14,20	12,83

La meilleure association entre les données observées et le CPC était pour les stations de Londrina et Palmas et une corrélation modérée pour Formosa do Oeste et São Miguel do Iguaçu. Cependant, CHIRPS et GPCP ont également montré des corrélations modérées, cependant, les valeurs qui prévalaient étaient proches du CPC au cours de la même saison. Le RMSE calculé pour les deux données matricielles avait les valeurs CPC les plus faibles dans toutes les stations, ce qui indique que cette base de données contenait moins d'erreurs dans son estimation.

Ainsi, en général, CPC, CHIRPS et GPCP ont montré de meilleurs résultats que GPM et TRMM. La bonne performance du CPC est probablement due à l'élaboration de son algorithme, qui prend en compte les valeurs des stations météorologiques et, puisque l'état du Paraná possède une bonne densité de stations, son résultat est très proche des valeurs observées. Les

autres ensembles de données prennent également en compte les informations satellitaires et sont d'excellents outils pour les zones à faible densité de stations météorologiques, et leurs données ne peuvent pas être sous-estimées.

Cependant, dans le cas spécifique de la zone analysée, le CPC peut être utilisé comme une bonne source de données de grille pour les régions où il n'y a pas de station météorologique, comme c'est le cas dans les régions du Paraguay et de l'État du Mato Grosso do Sul; appartenant à la zone de contribution du lac Itaipu.

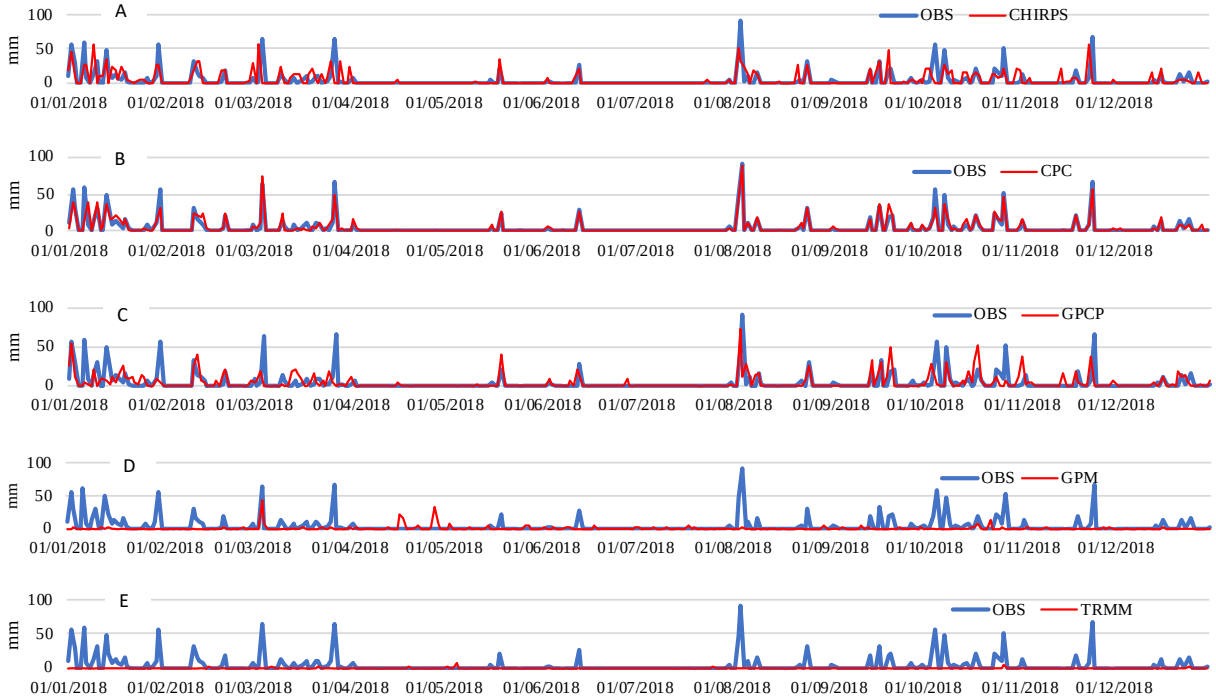


Figure 1. Données observées à la station et au réseau de Londrina pour l'année 2018. A) CHIRPS; B) CPC; C) GPCP; D) GPM; E) TRMM

Pour représenter l'association entre les ensembles de données de la grille et les données observées, des graphiques ont été élaborés en chevauchant ces informations pour l'année 2018 (Fig.1). Les résultats pour la station de Londrina ont été utilisés comme exemple, car ils ont obtenu les valeurs de corrélation linéaire les plus élevées avec les données observées et l'erreur quadratique moyenne la plus faible pour le CPC (1B). Il convient de mentionner que la variation des données CPC diffère de CHIRPS (1A) et GPCP (1C), qui n'ont pas de tels résultats coïncidents. Mais ils soulignent des similitudes considérables qui permettent son utilisation. Quant aux données GPM et TRMM, qui sont des données satellitaires, elles ne représentent pas ce qui a été observé à Londrina en 2018, reflétant les résultats de la corrélation et de la régression linéaire presentes (1D et 1E). Tous les ensembles de données de grille analysés ont des difficultés à atteindre les valeurs observées, comme on peut le voir au mois de janvier. Pour ce mois, les valeurs CPC sont proches de celles observées; en dépit d'être plus petit et déplacé dans le temps en quelques jours. Cependant, pour les chiffres d'août et d'octobre, il apparaît que la CPC produit des données similaires à celles observées; mais sous-estimé.

Conclusion

Après avoir analysé les ensembles de données de grille disponibles avec les données pluviométriques quotidiennes observées, le CPC a été identifié comme le meilleur à utiliser pour les zones qui n'ont pas de données pluviométriques quotidiennes enregistrées dans le bassin de contribution du lac Itaipu. Le CPC a présenté des résultats qui montrent une forte

association avec les données observées dans neuf stations météorologiques situées dans l'État du Paraná, probablement parce que c'est une zone à forte densité de stations météorologiques qui fournit à l'algorithme plus d'informations pour calculer les valeurs journalières des précipitations.

Remerciements

Au *Núcleo de Inteligência Territorial do Parque Tecnológico de Itaipu (NIT/PTI*) pour le financement de la recherche et le partage des données.

Bibliographie

Araujo S.R., Sanches F.de O. & Ferreira R.V. 2012. Metodologia para validação de dados TRMM para Uberaba (MG). *Entre-Lugar*, 8 (16), 131-141.

Berman F., *et al*., 2001. The GrADS Project: Software Support for High-Level Grid Application Development. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, *15*(4), 327–344. Doi: https://doi.org/10.1177/109434200101500401.

Chen M., Shi W., Xie P., Silva V.B.S., Kousky V., Higgins R.W. & Janowiak J.E. 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analysis of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research*. 113, D04110.

Funk C., *et al*., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Nature Scientific Data*. Doi: 10.1038/sdata.2015.66.

Gulizia C. & Camilloni I., 2015. A spatio-temporal comparative study of the representation of precipitation over South America derived by three gridded data sets. *International Journal of Climatology* (short communication), published online in Wiley Online Library. Doi: 10.1002/joc.4416.

Limberger L., Ely D. F., 2019, Régionalisation des précipitations dans l'état du Paraná (Brésil) em lien avec la température de surface de la mer. *Acte du Colloque XXXIIe de l'Association Internationale de Climatologie*, Thessalonique, 493-498.

Limberger L. & Silva M.E.S. 2018. Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da Reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 20-37.

Nasa. National Aeronautics and Space Administration. 2020. *Precipitation Measurement Missions*. URL: https://pmm.nasa.gov/precipitation-measurement-missions. Accessed in February 06 2020.

Pendergrass A. & NCAR Staff (eds.). 2016. *The Climate Data Guide: GPCP (Daily): Global Precipitation Climatology Project.* URL : https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-daily-global-precipitation-climatology-project. Accessed in February 06 2020.

Silva C.B., Silva M.E.S., Ambrizzi, T., Tommaselli, J.T.G., Patucci, N.N., Mataveli, G.A.V., Lima, B.S., Correa, W.C. 2019. Precipitação na América do Sul – dados obtidos em estações meteorológicas automáticas e sistemas orbitais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, 54-79.

Teegavarupu, R.S.V., 2012. *Floods in a changing climate*. Cambridge, Cambridge University Press, 269p.

IMPACTS DES FORTES PLUIES ET GESTION DES RISQUES NATURELS DANS LA VILLE DE CASABLANCA : CAS DES INONDATIONS DE 2010

LOTFI N.[1], BOUAICHE A.[1], KARROUK M.S.[1], CHAIR M.[1], BENTALEB H.[1], TNOURJI H.[2]

1 Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagements Territoriale (LCEAT), Université Hassan II, Casablanca, Maroc (Nidal.lotfi86@gmail.com ; Bouaiche.aissam.uh2.lceat@gmail.com)
2 Laboratoire « Géographie, Aménagement, Démographie, Développement (GEAMDD) », Université Ibn Zohr Agadir, Agadir, Maroc (Tnourjihasna@gmail.com)

Résumé : *La ville de Casablanca est considérée parmi les villes du Maroc les plus exposées aux effets du changement climatique. En effet, elle a subi cette dernière décennie plusieurs inondations importantes, ce fut le cas en novembre 2010, avec un pic de 118 mm de pluie, soit la pluie d'une demi-année, et cela revient principalement aux conditions climatiques ainsi que topographiques, géologiques, géomorphologiques. A cet effet, l'objectif de cet essai vise à analyser les évènements pluviométriques extrêmes et leurs relations avec les inondations urbaines à Casablanca, afin de tester l'hypothèse que les inondations sont plus liées aux défaillances dans l'aménagement urbain qu'aux précipitations extrêmes. En se basant sur plusieurs indices pluviométriques, des tendances temporelles vont être analysées. Par ailleurs et après plusieurs tests, on a trouvé que la loi Gumbel est la plus adaptée aux précipitations annuelles de Casablanca. Les résultats obtenus révèlent que les pluies extrêmes sont parmi les principaux facteurs causant des inondations à la ville de Casablanca.*

Mots clés : *inondations ; gestion des risques ; précipitation ; Casablanca ; Maroc*

Summary: ***Impacts of heavy rainfalls and natural risk management in the city of Casablanca: case of the 2010 floods.*** *The city of Casablanca is considered among the cities of Morocco most exposed to the effects of climate change.Indeed, it has suffred several major floods in the last decade, this was case in November 2010,with a peak of 118 mm of rain , meaning the half-year rain and this mainly due to climatic condition in first place and topographical,geological, geomorphological in second place. This study aims to analyze extreme rainfall events and their relationships with urban floods in Casablanca as an exemple , in order to test the hypothes is that floods are more linked to failures in urban planning than to extreme precipitation . based on several rainfall indices, temporal trends will be analyzed. In addition and after several test, we found that the Gambel Law is the main factors causing floods in the city of Casablanca.*

Key words: *flood; risk management; precipitation; Casablanca; Morocco*

Introduction

Selon Sebbar *et al*. (2012), l'évolution générale du climat lors du 20[ème]siècle, au moins dans sa deuxième moitié, montre un changement avec des tendances au réchauffement. Le changement climatique (CC) devrait aggraver le stress hydrique, contribuer à la dégradation des écosystèmes et accentuer la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, en particulier les sécheresses et les inondations. Également, l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, aura des impacts graves sur le littoral, les écosystèmes côtiers, les ressources naturelles et les infrastructures côtières.

La Région de Casablanca a subi les conséquences du CC, elle a toujours été confrontée à de multiples risques naturels, en particulier les inondations dont les coûts sont parfois très élevés. Les mutations qu'elle connaît actuellement (urbanisation, littoralisation, concentration des activités et de la population) amplifient sa vulnérabilité à ces risques et aggravent leurs impacts. La conception d'une nouvelle stratégie plausible et opérationnelle pour faire face aux effets du CC doit être une priorité pour les gestionnaires du territoire Casablancais afin de renforcer sa résilience (Hountondji *et al*., 2011).

L'objectif principal de ce travail est d'analyser les événements pluviométriques journaliers de la série chronologique de 1976 à 2016 de la station synoptique de Casablanca d'une part, et

de tester d'autre part, l'hypothèse selon laquelle les inondations sont plus liées aux défaillances dans l'aménagement urbain qu'aux précipitations extrêmes.

1. Données et méthodologie de l'étude

1.1. Source de données

Dans cette étude, on s'est reposé sur les données pluviométriques journalières de la série chronologique de 1976 à 2016 en particulier les données pluviométriques constituées des hauteurs de pluie quotidiennes de l'année 2010, enregistrées dans la station synoptique de Casablanca fournies par la Direction Nationale de la Météorologie (DMN). En revanche, pour l'étude de la circulation atmosphérique on s'est basés sur l'analyse des cartes météorologiques marocaines et européennes. Ces cartes sont disponibles sur plusieurs sites web notamment : www.wetter3.de, www.wetterzentrale.de.

1.2. Présentation de la zone d'étude

Casablanca est la capitale économique du Maroc. Elle est située sur la côte atlantique, au nord-ouest de l'Afrique (Fig.1) à 33° 57' latitude Nord et 7° 67' longitude Ouest. Son littoral s'étend sur plus de 50km. Le secteur d'étude est limité au Nord, par l'Océan Atlantique, à l'Est, par les plateaux de Benslimane et au Sud et à l'Ouest, par les riches et fertiles plaines de la Chaouia. Mais, les reliefs sont très peu accidentés, d'une pente de 2° en moyenne descend tout doucement vers la mer.

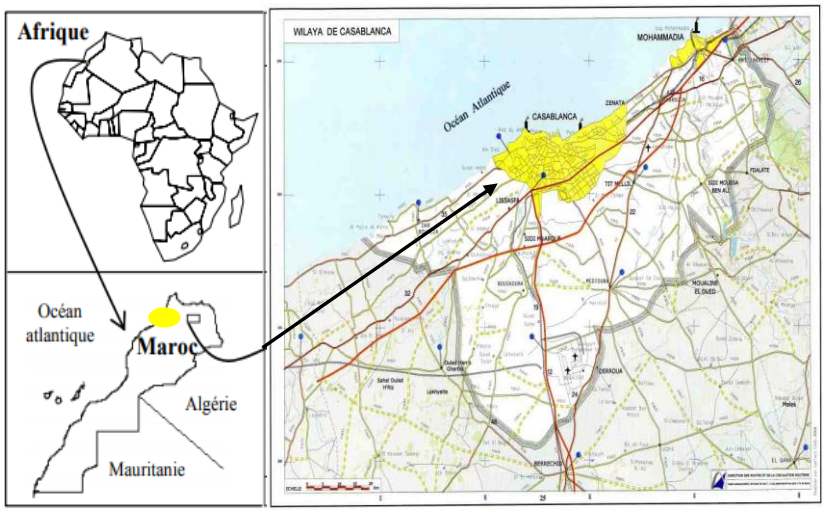


Figure 1. La situation géographique de la zone d'étude (Casablanca)

1.3. Méthodologie

La méthodologie adoptée, pour étudier la problématique de la gestion des risques naturels notamment les inondations à la ville de Casablanca pendant l'année 2010, est basée sur deux méthodes :

- Analyse des cartes météorologiques notamment de l'année 2010 ;
- Traitement des données des précipitations enregistrées au niveau de la station synoptique de Casablanca à l'échelle annuelle, par Excel pour extraire les différents graphiques représentatifs et les analyser par la suite (Bouaiche et Karrouk., 2016).

2. Résultats et discussion

La deuxième moitié du mois de Novembre 2010 (29-30) se présente, comme la phase qui a

enregistré, les plus fortes menaces pour la population à cause des fortes chutes pluviométriques qui ont frappé la ville de Casablanca. L'analyse des situations relatives à cette période s'avère nécessaire pour comprendre l'origine de ces états pluviométriques extrêmes.

2.1. Analyse des situations synoptiques et isobariques du 29-30 novembre 2010

La carte de la surface isobarique 500hPa (Fig.2) montre le *29 et 30 novembre une* forte ondulation du flux au Nord du parallèle 35°N (situation on Oméga « & : type de circulation atmosphérique méridienne CAM»). Le Nord du pays (Tétouan et Al Hoceima) et le centre (Rabat, Casablanca et Mohammedia) sont touchés par l'extrémité sud d'un talweg continental (Fig.2, 3) (Janati et Hanchan., 2010). Le 29 novembre 2010, le pays se trouve au sol sous l'influence d'un flux perturbé de nord-ouest commandé par une dépression profonde se dirigeant du Golf du Cadix aux iles Baléares (Fig.2, 3). Les jours suivants, une goutte froide s'est détachée de la coulée froide de l'altitude. Celle-ci dirige avec la dorsale orientale un flux de direction Ouest à sud-ouest sur le Maroc (Janati et Hanchan., 2010). Au sol, la dépression centrée sur la péninsule Ibérique dirige un flux perturbé et instable avec une advection d'air froid et humide responsable du soulèvement de l'air chaud (Fig.3), véhiculé par la branche orientale de la vallée d'altitude. Le 30 novembre2010, une poussée de l'aire polaire maritime s'est traduite par l'advection d'un front froid vers le Sud sur l'océan proche (Fig.2, 3).

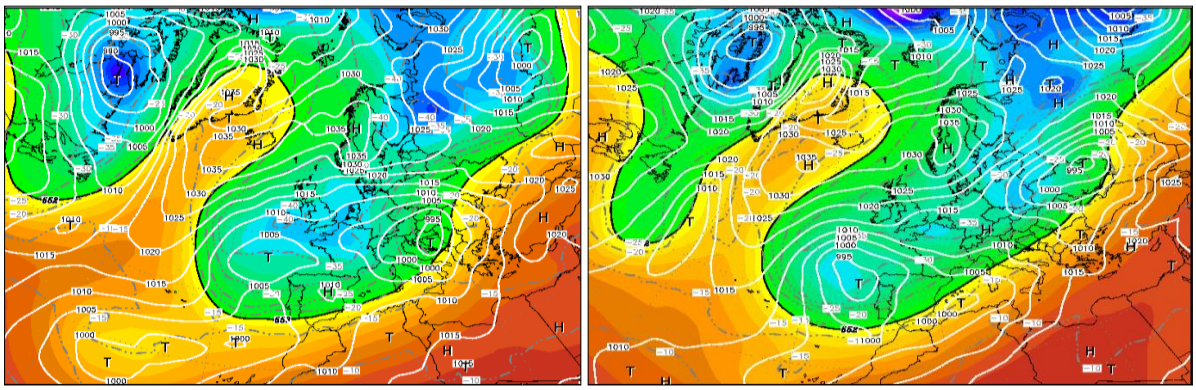


Figure 2. Carte de situation synoptique à 500 hPa. A gauche 29.11.2010 à 0 UTC ; à droite 30.11.2010 à 0 h UTC (Source : www.wetterzentrale.de)

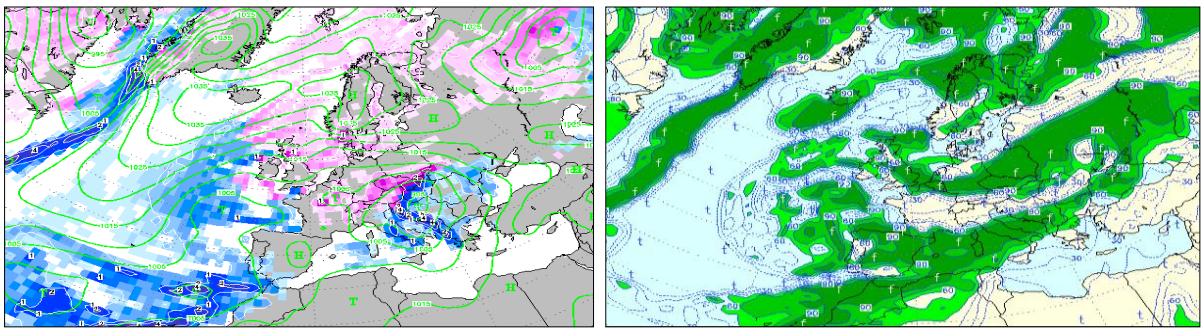


Figure 3. Carte de situation isobarique au sol le 29 novembre 2010 à 0h UTC (à gauche) et d'humidité relative à 750 hPa le 30 novembre 2010 à 0h UTC (à droite) (Source : www.wetter3.de)

2.2. Les risques produits par les intempéries du mois de novembre 2010

La ville de Casablanca a connu en 2010 une pluviométrie importante (574 mm) qui est élevée par rapport à la moyenne interannuelle (386.5 mm) avec une différence de 187.5 mm (Fig.4), en enregistrant des précipitations excédentaires sur la quasi-totalité des villes du royaume (Hangnon *et al.*, 2015). Ces précipitations ont été concentrées sur les mois de janvier (131.6mm), octobre (99mm), novembre (118mm) 2010 (Fig.5).

La situation météorologique au début du mois de Novembre de 2010 a été marquée par l'enregistrement des pluies record sur les régions orientales et méridionales du Maroc. Mais la station de Casablanca a enregistré seule 38.6mm dans 24 heures.

Les hauteurs maximales journalières relevées vers la fin du mois de novembre 2010 ont atteint des valeurs très importantes au niveau de Casablanca, avec un maximum de 39.1 mm le 29 novembre et 40.3 mm le 30 novembre 2010.

Cependant entre le 29 et 30 novembre, la ville de Casablanca et son arrière-pays, ont connu des fortes précipitations accompagnées de vents forts et de grêle, ce qui a engendré d'énormes inondations dans le centre de la ville (Fig.6). Dimanche soir, pendant la nuit de lundi à midi sont tombés 79.4mm de pluies.

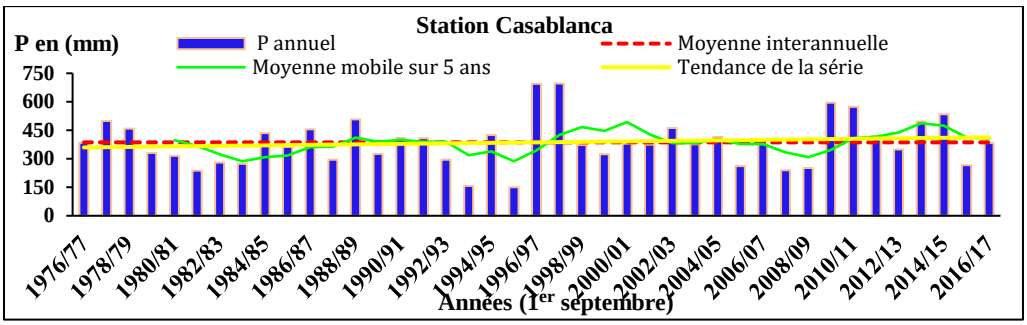


Figure 4. Précipitations annuelles de la station de Casablanca 1976 – 2016par rapport à la moyenne interannuelle et mobile sur 5 ans, ainsi que la tendance linéaire (Source : DMN)

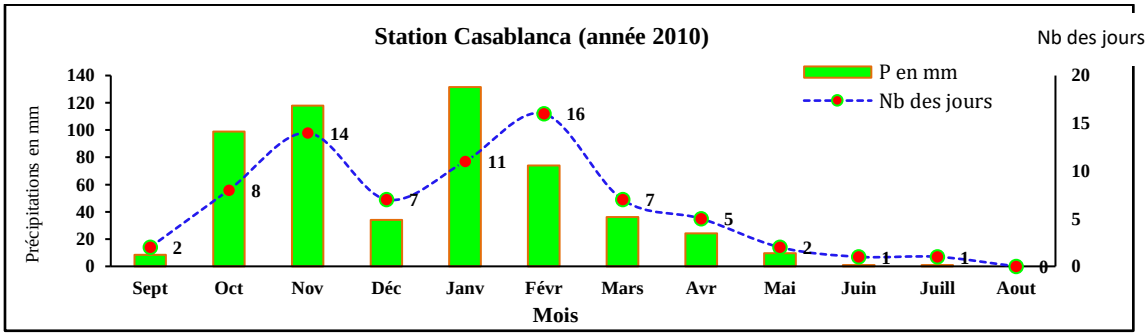


Figure 5. Précipitations mensuelles et nombre des jours de pluie à Casablanca durant l'année 2010 (jour de pluie > = 1mm) (Source : DMN)

Figure 6. Paralysie de la route Hassan II (Boulevard Sidi Mohammed Ben Abdellah) (à gauche) et effet des crues du 30.11.2010 (Boulevard Zerktouni Casablanca) (à droite) (Source : https://www.yabiladi.com/)

2.3. Analyse fréquentielle des précipitations annuelles de la station Casablanca 1976-2016

Pour détecter la répartition de ces valeurs pluviométriques (El Ghachi *et al.*, 2011), nous avons essayé une analyse fréquentielle en testant plusieurs lois (à titre d'exemple : Gumbel, Weibull et Ln-normal), afin de déterminer celle qui s'ajuste au mieux avec les valeurs

pluviométriques de la station de Casablanca, soit pour l'année 2010 en ce qui concerne les pluies annuelles. Après plusieurs tests, on a trouvé que la loi Gumbel est la plus adaptée aux précipitations annuelles de Casablanca (Fig.7).

Les totaux annuels enregistrés sont reportés sur la figure 7 en fonction des fréquences obtenues. On note principalement une bonne distribution des points autour de la droite (Fig.7), y compris les années extrêmes. Les maximums de ces hauteurs pluviométriques se situent sur le haut de la droite avec une distribution qui ressemble à une forme « S ». L'année la plus humide est l'année 2010, 695.8 mm (vers la droite). En bas de la droite on note les années sèches qui se caractérisent par leurs faibles hauteurs. L'année la plus « sèche » de l'échantillon est l'année 1995, avec 200 mm (vers la gauche).

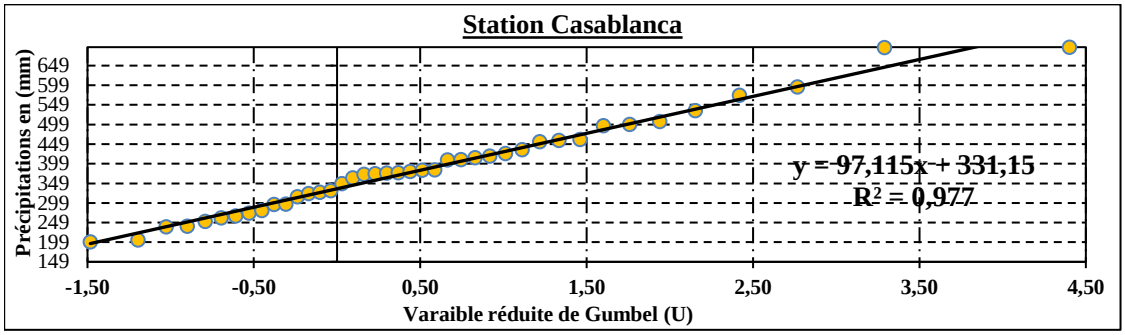


Figure 7. Ajustement des précipitations de Casablanca à la loi Gumbel 1976-2016

Le calcul des fréquences d'apparition des pluies annuelles fournit des indications intéressantes pour les gestionnaires de l'aménagement. Le Tableau 1 présente les résultats obtenus portant sur les précipitations annuelles équivalentes à de différentes fréquences et temps de retour à la station de Casablanca. Ces résultats montrent que la moyenne de la période 1976-2016 (348.7mm) correspond à une fréquence 1/2 (Tab.1). La valeur maximale (695.8 mm, de 2010) correspond à une fréquence de 1/100. Donc pour les inondations déclenchées à Casablanca par les précipitons moyennes (348.7mm) il faut noter qu'elles vont apparaitre tous les deux ans.

Tableau 1. Les précipitations annuelles avec différentes fréquences/périodes de retour à Casablanca 1976-2016

Fréquence	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
Temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Précipitations (mm)	348.7	383.9	434.9	496.5	574	695.8

2.4. Problématique de la gestion des risques naturels :

Les inondations du mois de novembre 2010 ont coûté à la capitale économique des dégâts conséquents et ont dévoilé l'inadaptation de l'infrastructure existante, ainsi que des insuffisances sur le plan institutionnel, technique et organisationnel afin de faire face à des catastrophes d'une telle ampleur.

Le problème fondamental de la politique de gestion des risques naturels à Casablanca, en particulier les inondations est « la réaction au lieu de la pro-action et de la prévention ». Les investissements en prévention sont très limités ce qui rend la phase « gestion d'urgence » lourde en terme de budget ; l'enjeu clé de la prévention des risques naturels concerne les questions de la planification urbaine, de l'aménagement du territoire et de l'utilisation des sols.

Effectivement, l'urbanisation croissante génère de nouveaux risques, notamment en lien avec l'habitat informel et le manque d'infrastructures de base.

En revanche, l'intégration des effets du CC et de la gestion des risques naturels dans les politiques, les programmes et les travaux pertinents, nouveaux ou en cours, en particulier les processus et les stratégies de planification du développement, renforcera la résilience du territoire face aux catastrophes naturelles. Il est devenu indispensable de prendre en considération les risques liés au CC en amont de toute planification stratégique si les gestionnaires du territoire veulent remédier de façon systématique et sur le long terme aux vulnérabilités dans différents domaines. Ils doivent alors tendre vers une culture qui anticipe les risques naturels provoqués par le CC.

Conclusion

Le 29 et 30 novembre 2010, la ville de Casablanca a enregistré les plus grands excédents pluviométriques depuis 30 ans selon la DMN. Des pluies record ayant causé des inondations graves et des dégâts humains et matériels considérables, ont été enregistrés en particulier au Nord et au Sud de la ville. Les conséquences de cette abondante pluie sont évidemment bénéfiques pour le secteur agricole mais leur intensité et leur concentration temporelle peuvent engendrer des risques majeurs liés aux inondations, dans plusieurs sites, aux glissements des terrains et l'effondrement des maisons anciennes suivit de conséquences psychologiques sur la population sinistrée.

Remerciements

Les auteurs remercient le comité scientifique du 33ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (AIC'2020 Rennes France) en particulier le professeur Liliana ZAHARIA pour l'évaluation de cet article avec ses remarques et réflexions pertinentes.

Bibliographie

Bouaiche A., Karrouk M. S., 2016. Situations météorologiques extrêmes générant les inondations dans le bassin versant d'Inaouene (Maroc septentrional). Volume 31 n°1, *Actes du colloque organisé par l'Association Nationale des Géographes Marocains*, Rabat, Maroc, 29-30 mai 2015, 81-94.

El Ghachi M., Aafir M., Bouberria A., Qadem A. 2011. Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Taza dans un contexte de variabilité climatique. Colloque international de Taza le 13 et 14 avril 2011 - Taza et son arrière-pays : ressources territoriales et perspectives du développement durable, Taza, Maroc, 1-16.

Hountondji Y.C., De Longueville F., Ozer P., 2011. Trends in extreme rainfall events in Benin (westAfrica), 1960-2000. *Proceedings of the first international conference on energy, environment and climate change*, 26-27 august 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. URL: http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112.

Hangnon H., De longueville F., Ozer P., 2015. Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbaine et mal maitrise. *Actes du XXVIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 2015, Liège, Belgique, 497-502.

Janati I.A., Hanchan M., 2010. Type de circulations atmosphériques à l'origine des risques climatiques majeurs au Maroc entre septembre 2008 et novembre 2010. *Actes du XXIVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 2010, Rennes, France, 339-344.

Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H., Badri W., 2012. Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. Actes du XXVème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 2012, Grenoble, France, 709-714.

Webographie

www.wetter3.de ; www.wetterzentrale.de

Source des cartes météorologiques : https://www.yabiladi.com/

UN NOUVEAU « BAROMETRE » DES EVENEMENTS CANICULAIRES ?

MADELIN M.[1], DUPUIS V.[2]

1 Université de Paris (Paris-Diderot), UMR 8586 PRODIG, Paris, France (malika.madelin@u-paris.fr)
2 Sorbonne Université, UMR 8234 PHENIX, Paris, France

Résumé : *La France a connu un été 2019 particulièrement caniculaire, avec plusieurs records thermiques battus. Cette communication propose d'explorer les événements caniculaires sous l'angle des réseaux sociaux, en prenant l'exemple de Twitter. Nous reviendrons sur la méthodologie de collecte des données, sur leur dimension temporelle et plus rarement spatiale. L'analyse temporelle des tweets « canicule » (dynamique temporelle sur 2014-2019) montre globalement un lien avec les données météorologiques, même si cet été présente un emballement sur le sujet. L'analyse sémantique fait ressortir plusieurs champs lexicaux selon une typologie des communicants et relais (communication institutionnelle, impressions et ressentis des individus, etc.). Enfin, une analyse géographique, qui se révèle assez pauvre sur ce type de données, montre une sur-représentation des agglomérations françaises. En d'autres termes, cette communication souhaite explorer comment la société, ici à travers le prisme Twitter, reçoit, perçoit et communique l'information sur la canicule, au-delà des relevés météorologiques.*

Mots clés : *canicule ; réseaux sociaux ; Twitter ; analyse temporelle ; analyse sémantique*

Summary: ***Twitter, a new "barometer" of the extreme high temperature events?*** *France has experienced a particularly hot summer in 2019, with several broken records for the maximum temperatures. This communication aims at exploring how heat waves are represented in social networks using the example of Twitter. We will describe the methods used to collect data and discuss its temporal and spatial resolutions. The temporal analysis of the tweets mentioning the term "canicule" (for the period 2014-2019) shows quite generally a relationship between weather data and tweets, even if summer 2019 singles out with a kind of runaway on the subject. The semantic analysis highlights several lexical fields according to a typology of communicants and relays (institutional communication, people's feelings, etc.). Lastly, a geographical analysis, that proves itself quite poor on this type of data, shows an over-representation of the French cities. In other words, this communication aims at exploring how society, here through the prism of Twitter, receives, perceives and communicates information regarding heat waves, beyond weather data.*

Key words: *heat wave; social networks; twitter; temporal analysis; semantic analysis*

Introduction

La France a connu un été 2019 particulièrement caniculaire, avec plusieurs records thermiques battus, mais aussi une communication accrue sur les réseaux sociaux, relevée par la presse. Cette communication propose d'explorer comment la société, ici à travers le prisme du réseau Twitter, reçoit, perçoit et communique l'information sur la canicule, au-delà des relevés météorologiques.

Twitter est un réseau social de microblogage où des utilisateur·trice·s (des personnes ou des robots) envoient des textes courts, avec des liens vidéo, image ou adresse url de page web, quasiment exclusivement de manière publique. Il permet de s'exprimer, d'informer, d'interpeller, d'envoyer des ressources, de réagir à un autre message, etc. Le nombre de comptes actifs par mois a augmenté depuis sa création en 2006 et a tendance à stagner depuis fin 2014 autour de 300-340 millions (Statistica, 2019-2020). Dans le monde académique, le réseau social Twitter est utilisé pour la détection de catastrophes et d'événements extrêmes (Earle *et al.*, 2012), dans la gestion de crise et post-crise (Guan et Chen, 2014 ; Kryvasheyeu *et al.*, 2016), pour l'analyse des opinions (Kirilenko, Stepchenkova, 2014), etc., pour ne retenir que des exemples en environnement. Les avantages de Twitter souvent mentionnés sont l'accès plutôt ouvert aux informations, le volume des données produites témoignant d'une large audience (données massives) et la résolution temporelle (et notamment la possibilité de travailler sur le temps réel). Pour autant, il existe plusieurs biais de représentativité du public concerné.

L'analyse de ce réseau social permet ici de mesurer indirectement l'impact des canicules sur la société (Grasso *et al.*, 2017), Twitter s'apparentant alors à un réseau de « captation » d'informations données par les utilisateurs·trices, avec ici un engagement non explicite. Cette démarche, plutôt exploratoire, souhaite évaluer l'utilisation de ce type de données, de leur potentiel pour étudier les vagues de chaleur : Twitter peut-il être un baromètre/thermomètre ? qui tweete et sur quoi, en utilisant quel champ lexical ? est-ce un outil d'expression de son opinion, d'interpellation ou encore de communication sur les services climatiques ?

1. Données et méthodes

1.1. Les données du réseau social Twitter

Chaque message posté sur Twitter, appelé un *tweet*, contient plusieurs informations : l'utilisateur·trice (code, nom, libellé affiché), la date et l'heure, le contenu du tweet avec parfois des mots-dièses ou *hashtags* (pour mettre en valeur un contenu, créer un hyperlien), des émojis (pictogrammes utilisés pour exprimer une émotion, un objet, une action, …), le nombre de fois où le tweet a été aimé, retweeté, les liens vers des images et des pages web, et très rarement une localisation soit en coordonnées géographiques, soit en nom de lieu, etc. Pour constituer la base de données de tweets sur la canicule, nous avons récupéré les données issues de la plateforme web Twitter et plus précisément les tweets contenant le terme « canicule » (peu importe la casse). Ce terme pouvait être présent dans le nom de l'utilisateur, dans le contenu du tweet et parfois mis en valeur par un hashtag, en tant que tel #canicule ou combiné à une année #canicule2019. Cette démarche de requête textuelle et en français ne peut refléter l'ensemble des tweets sur le sujet et implique alors un biais, ici assumé. Nous avons sélectionné, pour cette communication, les tweets originaux (sans retweets) postés entre le 1/1/2014 et le 31/12/2019 (du fait du plus faible nombre de données avant 2014), ce qui représente un corpus « canicule » de 806 684 entrées. À titre de comparaison, deux autres jeux de données avec les termes « neutre » et « saperlipopette » (uniquement dans le contenu des tweets), choisis pour leur caractère neutre *a priori*, ont également été extraits, avec respectivement 455 083 et 44 260 tweets.

1.2. Les données climatiques

Associer un tweet à des données météo-climatiques n'est pas chose facile, compte tenu de la très faible part des tweets géolocalisés (dans notre corpus « canicule », seulement 3,9% des tweets ; souvent moins de 2% dans la littérature, par ex. Burton *et al*., 2012) et du décalage géographique (voire temporel) pouvant exister entre le contenu d'un message et le lieu où il est envoyé. Pour notre analyse, quelque peu exploratoire, nous avons retenu les données mensuelles de précipitations et de températures minimales (Tn) et maximales (Tx), de 2014 à 2019, pour une dizaine de stations de référence de Météo-France, ainsi que les données journalières pour l'été 2019 (JJA). Au final, compte tenu de la forte proportion de tweets localisés à Paris et en Île-de-France (respectivement 14% et plus de +42% des tweets géolocalisés « canicule » ; Fig.1C), nous avons principalement utilisé les données de la station de référence Paris Montsouris, de Météo-France. Nous avons défini classiquement les périodes de canicule (Météo-France, 2019), à partir des dépassements de seuils thermiques départementaux pendant trois jours et trois nuits (risque sanitaire et alerte vigilance) : en Isère, les seuils Tn et Tx sont fixés à 19°C et 34°C (cf. communication de Rome *et al.*, 2020 dans ce même volume) ; à Paris et proche couronne, à 21°C et 31°C.

2. Le réseau Twitter : un thermomètre pour déceler les périodes de canicule ?

La dynamique temporelle sur les réseaux sociaux, ici Twitter, témoigne des rythmes de vie des utilisateurs·trices (moins de tweets la nuit que le jour, en particulier en fin de journée). Au-delà du moment où on utilise un réseau social, l'envoi d'un tweet peut aussi correspondre à un événement temporel (*e.g.* commentaires sur une émission de tv), à une activité/action (*e.g.* dans les transports), voire à un flux d'envoi automatique (*e.g.* annonce journalière d'une revue de presse ou alerte d'une vigilance météorologique). En effet, la planète Twitter est peuplée de multiples robots.

L'analyse temporelle des tweets « canicule » de 2014 à 2019 montre clairement un rythme saisonnier avec une densité plus élevée de tweets en été (Fig.1A), à l'inverse des corpus « neutre » et « saperlipopette » révélant une stabilité dans le temps (avec une très légère tendance à la hausse pour le premier). L'été 2019 se démarque nettement, en particulier juin et juillet totalisant près de 23% et 16% de l'ensemble des tweets « canicule » (contre 1,4% si équirépartition mensuelle), soit plus d'un tweet sur trois. Puis viennent les mois de juillet 2015 avec 12%, de juin 2017 et d'août 2018 avec 7%… L'été 2018 ressort globalement moins que l'été 2015, alors qu'il est considéré comme plus caniculaire, d'après Météo-France (Météo-France, 2019), avec une intensité quasi similaire et une durée trois fois plus importante.

Pour approfondir l'étude de la relation entre températures et tweets sur la canicule, la Figure 1B montre les graphiques cartésiens croisant le total mensuel de tweets en fonction des températures mensuelles minimales et maximales. Il apparaît très clairement deux comportements différents : une activité sur Twitter peu intense avant deux seuils thermiques et ensuite une activité plus à très soutenue. Les seuils, ici à l'échelon mensuel, pourraient être fixés à 14-15°C pour les températures minimales et environ 25°C pour les maximales (non significatif avec les données de précipitations). Plus finement, pour l'été 2019, la Figure 1D montre la dynamique journalière des tweets « canicule », de ceux localisés autour de Paris (25km), ainsi que les températures minimales et maximales journalières à Paris Montsouris. Le signal autour de Paris est quasiment le même que celui du corpus, du fait que la forte dissymétrie géographique des tweets et de l'importance des tweets sur Paris (Fig.1C). Les deux pics des tweets correspondent aux deux périodes de fortes chaleurs de 2019, même si on peut s'étonner du faible nombre de tweets à d'autres moments, notamment à la fin de l'été. On notera également que les tweets sur la canicule ont légèrement précédé les très fortes chaleurs pour fin juin, alors que la correspondance temporelle est plus nette pour la canicule de juillet. La répétition des fortes chaleurs pourrait expliquer ce résultat.

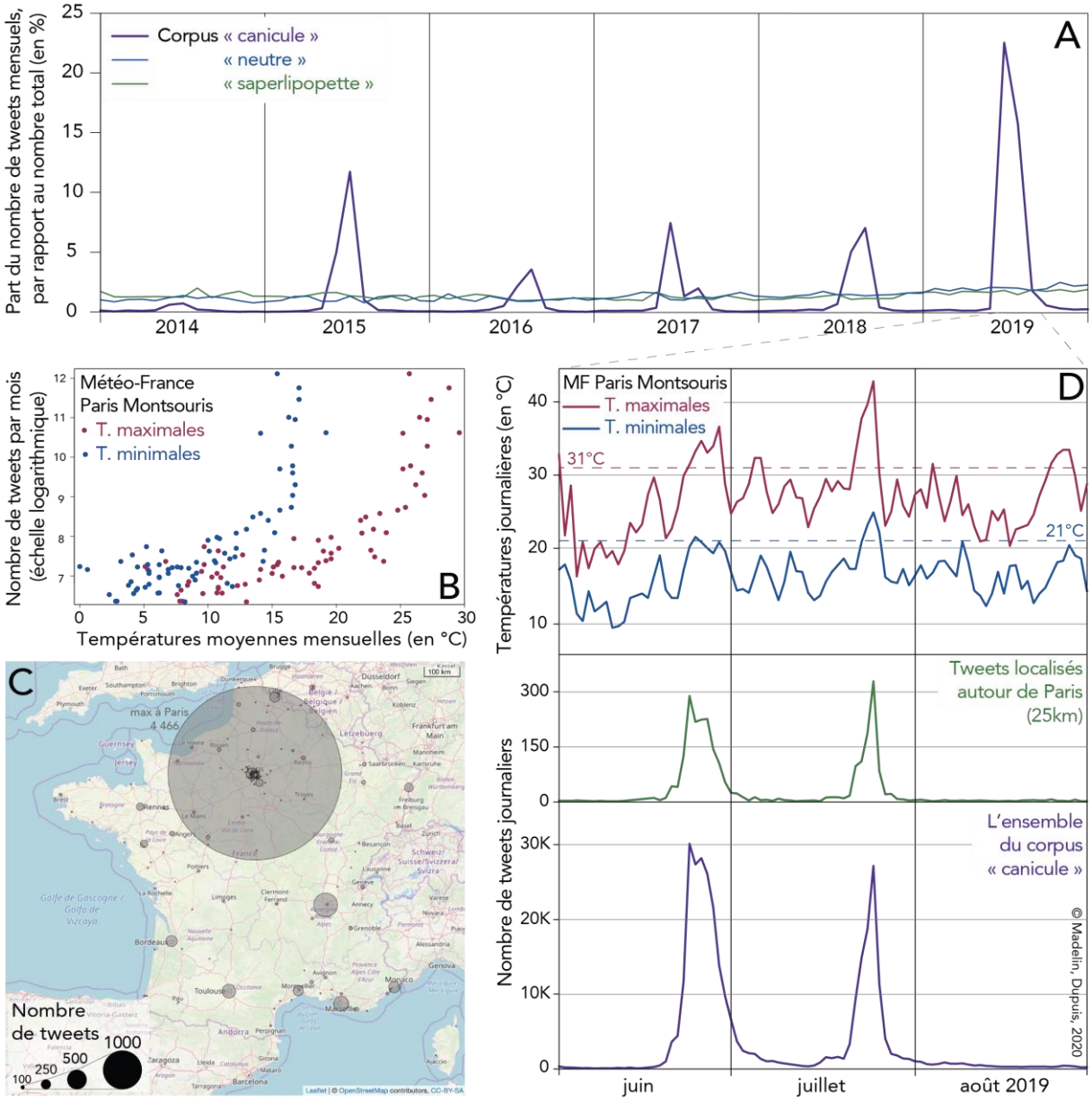


Figure 1. A/ Dynamique temporelle relative des 3 corpus, de 2014 à 2019, à l'échelon mensuel. B/ Graphique cartésien des températures mensuelles à Paris Montsouris en fonction de l'intensité de l'activité Twitter sur la canicule (2014-2019). C/ Répartition spatiale des tweets « canicule » de 2014 à 2019, zoom sur la France métropolitaine. D/ Zoom sur l'été 2019 avec les évolutions journalières des températures à la station de Météo-France Paris Montsouris, du nombre de tweets sur la canicule et de ceux localisés sur Paris. (Sources : données Twitter ; Météo-France ; Leaflet, contributeurs OpenStreetMap)

3. Qui tweete sur la canicule et avec quel contenu ?

Dans notre corpus « canicule », plus de 330 000 comptes différents ont envoyé entre 1 et 1 477 tweets, avec environ 2,4 tweets par compte (à titre de comparaison, 1,6 pour « saperlipopette » et 2,1 pour « neutre »). Parmi les principaux contributeurs, on dénombre des comptes spécifiquement sur la canicule (@stopcanicule, avec peu de *followers*, d'abonné·e·s), des robots peu influents sur les alertes météo (@devvigitwitdev ou @meteovigilance), des comptes d'information sur la météo avec souvent une forte influence (@lachainemeteo, @radiometeo, @meteovilles) ou encore des médias et agrégateurs de *news* (@w38777y, @bfmtv, @infosreg, @limportant_fr, @lapressefr, @le_parisien), plus rarement des passionné·e·s (@zehub). Les comptes de Météo-France, @meteofrance et @VigiMeteoFrance,

n'apparaissent respectivement qu'en 65[ème] position et surtout 1 131[ème] (*ex aequo* avec 39 autres comptes), peut-être en raison d'une trop grande prudence sur l'utilisation du terme.

Les contenus des tweets peuvent s'avérer pauvres pour une analyse sémantique, du fait de la restriction de la taille des messages (classiquement 140 caractères), du nombre d'abréviations, de mots d'argot et de fautes orthographiques. En prenant les *hashtags* témoignant d'une mise en valeur de terme(s) et du souhait de former des groupes de tweets, soit un échantillon de 36% des tweets, l'empreinte sémantique définie ici par les termes les plus fréquents (Fig.2) montre l'importance de la météo/climat (#chaleur, #météo, #orage, #heatwave, #soleil…) de la volonté de situer géographiquement son message (#paris, #france, #lyon, #bretagne…) et de l'alerte météo (#vigilanceorange, #vigilance, #alerterouge…), au-delà de l'importance -normale vue la collecte- des « canicule » (#canicule, #canicule2019 et #canicule2015).

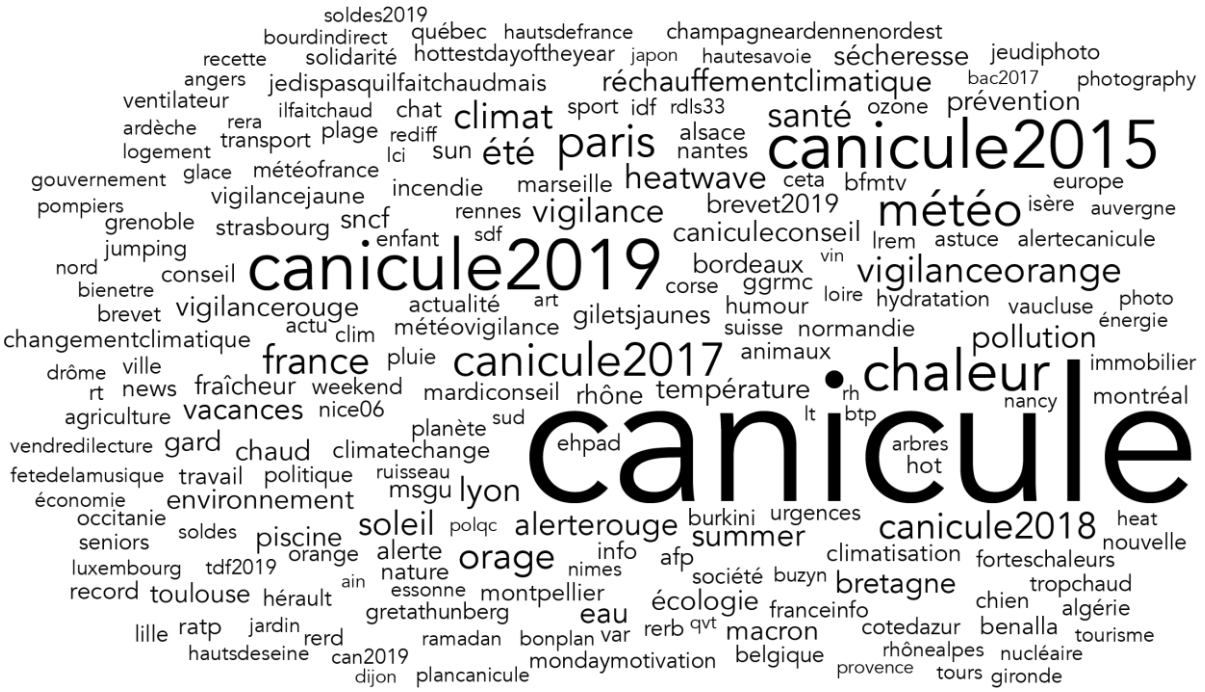


Figure 2. Empreinte sémantique des hashtags présents dans les tweets sur la canicule, de 2014 à 2019. La taille de la police des termes est proportionnelle à la racine de leur récurrence. (Source : données Twitter)

Les tweets contiennent aussi des émojis qui permettent d'exprimer des émotions, d'illustrer son message. La canicule semble provoquer plus d'émotions et d'illustrations (16% des tweets) que d'autres corpus, plus neutres (moins de 8% pour « neutre »), mais surtout des émojis peu fréquents habituellement apparaissent 🔥, 🌡, ☸, 🌬… (au-delà des « classiques » 😂, 😭, 😉…), avec une concentration estivale, surtout en 2019 (et dans une moindre mesure en 2018) : les mois de juin et juillet 2019 concentrent plus de 50% des émojis Thermomètre, plus de 42% pour le Feu et près de 40% pour le Soleil. Ces émojis relatifs aux fortes chaleurs sont souvent utilisés de manière répétée : par ex, un message avec 129 émojis Feu ; un autre avec 91 soleils, 6 têtes rouge en sueur et 5 gouttes d'eau ; ou encore « Cette après-midi à l'école #canicule on a atteint les 100°…. Fahrenheit », suivie de l'émoji Thermomètre répété 15 fois.

Une autre manière d'illustrer un tweet est d'associer une image (ou un montage d'images), environ 17% des messages. Nous avons analysé une sélection aléatoire sur l'été 2019 (JJA) de 678 images (soit 10% de l'ensemble) : plus de 60% peuvent être directement reliés aux fortes chaleurs. Sur ces dernières, près de 40% des images sont des messages/cartes sur les fortes chaleurs : 18% de messages sur la canicule (dont 1/3 reprennent les affiches et flyers ministériels), 11% des cartes météo ou de vigilance, 8% des prévisions météo localisées

(d'applications de *smartphone*) ou des affichages de records thermiques. Les 60% restants sont principalement des photos de paysages (avec des surfaces en eau, des paysages végétalisés, ombragés, des ciels et soleils…) et des images/dessins/photos clairement liés à la chaleur (autour de l'hydratation corporelle, des boissons, de la ventilation/climatisation, de la glace). Nous pensions retrouver une forte proportion de photos de thermomètre, comme l'annonçait le média CNEWS (CNEWS, 2019) : « Alors que la canicule s'est installée depuis quelques jours en France, Twitter a été envahi par les photos de thermomètres de certains internautes. » Ce ne fut pas le cas : environ 3% des images, en prenant en compte les thermomètres à liquide (symbolisés ou avec lecture des valeurs), ceux des pharmacies ou des voitures, etc.

Conclusion

Ce résumé de notre analyse exploratoire sur l'utilisation du réseau Twitter pour étudier la canicule a montré plusieurs résultats intéressants : la densité des tweets « canicule » suit globalement le dépassement de seuils thermiques, même si l'été 2019 présente un emballement sur le sujet ; les contenus des tweets montrent une utilisation de hashtags témoignant des fortes chaleurs, tout comme les émojis et images les accompagnant. Tout n'a pas pu être résumé ici, en particulier des analyses géographiques plus fines (utilisant les tweets géolocalisés et les noms de lieu en hashtags) et les différents champs lexicaux utilisés. Enfin, des nuances et réserves peuvent être apportées quant à notre entrée par le terme « canicule », la représentativité du monde Twitter pour décrire les canicules ou encore la complexité de la dynamique sociale créée par ce réseau.

Bibliographie

Burton S.H., Tanner K.W., Giraud-Carrier C.G., West J.H., Barnes M.D., 2012. Right time, right place" health communication on Twitter: value and accuracy of location information. *Journal of medical Internet research*, 14(6), 1–11.

CNEWS., 2109. La canicule vue par Twitter. [en ligne] Publié le 25/7/2019 sur le site web, URL : https://www.cnews.fr/france/2019-07-25/la-canicule-vue-par-twitter-863990 (Accès le 29 février 2020).

Earle P.S., Bowden D.C., Guy M., 2012. Twitter earthquake detection: earthquake monitoring in a social world. *Annals of Geophysics*, 54(6), 708–715.

Grasso V., Crisci A., Morabito M., Nesi P., Pantaleo G., 2017. Public crowdsensing of heat waves by social media data. *Advances in Science and Research*, 14, 217–226.

Guan X.Y., Chen C., 2014. Using Social Media Data to Understand and Assess Disasters, *Natural Hazards*, 74(2), 837–850.

Kirilenko A.P., Stepchenkova S.O., 2014. Public microblogging on climate change: One year of Twitter worldwide. *Global environmental change*, 26, 171–182.

Kryvasheyeu Y., Chen H., Obradovich N., Moro E., Van Hentenryck P., Fowler J., Cebrian M., 2016. Rapid assessment of disaster damage using social media activity. *Science advances*, 2(3), 1–11.

Météo-France., 2019. Canicules 2019 : la moitié de la France n'avait jamais eu aussi chaud !. Publié le 2/8/2019, dans la rubrique *Actualités*. [en ligne], URL : http://www.meteofrance.fr/actualites/74603888-canicules-2019-la-moitie-de-la-france-n-avait-jamais-eu-aussi-chaud (Accès le 29 février 2020).

Statista., 2019-2020. Twitter: Number of Monthly Active Users 2010-2019 ; Global social networks ranked by number of users 2020. [en ligne] Publiés respectivement les 14/8/2019 et 14/2/2020, sur le site web de Statistica, par J. Clement. URL : http://www.statista.com/statistics/282087/numberof-monthly-active-twitter-users/ ; https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/ (Accès le 29 février 2020).

ENTRE SOCIÉTÉ, VARIABILITÉS ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES : L'EXEMPLE DE L'ÉVOLUTION DU VIGNOBLE EN MAYENNE

MARCHAND J.-P, BONNARDOT V.

Laboratoire LETG-Rennes, Université Rennes 2, Rennes, France (jean-pierre.marchand@univ-rennes2.fr)

Résumé : *Jusqu'au XV[ème] siècle, pendant l'optimum médiéval, le climat permet en Mayenne l'existence de vignobles près des villes et des abbayes. Au XVI[ème] siècle, le climat encore clément autorise une certaine rentabilité. Aux XVII[ème] et XVII[ème] siècles, le PAG (hiver froids, printemps et été froids et humides) apparaît comme un facteur limitant pour une viticulture rentable sauf au SE. La fin des vignobles due à une aggravation du PAG se produit entre 1690 et 1750 sauf au SE. Le réchauffement climatique des XX[ème] et XXI[ème] siècles permettrait une viticulture sous réserve d'un changement des pratiques agricoles et de disponibilité du foncier.*

Mots clés : *climat ; vigne ; vignoble ; société ; Mayenne*

Summary: ***Between society, climate variability and climate change: study case of the vineyards'evolution in Mayenne*** *Until the 15th century, during the medieval optimum, the climate of Mayenne was suitable to the existence of vineyards near towns and abbeys. During the XVI[th] century, climatic conditions remained suitable for viticulture with some financial return. During the XVII[th] and XVII[th] centuries, the Little Ice Age (cold winters, cold and humid springs and summers) appears as a limiting factor for a profitable viticulture except in the SE. The end of grapevine growing due to climate worsening occurs between 1690 and 1750 except in the SE. Global warming of the XX[th] and XXI[st] centuries allow viticulture requiring a change in farming practices and land availability.*

Key words: *climate; grapevine; vineyard; society; Mayenne*

Introduction

Entre les variabilités climatiques et les systèmes socio-économiques se jouent, dans le temps long, de lentes modifications modifiant les systèmes vitivinicoles pouvant aller jusqu'à leur disparition. Le changement climatique actuel modifie la donne en amenant des conditions à nouveau favorables à l'arrivée de vignobles « nomades » (Aigrin *et al.*, 2019). L'évolution dans le temps long des vignobles du département de la Mayenne se situe dans la continuité de recherches en climatologie historique (Marchand *et al.*, 2011, 2015, 2016).

1. Les vignobles mayennais (1000-1789) : d'une viticulture de proximité au déclin et à l'abandon.

1.1. Le Moyen Âge : des vignobles mayennais prospères mais de qualité moyenne.

S'il est probable, ne serait-ce que pour les besoins du culte, que la vigne existait avant l'an 1000, c'est vers cette date que des actes de plantations seigneuriales (Couanier de Launay 1856 ; Pichot, 1995) mentionnent leurs présences. Dès le XI[ème] siècle, la mise en place progressive d'un réseau urbain (Laval est fondée en 1053) et donc d'une bourgeoisie urbaine, la fondation d'abbayes aux XI[ème] et XII[ème] siècles richement dotées par les seigneurs locaux, sont des facteurs qui ont favorisé le développement de vignobles. Daniel Pichot (1995) a dressé pour le XIII[ème] siècle une carte des mentions de vignes issues d'actes pour le Bas Maine dans les limites de l'évêché du Mans. C'est au sud, entre les rivières de la Mayenne et de la Sarthe (13 mentions), et autour de Laval (22 mentions) que l'on note les plus grandes concentrations. L'absence de mention au nord s'expliquerait par une plus grande rigueur climatique et par une forte densité forestière avant les défrichements médiévaux (Pichot, 1995). Les abbayes se constituent alors d'importants domaines viticoles, même si les curés ont souvent leurs propres vignes. Mais des nobles, telle la famille des Deux Évailles pas dupes de la qualité du vin, achètent des terres dans le sud en Anjou (Pichot, 1995). Le chenin blanc, appelé aussi en Mayenne pineau d'Anjou fait alors partie intégrante de l'économie rurale et des paysages Nord

Angevin et Bas Manceaux. La toponymie vini-viticole issue du dictionnaire historique de l'Abbé Angot (1900-1910) et de L. Maire (1840) concerne tout le département (101 communes sur 261). La vigne est présente quasiment partout avec un gradient de densité sud-nord lié au gradient climatique latitudinal. Un gradient secondaire E-W est visiblement dû à « l'effet de marche » avec la Bretagne qui aurait freiné les défrichements. Des vignobles péri-urbains ceinturent Laval (Pichot, 2007), Evron et Château-Gontier À Laval, outre les nombreuses communautés religieuses telle celle des chanoines de Saint-Thugal possédant huit vignes autour de Laval (La Bauluère, 1891), c'est l'existence même d'une ville nobiliaire et marchande enrichie par le commerce des toiles qui entraîne l'existence jusque vers 1550 d'un vignoble produisant un vin de proximité pour une consommation locale, de qualité assez médiocre, selon Guillaume le Doyen (GLD). (Marchand *et al.*, 2011-2016).

1.2. Déclin des vignobles de proximité

À partir de 1500, la diminution des surfaces en vigne devient sensible : GLD (1859) constate en 1514, que les vignes de Chanteloup près de Laval ont été converties en terres à blé. Dans les comptes de l'hôpital Saint Julien de Laval, on note en 1405 (Angot, 1889) une première mention de pommes à cidre et en 1626 les vignes de l'Hôpital ont toutes été bêchées pour faire place au froment et aux pommiers à cidre dans un bocage complanté marquant ainsi la lente agonie du vignoble local. Des vignes résiduelles seront encore signalées à Laval en 1697 (La Beauluère, 1891). À partir du XVI^{ème} siècle, la richesse de la bourgeoisie liée au commerce des toiles et à la Mayenne navigable depuis François I^{er} entraînent un approvisionnement en vin « buvable ». Il en va différemment dans le nord de l'Anjou d'où les vins sont « exportés vers le nord », et ce jusqu'au XVII^{ème} siècle. Le lin, plus rentable que la vigne, occupe désormais alors une grande partie de la SAU y compris dans le Craonnais jusque à la fin du XVIII^{ème} siècle. L'abbé Angot (1900-1910) a noté, pour toutes les paroisses de la Mayenne, les résultats de l'enquête sur l'occupation du sol diligentée par Miromesnil de 1690 à 1696. Les seules paroisses avec des surfaces conséquentes de vignes (50 à 700 arpents) sont situées au Sud-Est. Sur la carte de Cassini dressée entre 1771 et 1775, la vigne a disparu sauf à Saint-Denis d'Anjou où elle se maintiendra jusqu'à la crise du phylloxera. C'est donc au XVIII^{ème} siècle que s'est produit une deuxième bifurcation de la trajectoire viti-vinicole avec l'abandon quasi généralisé de la vigne en Mayenne (Gaugain, 1917), accéléré par l'édit de 1731 interdisant la plantation de vignes au bénéfice des céréales pour subvenir aux besoins vitaux de la population. La carte de l'État-major établie vers 1840 montre un statu quo. En 1835, on ne compte plus que 1300 ha de vignes en Mayenne et, en 1876, 400 ha produisant 4800 hl pour 400.000 ha de pommiers.

2. Évolutions multi-temporelles des relations vigne/climat de l'an 1000 à aujourd'hui

2.1. Au Moyen-âge : un climat non contraignant pour les vignobles

Pour le Moyen Âge, les seules sources disponibles sont les « calendriers agricoles » représentés sur des fresques du XIII^{ème} siècle dans des chapelles mais ne permettant pas une étude de la variabilité climatique. Cependant, les « vendanges en septembre » (Tab.1) suggèrent un climat proche de celui du XX^{ème} siècle, ce qui semble conforme aux estimations du GIEC, le climat du XX^{ème} siècle rappelant l'optimum climatique médiéval. En 1908, R. Musset, raisonnant sous l'hypothèse implicite de « stationnarité » du climat et ne connaissant pas le rôle du refroidissement dû au petit âge glaciaire (PAG), écrit à propos de la limite septentrionale de la culture de la vigne dans l'ouest de la France que *« le climat n'a pas changé »* et que si on *« faisait violence à la nature »* ce sont *« les conditions économiques et politiques qui forçaient à produire le vin sur place »*. On reconnaît le possibilisme de P. Vidal de la Blache (1903). En 1917, Musset écrivait que c'étaient *« les gelées de 1696-1697 qui sonnèrent le déclin continu*

de la vigne » mais à cette date le PAG était commencé depuis près d'un siècle et la vigne ne résistait plus que dans le SE.

Tableau 1. Travaux des champs sur des fresques du XIII[ème] siècle dans 3 chapelles siècle à Laval.

Chapelles / Mois	St-Pierre Le Potier	St-Martin	Pritz
Mars	Taille de la vigne	Taille de la vigne en échalas	Taille de la vigne en échalas
Septembre		Vendange	Vendange / Foulage
Octobre		Fabrication du vin	

E. Leroy-Ladurie (1967) a montré qu'à un optimum médiéval a succédé le PAG. Mais la Mayenne n'a pas de glacier et on ne dispose pas de chroniques de « bans de vendange » permettant de cerner les oscillations climatiques et il n'existe aucun document statistique. Les seules sources disponibles sont des extraits de livres d'heures et d'annotations sur des registres paroissiaux qui mettent plus l'accent sur les calamités que sur une la variabilité du climat. Cependant deux chroniques, celle de Guillaume le Doyen - GLD (La Bauluère, 1859) rédigée année par année de 1480 à 1517 et celle de Guittet de la Houllerie -GLH (Fizellier et Broussillon, 1886) allant de 1690 à 1775 permettent d'évaluer des variabilités pluriannuelles et les aléas de courtes durées affectant la vigne (Marchand *et al.*, 2015, 2016).

2.2. À la Renaissance : un climat peu favorable aux vignobles.

Pour la Renaissance on ne peut estimer la variabilité saisonnière qu'à partir d'interprétations de la qualité des récoltes de vin et de blé fournies par GLD sur 57 ans (Marchand *et al.*, 2016), soit l'équivalent de deux normales. Les séquences favorables à la croissance de la vigne sont surlignées en gris dans le tableau 2. GLD a cependant noté des aléas de courte durée (Tab.3) susceptibles d'avoir affecté les vignes à Laval (*1481*-1482-1486-1488-1490-1496-1505-1507-*1511*-1517-1519-1522-1523-1520-*1524*-1526-1535-1537 (les années *en italique souligné* sont celles où sont signalés le gel des ceps de vigne). Malgré les froids sévères, ces conditions climatiques sont acceptables pour une viticulture peu exigeante sur la régularité de la qualité du vin.

Tableau 2. Types de temps estimés d'après Guillaume le Doyen (1481-1537)

	HIVER	PRINTEMPS	ÉTE
SEC ET DOUX OU CHAUD	**14**	**33**	**35**
DOUX ET HUMIDE	**5**	**7**	**4**
FROID ET HUMIDE	**10**	**17**	**17**
FROID OU FRAIS ET SEC (1)	**13**	**4**	**1**
VARIABILITE OCEANIQUE	**5**		

Tableau 3. Aléas de courtes durées par saison indiqué par Guillaume le Doyen (1481-1537)

	GEL	GRÊLE	VENT	HUMIDE ET FRAIS	TOTAL
HIVER	**4**				**4**
PRINTEMPS	**2**	**2**		**4**	**8**
ETE		**1**	**1**	**5**	**7**
TOTAL	**6**	**3**	**1**	**9**	**19**

2.3. Aux XVII[ème] et XVIII[ème] siècles : un climat non compatible avec la viticulture

Les données sur le climat du XVII[ème] siècle en Mayenne sont rares, mais si on fait référence à la reconstitution du climat de l'Anjou par F. Lebrun (1971), qui relève les grands froids de 1608- 1615- 1660- 1709- 1729-1740- 1768 – 1789, il note cependant « *que le froid n'est pas le pire ennemi du viticulteur, un printemps pourri, un été froid et pluvieux sont autant de facteurs ruinant une récolte, la récurrence des années humides est plus crainte :1633- 1661-1682-1693-1709-1712-1713-1721-1725-1737-1740-1751-1758-1763-1768-1769-1782-1788*». Le tableau 4 ci-dessous les recense pour la Mayenne. Étant donnée la localisation septentrionale de la Mayenne par rapport à l'Anjou, il est probable que les ambiances climatiques y sont, à minima,

aussi rudes. Guittet de la Houllerie (GLH) a vécu à Laval les hivers froids de 1709, 1728-29, 1740, 1757, 1759-60, 1765-1767, 1771, 1776. Selon des mesures thermiques très fragmentaires, celui de 1776 était pire que ceux de 1740 et 1768, ceux de 1728 et de 1740 avaient la même intensité qu'en 1709 (Marchand *et al.*, 2016). GLH indique un seul gel des vignes, ce qui est peu par rapport à GLD 200 ans plutôt, mais est probablement dû à l'absence de vignes à Laval au XVIII^{ème} siècle.

Tableau 4. Aléas climatiques (type et nombre de cas) recensés aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles dans le département de la Mayenne à partir de la bibliographie (extraits de registres paroissiaux qui dépendent de l'intérêt du curé et de Lavallois aisés dans leurs livres de raison)

ALÉAS	Localisation	Années (XVII^{e} et XVIII^{e} siècles)	Nombre de cas
GRÊLE	Nord Maine	1711-1733-1735-1739-1751-1769-	6
	Centre	1670-1768-1769-1774-	4
	Anjou-Mayennais	1731	1
TEMPÊTE	Nord Maine	/	/
	Centre	1735-1768-1773	3
	Anjou-Mayennais	1751	1
GELEES	Nord Maine	1659-1685	2
	Centre	1773	1
	Anjou-Mayennais	1607-1615	2

Pour le XVIII^{ème} siècle à Laval, une interprétation mensuelle des types de temps a été réalisée à partir de descriptions uniquement climatiques données par GLH. Si on considère les mois d'avril à août (en référence à la période sur laquelle est calculé l'indice héliothermique d'Huglin) entre 1757 et 1776 (Tab.5), on note des printemps et des étés frais et humides non favorables à une culture pérenne de la vigne et surtout à sa viabilité commerciale. Ces variations climatiques sont conformes aux reconstitutions du GIEC dans la succession « optimum médiéval-PAG », avec des périodes de baisse de température internes au PAG qui se situeraient de 1530 à 1600, de 1660 à 1710 et de 1740 à 1800. C'est autant de baisses récurrentes sur une période multi-séculaire qui, en cas de destruction des vignobles par le gel, n'autorisent pas leur reconstitution. L'évolution climatique accompagne les modifications socio-économiques menant à un abandon rapide des vignobles y compris dans la partie angevine du département. GLD et GLH, malgré leurs longues vies pour l'époque, n'avaient ni le recul suffisant ni la mentalité pour envisager un changement climatique à long terme et ne constatent que ce qu'apportent leurs mémoires : une certaine stabilité autour d'un climat froid et humide.

Tableau 5. Nombre d'années d'avril à aout par type de temps. * Les données de septembre trop fragmentaires n'ont pu être prises en compte.

TYPES DE TEMPS	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre
TRES FROID	**2**	**4**	**2**			*
FROID	**1**	**1**	**2**	**1**		*
FRAIS	**1**	**1**				*
DOUX						*
CHAUD					**1**	*
CANICULE			**1**			*

2.4 Fin XX et XXI^{ème} siècles : changement climatique et renouveau potentiel de la vigne

A partir de la fin du XX^{ème} siècle, la hausse des températures devient significative et les conditions thermiques sont de plus en plus propices à la maturité de certains cépages comme le prouve l'évolution de l'indice héliothermique d'Huglin pour la viticulture (Fig.1). Les conditions thermiques actuelles de Laval (moyenne de la période 1991-2019) sont proches de celles d'Angers en moyenne sur la période 1961-1990. Par ailleurs, les projections de cet indice sur la région à moyen (2041-2070) et long (2071-2100) termes par rapport à la période de

référence 1950-2006 montrent respectivement un gain de 653 et 756 unités en considérant le scénario RCP4.5 et de 953 et 1152 en considérant le scénario RCP8.5 (Tab.6). Selon la classification climatique viticole (Tonietto et Carbonneau, 2004), la région passerait d'un climat « tempéré frais » à « tempéré chaud » à moyen terme selon le scénario RCP4.5 et à « chaud » dans les 2 cas avec le scénario pessimiste.

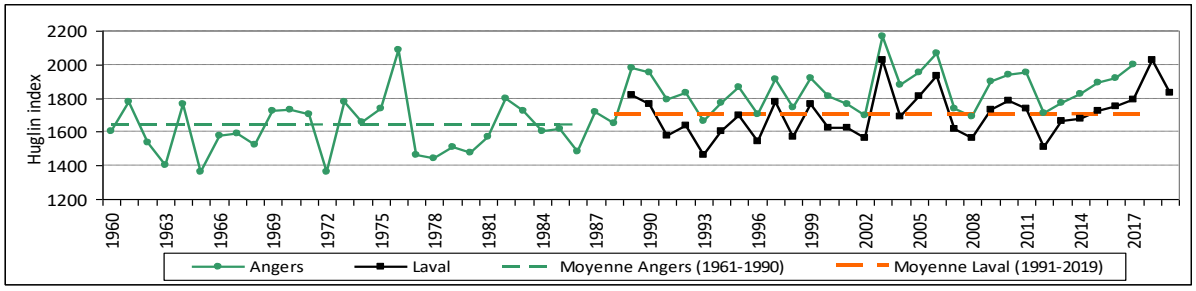


Figure 1. Indice héliothermique d'Huglin pour la viticulture calculée pour les stations de Laval (1988-2019) et Angers (1960-2019). (Source des données : Météo-France)

Tableau 6. Indice héliothermique d'Huglin et température moyenne annuelle (T) pour Laval : différences moyennes par rapport à la période de référence (1950-2006) à différents horizons (2041-2070 et 2071-2100) calculée à partir des projections issues du modèle CNRM-Aladin (source données http://www.drias-climat.fr/) pour les scénarios RCP4.5 (Forçage radiatif d'environ 4,5W/m^2 au niveau de stabilisation après 2100) et RCP8.5 (Forçage radiatif >8.5W/m^2 en 2100 avec une trajectoire croissante) (Moss *et al.*, 2010).

Périodes	**RCP 4.5**		**RCP 8.5**	
	Indice Huglin	Temp. Moy. annuelle (°C°)	Indice Huglin	Temp. Moy. annuelle (°C°)
2041-2070	+ 647	+ 1.4	+ 932	+ 2.7
2071-2100	+ 749	+ 1.9	+ 1130	+ 3.6

Ces conditions climatiques, du moins thermiques et au moins dans le sud du département, seraient favorables pour accueillir un « vignoble nomade », scénario d'adaptation de la viticulture au changement climatique qui consiste à une relocalisation voire une création de nouveaux vignobles par migration vers le nord (Aigrain *et al.*, 2019). Cependant, certaines contraintes subsistent. Les agriculteurs mayennais sont-ils prêts à diversifier leurs cultures avec de la vigne et à acquérir le savoir-faire nécessaire ? De même, avec la forte pression foncière, les candidats « nomades » trouveront-ils les terres nécessaires alors que les locaux tendent à vouloir agrandir la surface de leur exploitation ?

Conclusion

L'origine des vignobles mayennais est due à un environnement socio-économique nécessitant un vin de proximité dans un contexte climatique relativement favorable au Moyen Âge, d'où les vignobles périurbains. Des modifications économiques et sociales à la Renaissance, la qualité médiocre des vins locaux et la concurrence du cidre récolté dans des bocages complantés, ont entraîné le déclin des vignobles accompagné par un climat qui avait tendance à se détériorer en accentuant la variabilité interannuelle. Aux XVII[ème] et XVIII[ème] siècles, le climat froid et humide du PAG devient un facteur limitant à une production commerciale du vin et les vignobles disparaissent malgré une résilience dans le SE. À la fin du XIX[ème] siècle, les vignes résiduelles au SE sont détruites par le phylloxéra alors que le climat, se réchauffant, aurait pu sauver la pérennité des dernières vignes de Saint-Denis d'Anjou et par là servir de conservatoire pour une nouvelle aventure. À la fin du XX[ème] siècle et au début du XXI[ème] siècle, le climat rend possible la viticulture, sous réserve que les conditions socio-économiques soient réunies.

Bibliographie

Aigrain P., Bois B., Brugiere F., Duchene E, de Cortazar-Atauri I.G., Gautier J., Giraud-Heraud E., Hammond R., Hannin H., Ollat N. & Touzard JM., 2019. Using foresight exercise to design adaptation policy to climate change: The case of the French wine industry. *In proc. 41st World Congress of Vine and Wine*. BIO Web Conf (12), https://doi.org/10.1051/bioconf/20191203020, Punta del Este, Uruguay

Angot A.-V., 1889. *Le cidre son introduction dans le pays de Laval*. Fleury et Dangin, Mamers, 15p.

Angot A.-V., 1900-1910. *Dictionnaire historique, topographique et biographique de la Mayenne*, Goupil Laval.

Couanier de Launay S., 1856. *Histoire de Laval*. Mary-Beauchène éditeur, Laval, 608p.

De la Beauluère L.-J., 1971. La vigne cultivée dans les environs de Laval. *Annales et chroniques du pays de Laval depuis l'an 1480 jusqu'à l'année 1537*, publiés par M. Godbert. Réimpression Slatkine reprint de l'édition de 1859, 347-352.

De La Beauluère L.-J., 1891. Etude sur les communautés et chapitres de Laval. Société historique et archéologique du Maine). Moreau – Goupil. Laval. 391p. *Annales et chroniques du pays de Laval depuis l'an 1480 jusqu'à l'année 1537*. Publié par M. Godbert. Réimpression Slatkine reprint édition de 1859, 347-352.

Fizelier J., de Broussillon B., 1886. *Mémoire chronologique de Maucourt de Bourjolly sur la ville de Laval suivi de la chronique de Guitet de la Houllerie*, Laval, Moreau, tome II, 395p. [En ligne sur Gallica]

Gauguin F., 1917. « Situation économique et sociale du Bas Maine à la veille de la révolution ». *Bull commission archéologique et historique de la Mayenne*, t33 (15-33 et 140-159).

Le Brun F., 1971. *Les hommes et la mort en Anjou au XVIIème et XVIIIème*, Mouton Edition, Paris-La Haye, 562p.

Le Doyen G. 1859. *Annales et chroniques du pays de Laval depuis l'an 1480 jusqu'à l'année 1537*. Publiés par M. Godbert. Réimpression Slatkine reprint de l'édition de 1859, 347-352.

Leroy Ladurie 1967. *Le climat depuis l'an 1000*. Flammarion Paris. 376p.

Maitre L., 1840. *Dictionnaire topographique de la Mayenne*, Société de l'industrie de la Mayenne. 357p.

Marchand J.-P., Bonnardot V., Planchon O. et Dubreuil V., 2011. La vigne, le vin et le climat vus par un notable lavallois au début du XVI° siècle. *Actes du XXIVème colloque de l'AIC*, Rovereto, Université Ferrare. 373-379.

Marchand J.-P., Bonnardot V. et Planchon O., 2015. Le climat de Laval au début de la Renaissance, essai de géographie historique. *Ann. Bretagne et Pays de l'Ouest*. Tome 122. 2150(1), 104-133.

Marchand J.-P., Planchon O., Bonnardot V., 2016. La variabilité des types de temps mensuels au XVIIIème siècle à Laval : approche méthodologique. *Actes du XVIII*^{ème} *colloque de l'AIC*, Lausanne - Besançon. 6p

Moss *et al.*, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463. doi:10.1038/nature08823.

Musset R., 1908. *La limite de la culture de la vigne dans l'Ouest de la France*. *Annales de géographie.* 268-270.

Musset R., 1917. *Le Bas Maine, Étude géographique*. Armand Colin; Paris, 496p.

Pichot D., 1995. *Le Bas Maine du Xe au XIIIe : étude d'une société.* Société d'archéologie et d'histoire de la Mayenne, Laval, 445p.

Pichot D., 2007. *Le moyen âge. La Mayenne des origines à nos jours*. dir J. Salbert, 97-172.

Tonietto J. et Carbonneau A., 2004. A Multicriteria Climatic Classification System for Grape-Growing Regions Worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 81-97.

Vidal de la Blache P., 1903. *La France, Tableaux géographiques*. Hachette, Paris, 556p.

PRODUCTION ÉLECTRIQUE ÉOLIENNE EN FRANCE ET CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE

MARTIN N.

Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR 7300 ESPACE, Nice, France (nicolas.martin@unice.fr)

Résumé : *La production électrique en France est assurée majoritairement par la filière nucléaire. Depuis la loi de transition énergétique pour la croissance verte de 2015, l'un des objectifs est de faire considérablement progresser la part de l'éolien dans le mix électrique français (multipliée par 2,5 d'ici 2028). Or cette source d'énergie dépend intégralement des conditions météorologiques. Il est donc primordial de s'intéresser au comportement du vent à l'échelle nationale voire même continentale afin de mieux anticiper les conséquences de l'augmentation de la part de l'éolien dans l'approvisionnement électrique. Ainsi à partir des données de production électriques enregistrées et distribuées par RTE (Réseau de Transport d'Électricité) et des réanalyses climatiques ERA-Interim entre 2012 et 2018, cette étude a pour objet de mettre en lumière l'influence tyrannique de la vitesse du vent sur la production d'électricité d'origine éolienne : 74% du temps le facteur de charge de la filière électrique éolienne est inférieur à 30% en raison d'un gradient de pression faible sur la France et donc de vitesses de vent insuffisantes.*

Mots clés : *énergie éolienne ; vitesse du vent ; réanalyses ERA-Interim ; facteur de charge*

Summary: ***Wind power production in France and atmospheric circulation.*** *Electricity production in France is mainly provided by the nuclear industry. Since the energy transition law for green growth of 2015, one of the objectives has been to considerably increase the share of wind power in the French electricity mix (multiplied by 2.5 by 2028). This source of energy is entirely dependent on weather conditions. It is therefore essential to take an interest in the behavior of the wind on a national or even continental scale in order to better anticipate the consequences of the increase in the share of wind power in the electricity supply. Thus from the electrical production data recorded and distributed by RTE (Electricity Transport Network) and from ERA-Interim climatic reanalyses between 2012 and 2018, this study aims to highlight the tyrannical influence of the speed of wind, on the production of electricity from wind power: 74% of the time the load factor of the wind power sector is less than 30% due to a low pressure gradient over France and therefore insufficient wind speeds .*

Key words: *wind power*; *wind speed; ERA-Interim reanalysis; load factor*

Introduction

L'électricité n'étant pas une énergie primaire elle nécessite d'avoir recours à des moyens de production. À l'échelle mondiale deux tiers de l'électricité sont issus des énergies fossiles (38% du charbon, 23% du gaz et 3% du pétrole), le tiers restant étant d'origine hydraulique (16%), nucléaire (10%), éolienne (5%) et solaire photovoltaïque (2%) notamment (AIE, 2019). Ainsi pour tenter de ralentir, avant de stopper et de faire baisser, nos émissions de CO_2, il est préférable de s'orienter vers ce 3[e] tiers d'énergie primaire pour fabriquer l'électricité. Malheureusement au sein de ce 3[e] tiers toutes les énergies ne se valent pas : certaines sont pilotables, l'électricité est produite sur commande en fonction des besoins de consommation, et d'autres sont fatales, l'électricité est produite si les conditions météorologiques le permettent, ce qui introduit des contraintes dans la gestion d'un réseau électrique national voire supranational.

En France le mix électrique est déjà décarbonné à plus de 90% (71% de nucléaire, 11% d'hydraulique, 6% d'éolien et 2% de solaire photovoltaïque entre autres). L'intérêt de modifier les proportions de ces moyens de production ne revêt donc aucun enjeu climatique. Cependant en raison de choix politiques la filière nucléaire verra baisser sa proportion à l'avantage de celle de l'éolien notamment. En effet dans le cadre de la loi de transition énergétique pour la croissance verte adoptée en août 2015, la part des énergies renouvelables devrait atteindre 23% en 2020 et 32% en 2030 de la consommation finale brute d'énergie et celle du nucléaire à 50% dans la production électrique en 2025 (décalée à 2035 depuis). Les capacités de production

électrique éolienne seront multipliées par 2,5 entre 2019 et 2028 passant de près de 15,8 GW à près de 40 GW (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2020).

Cependant personne ne se soucie de l'épineuse question de l'intermittence de la production électrique éolienne… Ainsi à l'aide des données de production électriques fournies par Réseau de Transport d'Électricité (RTE) et des réanalyses ERA-Interim cet article apporte des réponses aux questions centrales suivantes : quelles vitesses de vent et quelles fréquences temporelles pour quelles productions électriques éoliennes ?

1. Données et Méthodes

1.1. La production électrique éolienne en France entre 2012 et 2018

RTE enregistre et met à disposition 7 ans de données de production électrique éolienne de 2012 à 2018 (https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-telechargement). Les fichiers Excel à télécharger répertorient tous les moyens de production électrique à une résolution temporelle très fine de 30 minutes. Ces informations permettent donc de connaître très précisément dans le temps la production électrique éolienne.

1.2. Les réanalyses ERA-Interim

Le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) donne accès à différentes déclinaisons de réanalyses. La résolution spatiale des réanalyses ERA-Interim d'environ 80 km semblait être adaptée aux questions que nous nous posons, raison pour laquelle les réanalyses ERA5 plus fines spatialement ont été écartées. Parmi la multitude de variables météorologiques disponibles seules celles directement liées à la production d'électricité éolienne et permettant de caractériser la circulation atmosphérique ont été sélectionnées : la vitesse du vent en surface (10 m au-dessus du sol), la pression atmosphérique en surface ainsi que l'altitude du géopotentiel 500 hPa. Afin de correspondre au mieux à la résolution temporelle des données de RTE, ce sont les 4 pas de temps horaires journaliers 0h, 6h, 12h et 18h qui ont été retenus pour l'intégralité des 7 années de 2012 à 2018.

1.3. Le facteur de charge de la production électrique éolienne

Entre début 2012 et fin 2018 la puissance installée de production d'électricité éolienne évoluant, il n'est pas logique de raisonner avec les productions brutes d'électricité éolienne. Pour quantifier l'influence des conditions météorologiques sur les kilowatts d'origine éolienne produits, il faut avant tout calculer le facteur de charge de l'éolien. Ce facteur de charge, quel que soit le moyen de production électrique considéré, est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite à un instant donné et la production maximale possible qui est elle liée aux puissances installées. Disposant uniquement des valeurs de puissances installées à l'échelle annuelle de 2012 à 2018 et devant calculer un facteur de charge toutes les 30 minutes, l'hypothèse théorique d'une augmentation linéaire des puissances installées tout au long de l'année a été décidée, ce qui dans les faits n'est évidemment pas le cas.

Une fois ces facteurs de charge calculés toutes les 30 minutes, des classes ont été créées, fondées uniquement sur la valeur de cette variable. Les plus faibles valeurs étant proches de 0% et les plus fortes n'atteignant pas 90%, ce sont 9 classes de 10% d'amplitude (de 0%-10% à 80%-90%) pour lesquelles les configurations spatiales moyennes du géopotentiel 500hPa, de la pression en surface de la vitesse du vent vont être établies.

2. Résultats

2.1. Effectifs et fréquences par classe de facteur de charge

La discrétisation en 9 classes de facteur de charge porte sur un total de 122736 individus (données de production électrique éolienne au pas de temps semi-horaire sur 7 ans). La répartition des individus par classe est très hétérogène : 74% du temps le facteur de charge est inférieur à 30% et il est supérieur à 40% moins de 10% du temps (Tab.1). Le facteur de charge moyen sur les 7 années est de 22,7% à l'échelle du territoire français.

Tableau 1. Effectifs, fréquences et fréquences cumulées des classes du facteur de charge (FC) éolien en France de 2012 à 2018.

Classe FC éolien	Effectif	Fréquence en %	Fréquence cumulée en %
0-10%	30585	24.9	24.9
10-20%	38023	31.0	55.9
20-30%	22212	18.1	74.0
30-40%	12495	10.2	84.2
40-50%	8060	6.6	90.7
50-60%	5395	4.4	95.1
60-70%	3713	3.0	98.2
70-80%	2084	1.7	99.9
80-90%	169	0.1	100.0

2.2. Configurations moyennes du géopotentiel 500hPa, de la pression atmosphérique en surface et de la vitesse du vent en surface

Le passage de la classe 0-10% de facteur de charge à la classe 80-90% montre une hausse du gradient de pression en altitude et en surface ce qui a comme conséquence de faire croître la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol (Fig.1). Cette constatation n'est pas une surprise certes, mais l'analyse des configurations moyennes de ces 3 variables météorologiques à l'échelle nationale et européenne est riche d'enseignement. Toutes les classes ne sont pas commentées ici par manque d'espace mais, les absentes, correspondent globalement à une situation intermédiaire avec les classes inférieure et supérieure.

La classe 0-10% composée de 30585 individus (environ 637 équivalent-jours) est caractérisée par un semblant de dorsale anticyclonique sur l'Europe de l'ouest avec des isohypses du géopotentiel 500 hPa assez lâches : 5800 m d'altitude pour la pointe de la péninsule ibérique à 5600 m au-dessus de la Grande-Bretagne (les écarts-types sont de 100 à 120 m). En surface un anticyclone est présent avec des valeurs moyennes de 1017 à 1019 hPa sur la majeure partie du continent et une variabilité intra-classe de 6 à 8 hPa. En l'absence de gradient de pression les vitesses de vent sont très faibles, entre 4 et 5 m/s de l'Espagne à l'Allemagne, et même en mer près des côtes les valeurs sont identiques. Seules l'Ecosse et l'Irlande bénéficient de vitesses légèrement supérieures de 6 à 7 m/s.

La classe 20-30% regroupant 22212 individus (environ 463 équivalent-jours) correspond à un flux d'ouest généralisé quelle que soit la latitude avec un gradient de pression plutôt faible en altitude comme au sol excepté sur la Grande-Bretagne. Les vitesses de vent oscillent entre 4 et 6 m/s dans l'intérieur des terres mais sont plus soutenues près des littoraux, notamment près de la Manche et de la Mer du Nord avec 7 voire 8 m/s comme sur l'ensemble du Royaume-Uni.

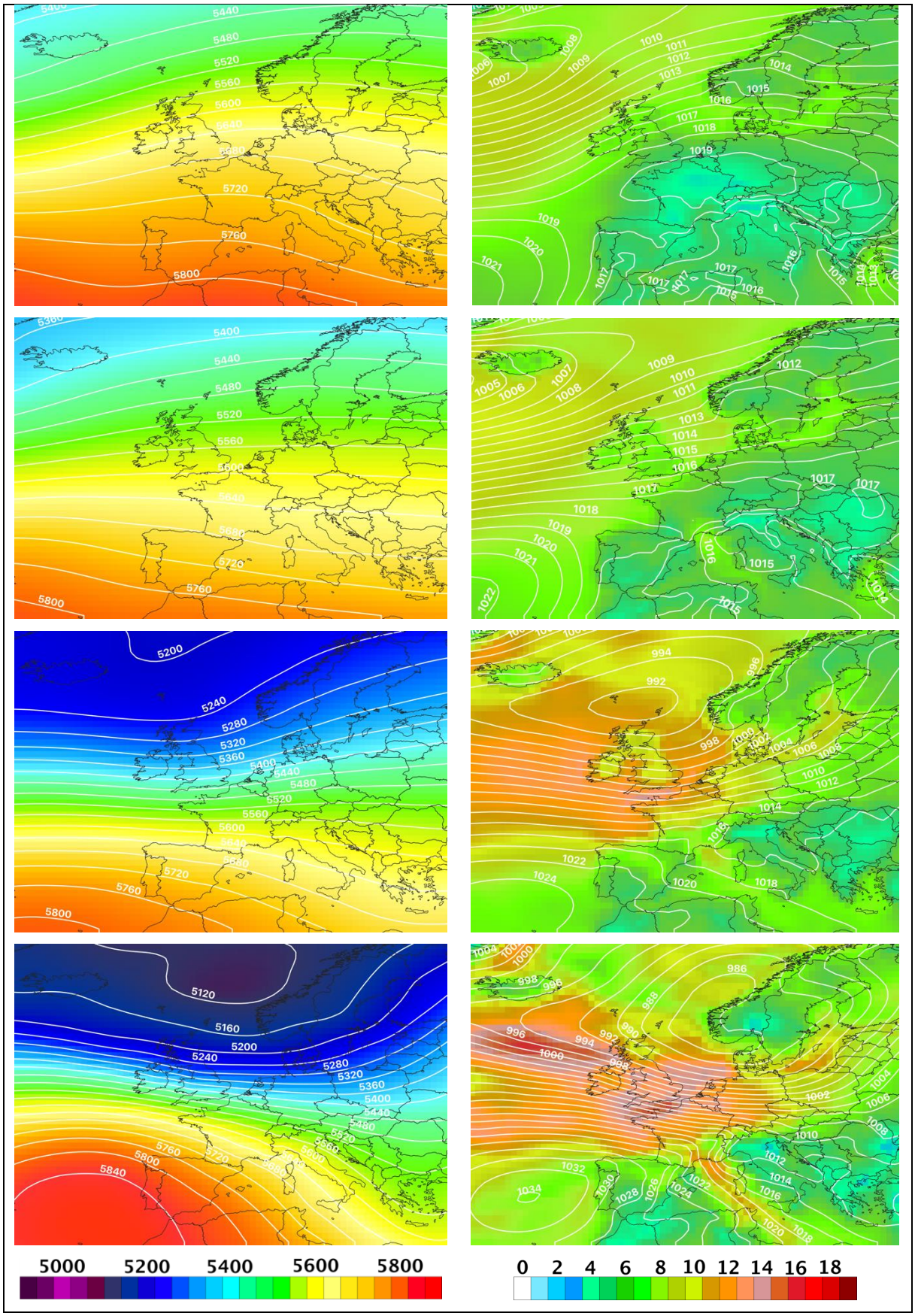


Figure 1. Configurations moyennes du géopotentiel 500hPa en mètres à gauche, et de la pression atmosphérique en hPa et de la vitesse du vent en surface en m/s à droite pour les classes 0-10%, 20-30%, 60-70% et 80-90% de facteur de charge de l'éolien en France de 2012 à 2018.

Pour rappel, les autres classes de facteur de charge ne représentent plus qu'un quart du temps. La classe 40-50% (non représentée dans la Fig.1) est constituée de 8060 individus (168 équivalent-jours). Les valeurs de géopotentiel 500 hPa sont plus contrastées du sud de l'Espagne au nord de l'Ecosse passant de plus 5700 m à moins de 5400 m dans un flux d'ouest très zonal. En surface le gradient de pression augmente avec près de 15 hPa de différence entre le nord de l'Espagne et le nord de l'Ecosse. Ainsi les vitesses de vent progressent pour s'établir entre 9 et 11 m/s sur le proche Atlantique, la Manche et la Mer du Nord, et entre 5 et 9 m/s sur le continent où les valeurs les plus hautes s'observent près des littoraux du nord du continent.

La classe 60-70% réunissant 3713 individus (environ 77 équivalent-jours) est marquée par des valeurs de géopotentiel 500 hPa plus faibles et par un positionnement de la dépression d'Islande au nord de la Grande-Bretagne avec une moyenne de 5200 m d'altitude. Ainsi le flux d'ouest adopte une courbure légèrement cyclonique de cette zone jusqu'au nord de la France, puis il est zonal jusqu'au centre de l'Espagne où la pression 500 hPa s'enregistre à 5700 m d'altitude. En surface les écarts de pression sont également marqués avec 30 hPa de différence du nord au sud de l'Europe. Les vitesses de vent sont comprises entre 10 et 14 m/s sur une bonne partie des mers et de l'océan sur la façade ouest européenne (bien moins ailleurs) et entre 5 et 10 voire 12 m/s à l'intérieur du continent de la péninsule ibérique à la moitié nord de la France et au Royaume-Uni. Ici encore le littoral nord de l'Europe est bien mieux exposé aux plus fortes vitesses moyennes.

Enfin la classe 80-90% totalisant 169 individus (environ 3 ou 4 équivalent-jours sur 7 ans) caractérise des configurations synoptiques exceptionnelles où l'anticyclone des Açores est relativement haut en latitude et proche de l'Europe alors même que la dépression d'Islande est très creusée et positionnée sur le sud de la Scandinavie. Les valeurs de géopotentiel 500 hPa sont tout juste supérieures à 5100 m d'altitude dans cette région avec des pressions de surface de 985 hPa. Dans le même temps ces deux variables enregistrent respectivement des valeurs de plus de 5800 m d'altitude et de près de 1035 hPa sur le proche Atlantique à la latitude du Portugal. Avec cette différence de 50 hPa de pression les vitesses moyennes de vent s'établissent autour de 12 ou 13 m/s (vitesses optimales pour la production éolienne) dans les terres sur une grande partie de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne et de la France. Au-dessus des mers et de l'océan les valeurs atteignent même 15 à 16 m/s notamment dans la Manche.

Conclusions et Discussion

Chacune des configurations moyennes présentées précédemment est bien entendu marquée par une certaine variabilité notamment en raison du très grand nombre d'individus appartenant à chaque classe, particulièrement pour les 3 premières classes. Puisque les données de production électrique éolienne sur le territoire français sont à la base du calcul de ces comportements moyens, les écarts-types les plus faibles pour chacune des variables météorologiques sont fréquemment observés sur la France et à proximité immédiate. Les plus forts écart-types s'enregistrent dans la partie nord-ouest du domaine, là où la trajectoire du centre des dépressions n'est pas systématiquement la même à quelques centaines voire à un millier de kilomètres près, ce qui fait mécaniquement augmenter la variabilité par classe des 3 paramètres étudiés.

Par ailleurs, il n'est pas surprenant de constater que le facteur de charge moyen de l'éolien sur ces 7 années et à l'échelle du territoire français n'est que de 22,7%, il s'agit d'un fait connu (Correia *et al*., 2016, Hubert et Pervès, 2012), cette source d'énergie électrique est fatale puisqu'elle dépend intégralement des situations météorologiques. Cependant l'analyse des vitesses moyennes de vent correspondant aux 2 premières classes de facteur de charge montre que sur l'ensemble des pays européens les valeurs sont très faibles. Alors même que le vent ne souffle que très peu sur la France à environ 5 m/s, il n'est également que très peu présent au

Portugal, en Espagne, en Italie, en Belgique, aux Pays-Bas et en Allemagne, y compris sur les littoraux et à quelques kilomètres au large des côtes. Seuls la Grande Bretagne et le Danemark se distinguent avec des vitesses moyennes de vent très légèrement supérieures de l'ordre de 6 à 7 m/s. Se pose ainsi la question du foisonnement éolien, cette idée qui voudrait qu'à l'échelle d'un continent le vent souffle nécessairement à un endroit même s'il n'est pas présent partout… force est de constater que 56% du temps (fréquence cumulée de ces 2 premières classes dont le facteur de charge est inférieur à 20%) la puissance du vent est faible quasiment partout en Europe. Ainsi le foisonnement éolien à l'échelle européenne est plus proche du mythe que de la réalité météorologique : que ce soit pendant une période de canicule ou lors d'une vague de froid, deux types de temps où les besoins en électricité sont intenses, l'anticyclone dynamique ou pelliculaire à l'origine de ces évènements, assure des vents faibles sur l'Europe tout entière.

Or actuellement les politiques énergétiques européennes sont toutes favorables au développement de l'électricité d'origine éolienne. L'Allemagne a investi massivement ces 15 dernières années plusieurs centaines de milliards d'euros afin d'atteindre plus de 60 GW de puissance installée de moyen de production électrique éolien (l'équivalent de 60 petits réacteurs nucléaires). La Grande-Bretagne puis la France arrivent en 2^{e} et 3^{e} position respectivement dans ce classement des puissances installées avec plus de 23 GW et près de 16 GW, et les prévisions énoncées en introduction promettent une forte croissance de l'éolien dans le mix électrique de la France. Ces politiques énergétiques (coordonnées ?) accroissent donc mécaniquement l'intermittence dans la production électrique européenne et donc à terme mettent en péril la stabilité du réseau électrique.

Par conséquent une nouvelle question se pose : un réseau électrique autonome peut-il supporter une part de plus en plus grande de production électrique fatale ? La réponse étant probablement plus proche du non que du oui, pour conserver la stabilité du réseau électrique et faire en sorte que le courant soit disponible au moment où l'on en a besoin et pas seulement quand les conditions météorologiques l'auront décidé (ceci est vrai aussi pour le solaire photovoltaïque), des moyens de production pilotables doivent subsister. C'est la raison pour laquelle la baisse du nucléaire dans le mix électrique français est sans cesse différée dans le temps (et sa baisse fera mécaniquement monter l'intensité carbone de l'électricité par recours à des centrales thermiques pilotables) ; c'est également la raison pour laquelle l'Allemagne conserve ces centrales thermiques au charbon et au gaz, et donc la même intensité carbone de l'électricité (ainsi que les mêmes émissions de particules fines), indépendamment des annonces politiques. L'affrontement entre les idéologies et les lois de la physique aboutit toujours au même résultat, il n'y a que perte de temps, d'argent et d'énergie avant son issue finale.

Remerciements

Nous remercions le Réseau de Transport de l'Électricité (RTE) et le Centre Européen des Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) pour la fourniture des données indispensables à l'élaboration de cette étude.

Bibliographie

Correia J.M., Bastos A., Brito M.C., Trigo R.M., 2017. The influence of the main large-scale circulation patterns on wind power production in Portugal. *Renewable Energy*, 102, 214-223.

Flocard H., & Pervès J.P., 2012. Intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe de l'Ouest. URL : https://www.sauvonsleclimat.org/fr/base-documentaire/intermittence-et-foisonnement

IEA, 2019. World Energy Outlook 2019. IEA, Paris. URL : https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019

ESTIMATION OF RELATIVE HUMIDITY PROFILES AT FINE SCALE: A CHALLENGE FOR THE UNDERSTANDING OF THE ATMOSPHERIC WATER CYCLE

MICHOT V.[1], BROGNIEZ H.[1], VRAC M.[2], THAO S.[2], CHEPFER H.[3], DUFOUR C.[1], YIOU P.[2]

1 Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS/IPSL), UVSQ, Université Paris-Saclay, France (veronique.michot@latmos.ipsl.fr)
2 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), CEA/CNRS/UVSQ, Université Paris-Saclay, France
3 Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD/IPSL), Sorbonne Université Ecole Polytechnique, Paris, France

Summary: *The study of the links between clouds and water vapour, which is essential for understanding the atmospheric water cycle, requires fine-scale relative humidity data with a wide spatial coverage. However, such data are not yet available. The aim of this work is therefore to estimate statistically, using the "quantile regression forest" method, relative humidity profiles at the cloud scale from SAPHIR, CALIPSO and CloudSat satellite data. Cloud properties, as predictors, come from CALIPSO lidar at 90 m horizontal resolution and CloudSat radar at 1.4 km horizontal resolution; relative humidity, as a predictor, comes from SAPHIR at 10 km. The quantile regression forest method applied iteratively predicted the relative humidity at 90m with R2 values between 0.6 to 0.7. The observed and estimated relative humidity profiles were also compared with the lidar measurements from the NARVAL 1&2 campaigns and the Météo France radiosondes.*

Key words: *relative humidity; downscaling; SAPHIR; CALIPSO; CloudSat*

Résumé : ***Estimation de profils d'humidité relative à échelle fine : un défi pour la compréhension du cycle de l'eau dans l'atmosphère.*** *L'étude des liens entre les nuages et la vapeur d'eau, essentielle à la compréhension du cycle atmosphérique de l'eau, requiert des données d'humidité relative à fine échelle et avec une large couverture spatiale. De telles données ne sont cependant pas encore disponibles. Ce travail vise donc à estimer statistiquement grâce à la méthode des « quantile regression forest », des profils d'humidité relative à l'échelle des nuages à partir des données satellitaires de SAPHIR, CALIPSO et CloudSat. Les propriétés des nuages, en tant que prédicteurs, proviennent du lidar de CALIPSO, à 90 m de résolution horizontale, et du radar de CloudSat à 1,4 km de résolution horizontale ; l'humidité relative, en tant que prédictant, provient de SAPHIR à 10km. La méthode de quantile regression forest appliquée itérativement a permis de prédire l'humidité relative à 90m avec des valeurs de R2 entre 0,6 et 0,7. Les profils d'humidité relative observés et estimés, ont également été comparés aux mesures lidar des campagnes NARVAL 1&2 et les radiosondages de Météo France.*

Mots clés : *humidité relative ; réduction d'échelle ; SAPHIR ; CALIPSO ; CloudSat*

Introduction

Water vapour is an essential parameter of the earth radiation budget. Some parts of the processes governing the relative humidity (RH) spatial distribution and its variability can be explained by the Clausius-Clapeyron equation (Stevens and Bony, 2013). Gaps of documentations remain to entirely understand interactions of RH with clouds, and precipitation which are fundamental elements of the global climate sensitivity. Filling these gaps would be a major advance on which climate models could rely on to produce realistic and accurate predictions of how climate will evolve from the local scale to the global scale. One key aspect is to anchor studies of the atmospheric water cycle to measurements characterizing the same scales of variability. However, datasets with high spatial resolution such as the one reached by field experiments and ground-based sites are spatially sparse (Wild, 2009). Reanalysis data fail for their part to reproduce the extreme ranges of RH and the interannual variability (Allan, 2006). Spaceborne instruments provide denser spatial information but have a coarser horizontal resolution and rarely provide all the key parameters altogether at the same resolution. In order to overcome these issues related to coverage and to horizontal scales, Carella *et al.* (2020) developed a downscaling method to estimate RH profiles using the vertical structure of clouds as a physical basis. The method uses the measurements of the CALIPSO lidar (Cloud-Aerosol

Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) that give the vertical properties of clouds at a horizontal resolution of 90m to downscale RH at the same scale from observations initially at 10km provided by the SAPHIR instrument (Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Tropical par Radiométrie) on the Megha-Tropiques satellite. The downscaling method developed by Carella *et al.* (2020) is a non-parametric method and offers a conclusive possibility to have a high-resolution RH dataset. It was developed as a proof-of-concept for thin clouds in the ice phase sampled over the Indian Ocean. Here we extend this method to all types of clouds and for all tropical oceans. We also make use of the measurements given by the CloudSat spaceborne radar as an additional constraint for thick clouds and associated precipitation.

1. Data

The observations of CALIPSO and CloudSat are collocated by design, since the 2 satellites are part of the A-Train constellation. We added the SAPHIR observations on Megha-Tropiques using very strong criteria of coincidence in time (dt=30min) and space (dx < 5km). Ancillary data collected over the tropical North Atlantic serve as evaluation data for the test stage of the method. These data come from the NARVAL-1 and 2 campaigns as well as radiosonde observations from Météo-France.

1.1. Relative humidity and cloud structure data

1.1.1. SAPHIR

SAPHIR is a microwave sounder observing the Earth's tropical atmosphere (28°S-28°N), operating since 2011 on the Megha-Tropiques satellite that has a footprint size of 10km at nadir (Brogniez *et al.* 2016). It measures the upwelling radiation in the 183.3-GHz water vapor absorption line. We use the Operational Level 2 RH profiles that offer estimates of RH over 6 atmospheric layers, located between 100 and 950 hPa (Sivira *et al.*, 2016). The limitations are for the cloudy scenes with large hydrometeors associated to deep convective precipitation.

1.1.2. CALIPSO

Since 2006, the Cloud-Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization (CALIOP) on board CALIPSO, measures the Attenuated Backscattered (ATB) profile with a footprint size of 90 m, from the surface to about 19km with 40 vertical layers. A cloud signature is given by the Scattering Ratio (SR), the ratio between the measured ATB and purely molecular ATB (no clouds, no aerosols. Between 5 and 80, SR values correspond to clouds (Chepfer *et al.*, 2010). Higher values correspond to optically thick and probably precipitating clouds where the lidar signal is then fully attenuated (FA). The FA signal is represented in grey in figure 1a. In this study we use the 40 altitude levels of CALISPO SR as well as the cloud phases (PH) analysed for each vertical level of SR (Cesana and Chepfer, 2013).

1.1.3. CloudSat

CloudSat carries the Cloud Profiling Radar (CPR) that measures the power backscattered by clouds as a function of distance from the radar, with a horizontal resolution of 1.4 km. Here we use layers of reflectivity radar (RR) vertically aggregated at 1 km, from the surface to 5km. As shown in figure 1b using these 5km CloudSat layers allow to complete the information on liquid and optically thick clouds where the above CALIOP signal is fully attenuated (Fig.1a).

1.2. Evaluation data

1.2.1. NARVAL

NARVAL *(Next-Generation Airborne Remote Sensing for Validation Studies)* is a field campaign that took place in the tropical North Atlantic (between 40-60°W and 5-20°N) during two periods, on December 2013 and August 2016. On the aircraft, the Water vapor Lidar Experiment in Space (WALES) measured water vapor profiles with a horizontal resolution of 2.5-2.9 km (depends on the aircraft speed).

1.2.2. Radiosoundings

Radiosonde observations (RAOBS) provided by Météo-France complete the NARVAL data. The 382 RAOBS used here have been launched near Barbados (57°W 13°N), between 2017 and 2019 during the EUREC4A (Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate, Bony *et al*., 2019, BAMS) international campaign.

2. Method

2.1. Prediction of RH from cloud profiles

The goal of this work is to estimate a statistical relation between RH, available at a 10km horizontal resolution, and the cloudy atmosphere, described at a finer resolution of 90m. This is performed independently for each of the 6 atmospheric layers of the RH profiles. The statistical relation is defined as followed:

$$RH_l \sim (\{SR_1, SR_2, \dots, SR_s\}, \{PH_1, PH_2, \dots, PH_s\}, \{RR_1, RR_2, \dots, RR_r\})$$

where RH_l is the 10km-RH at atmospheric layer (l=1 to 6), and $SR_{1..s}$, $PH_{1..s}$ and $RR_{1..r}$ are the 90m-resolution predictors (s= 40, r=5). Carella *et al.* (2020) demonstrated that the Quantile Regression Forest (QRF) method (Meinshausen, 2006) performs better to predict RH from SR profiles than other regression models that only estimate the conditional mean. To assess the predictive power of the method, the QRF is calibrated on 80% of the entire dataset (random sampling) and tested on the remaining 20%. The algorithm is evaluated for each layer l in terms of coefficient of determination (R2) defined on the test dataset between the observed $RH_l$and the predictions. During the learning process, the procedure of mass balance of Liu and Pu (2008) and Malone *et al.* (2012) is applied to ensure that the average value of the fine scale (90m) predicted RH inside a 10km original SAPHIR footprint is consistent with the observation. This latest step is executed iteratively until the R2 is lower than the previous iteration.

3. Results

3.1. Design of the downscaling model

Figure 1c presents a selection of RH profiles from SAPHIR, at 10km original resolution, taken over the tropical North Atlantic during July 2013. Figure 1c shows that the vertical profiles of RH vary with the different types of clouds observed by CALIPSO (Fig.1a) and CloudSat (Fig.1b). Figure 1d shows the predicted RH at 90m within each 10km-original footprint. For this example, the calibration and the prediction are done over the same region (tropical North Atlantic), over 80% of July 2013 for the calibration and the remaining 20% of the month for the prediction. The vertical gradient of RH, from the moist boundary layer up to the dry upper troposphere near 100 hPa and visible in the initial dataset, is reproduced by the QRF model. Moreover, the model introduces horizontal variability of RH but within the range of the values observed within each 10km-original footprint of SAPHIR. This point is confirmed

by the low values of RH uncertainty (URH), defined as the inter-quartile range (Fig.1f) given by the QRF algorithm. Higher values are of uncertainties are obtained in the middle troposphere. The uncertainties are coherent with low values of the mass balance that is the absolute differences between the RH observed in each SAPHIR pixel and the average of the RH values in it (Fig.1e). Figure 2 presents scatter plots between the predicted high-resolution RH and the original low resolution RH. The comparison shows very good agreements with a larger uncertainty at the 2 layers between 700 and 400hPa, related to the strong variability of RH in the middle of the troposphere (800 to 650 hPa) and leading to lower efficiency to predict it. In addition, by running our model over the Indian Ocean focusing on ice clouds, our results show that the use of CloudSat and cloud phases improves the quality of predictions with an R2 between 0.7 and 0.8, compared to 0.4 and 0.7 for Carella's work.

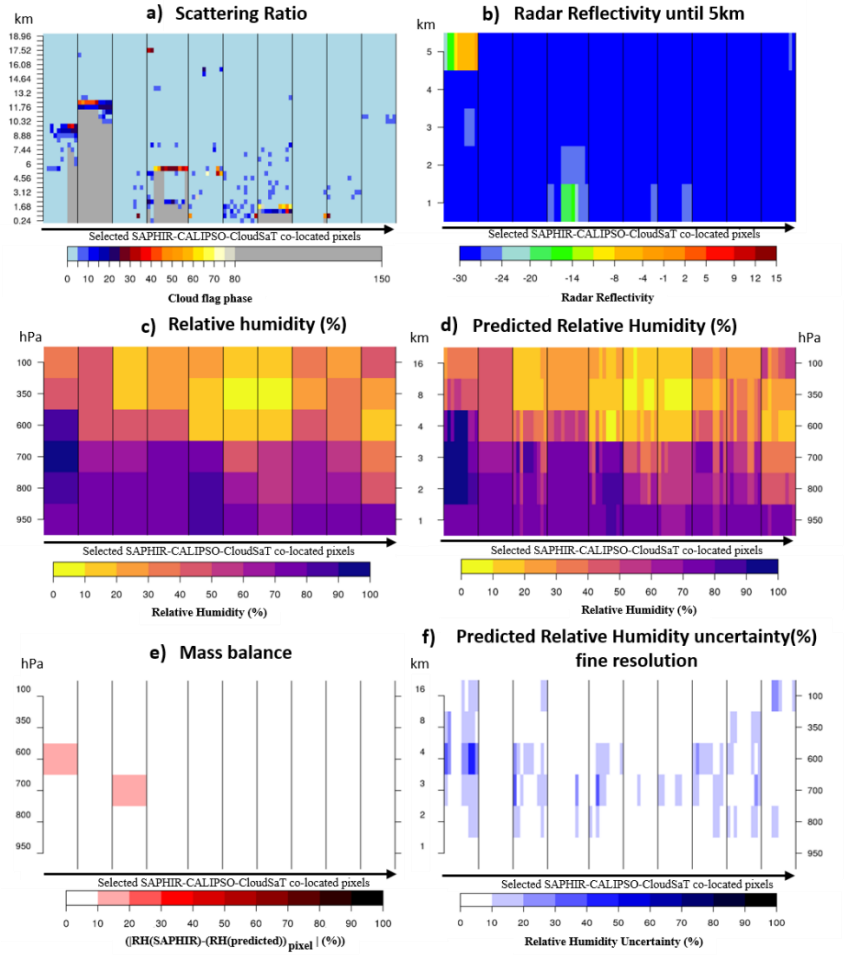


Figure 1. Co-located SAPHIR, CALIPSO and CloudSat profiles in the tropical North Atlantic, for the for the test sample of July 2013 predicted for a series of selected samples. a) SR profiles from CALIPSO, b) RR profiles from CloudSat, c) RH profiles from SAPHIR coarse resolution, d) predicted RH profiles from SAPHIR with the QRF method, e) absolute difference between RH SAPHIR pixel and the average of RH at fine resolution within a SAPHIR pixel, f) RH interquartile range for RH at fine scale. The vertical lines delineate the SAPHIR coarse resolution (10km) between the samples.

Different predictions based on several calibration strategies have been tested. The model was trained on a specific ocean and tested on another one to assess how much the statistical relationship between RH and clouds (via SR and RR) is changing between the regions. The table 1 presents the results of the method regarding these strategies. The R2 calculated for each RH_l shows that a model based on learning relative humidity profiles over one ocean does not correctly predict RH profiles over another ocean. For this purpose, we are establishing a calibration considering all oceans and months to improve the modelling process.

Table 1. Coefficient of determination (R2) scores of downscaling for each RH_l with the QRF method for several kind of calibration strategies.

Sample calibration		***Sample prediction***		***R²***					
Ocean	**Date**	**Ocean**	**Date**	**100:200 hPa**	**250:350 hPa**	**400:600 hPa**	**650:700 hPa**	**750:800 hPa**	**850:950 hPa**
Indian Ocean	July 2013	*Indian Ocean*	July 2013	0.76	0.80	0.76	0.74	0.75	0.66
			December 2013	0.18	0.34	0.29	0.16	0.18	0.01
		Tropical North Atlantic	July 2013	0.07	0.18	0.20	0.25	0.21	0.02
Tropical North Atlantic	July 2013	*Tropical North Atlantic*	July 2013	0.65	0.73	0.72	0.74	0.73	0.69
			December 2013	0.12	0.26	0.24	0.15	0.13	0.02

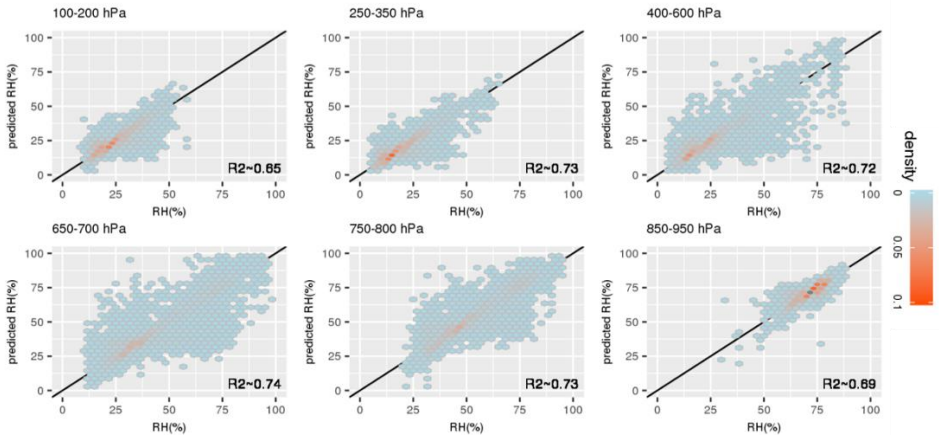


Figure 2. Scatter plot of the predicted RH (y-axis) vs the original SAPHIR RH (x-axis) for the six atmospheric layers, in the tropical North Atlantic for the test sample of July 2013 predicted.

3.2. Evaluation with ancillary measurements

The evaluation of the high-resolution RH is performed by the comparison of the cumulative distribution functions (CDF) of the original low resolution RH, the predicted high resolution RH, the RH from NARVAL and the RH from the Météo-France RAOBS, for July and August 2013 over the tropical North Atlantic. CDFs of RH at the original 10km resolution and the prediction at the 90m resolution have very close and slightly vary between 650 and 800hPa as observed in the URH. However, the RH CDFs highly differ from the Narval RH that show a drier troposphere at high and middle altitudes. That could be explain by the fact that Narval campaign was carried out during specific periods with particular thermodynamical situations that could be undersampled in the SAPHIR/CALIPSO/CloudSat dataset. The CDFs obtained from the RAOBS of Météo-France are relatively close to the CDFs of the original SAPHIR RH and the downscaled RH, except for the 250-350hPa layer where the RAOBS sampled slightly wetter air masses. This could be explained by the difference of sampling, such as the number of observations.

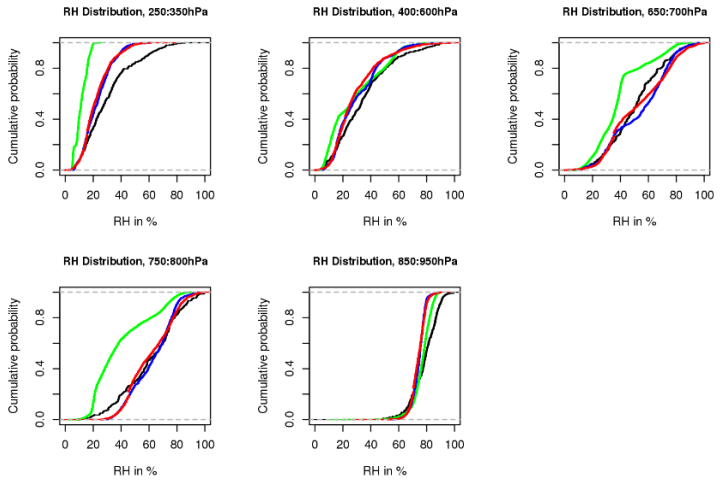


Figure 3. CDFs of SAPHIR RH (blue line), predicted RH (red line), NARVAL data (green line) and Météo-France radiosonde data (black line), for August 2013 over the tropical North Atlantic.

Conclusions

These results show that the QRF-based method performs very well when adding cloud phase information as well as radar reflectivity as additional constraints to the downscaling model. The current calibration is restricted to one oceanic region at a time, which yields to get good scores of evaluations only over the same ocean. The generalization of the downscaling method is under progress so that the model will not be region-dependent. Furthermore, we will consider other RAOBS data from Metéo-France launched in the tropical regions and from the CINDY/DYNAMO 2011-2012 campaign to comfort the evaluation of the downscaled RH.

Literature

Allan R., 2006. Variability in clear-sky longwave radiative cooling of the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 111, D22105.

Brogniez H., & co-authors., 2016. Estimating confidence intervals around relative humidity profiles from satellite observations: Application to the SAPHIR sounder. *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 33(5), 1005-1022.

Carella G., Vrac M., Brogniez H., Yiou P., & Chepfer H., 2020. Statistical downscaling of water vapour satellite measurements from profiles of tropical ice clouds. *ESSD*, *12*, 1-20.

Cesana G., & Chepfer H., 2013. Evaluation of the cloud thermodynamic phase in a climate model using CALIPSO-GOCCP. *J. Geophys. Res.*, *118*, 7922-7937. Doi: 30 10.1002/jgrd.50376.

Chepfer H., Bony S., Winker D., Cesana G., Dufresne J. L., Minnis P., Stubenrauch C. J., & Zeng S., 2010. The GCM-Oriented CALIPSO Cloud Product (CALIPSO-GOCCP). *J. Geophys. Res*., *115*, D00H16.

Liu D.S., & Pu R.L., 2008. Downscaling thermal infrared radiance for subpixel land surface temperature retrieval. *Sensors*, *8*, 2695-2706.

Malone B. P., McBratney A. B., Minasny B., & Wheeler I., 2012. A general method for downscaling earth resource information. *Computers & Geosciences*, *41*, 119-125.

Meinshausen N., 2006. Quantile regression forests, *J. Mach. Learn. Res*., *7*, 983-999.

Sivira R., Brogniez H., Mallet C., & Oussar Y., 2015. A layer averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations: Design and results for the Megha-Tropiques payload. *Atmos. Meas. Tech*., 8, 1055–1071.

Stevens B., & Bony S., 2013. Water in the atmosphere. *Phys.Today*, *66*, 29–34.

Wild M. 2009. Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res*., *114*, D00D16.

AMPLITUDE THERMIQUE QUOTIDIENNE PENDANT LES EPISODES DE CHALEUR A MARTINOPOLIS/SP (BRESIL)

MILANI T.S., AMORIM M.C.C.T.

Faculté de Sciences et de Technologie FCT-UNESP, São Paulo, Brésil (milani.ts@hotmail.com; margarete.amorim@unesp.br)

Résumé : *En raison du manque de planification dans les centres urbains brésiliens, quelles que soit leurs tailles, la vulnérabilité de la population est élevée face aux événements naturels extrêmes. De grandes amplitudes de températures sur une courte période (quotidienne ou hebdomadaire) exposent la population à des conditions de santé déficientes, altérant les défenses naturelles du corps humain affectant son immunité, en plus de provoquer des problèmes respiratoires et cardiovasculaires. Cela dit, le travail a comme objectif d'identifier et d'analyser l'amplitude thermique quotidienne dans des environnements extérieurs de la ville de Martinópolis/SP (Brésil) à partir de quatre points fixes installés dans des résidences avec différents standards de construction lors d'épisodes de chaleur extrême (plus de 37°C) entre le 10 et le 17 septembre 2019. Les résultats obtenus ont révélé que la plus grande amplitude thermique s'est produite le 16 septembre 2019 et a atteint, sur tous les points étudiés, des valeurs supérieures à 20°C en moins de 24 heures.*

Mots clés : *amplitude thermique ; chaleur ; temps ; Martinópolis*

Summary: ***Daily thermal amplitude during heat episodes in Martinópolis/SP (Brazil). Owing*** *to the lack of planning in Brazilian urban centres in all sizes of cities, wheather deficiencie are checked when they are submitted to extreme meteorological episodes, making citizens vulnerable. High temperature ranges for a short time (daily or weekly) can change natural human body defenses, affecting its immunity, besides from causing respitatory and cardiovascular problems. This reseach investigate the higher temperature range during extreme heat episodes (above 37ºC) in Martinópolis town - SP (Brazil) in September of 2019, between the 10th and the 17th days. The results obtained show up thath de highest temperature range ocurred on September 16th, 2019, it reached, in all of the analyzed topics, amouts higher 20ºC in less than 24 hours.*

Key words: *temperature range; heat; wheather; Martinópolis*

Introduction

Les événements météorologiques qui prédominent dans une grande partie du territoire brésilien sont typiques de l'ambiance tropicale et il est courant d'enregistrer des pluies intenses, de longues périodes de sécheresse, des tempêtes tropicales, entre autres des conditions météorologiques qui affectent la vie humaine de différentes manières et proportions. Habituellement, les personnes qui vivent dans les grandes villes, qui ont connu une expansion urbaine rapide incontrôlable et non réfléchie, sont les plus touchées. Cependant, les personnes vivant dans les petites et moyennes villes sont également susceptibles de voir leur vie affectée par des phénomènes météorologiques.

Tout au long de la période de leur vie, les êtres vivants sont soumis aux conditions de l'atmosphère. Cependant, les conditions habituelles ont peu d'effet sur les êtres humains déjà acclimatés à l'environnement dans lequel ils vivent, cependant, quand surgissent « [...] les événements extrêmes qui envoient les messages les plus importants et nous rappellent notre condition humaine » (Almeida, 2012,). En d'autres termes, l'auteur déclare que les personnes ressentent de manière plus concise les événements qui sortent de l'habituel et, par conséquent, les obligent à changer radicalement leur routine en plus d'être susceptibles à la dégradation de la qualité de vie et de la santé.

La bioclimatologie humaine, une branche de la climatologie appliquée, étudie les impacts des différents climats et types de temps sur la vie et la santé humaine, en plus de fournir des outils qui peuvent réaliser des propositions qui atténuent les impacts des événements météorologiques extrêmes sur les êtres humains (Almeida, 2012).

Ayoade (1986) associe l'influence du temps et du climat sur la santé humaine, celle-ci peuvant être directe ou indirecte, subjective ou physiologique, apportant des avantages ou aggravant la capacité de rendement dans les activités quotidiennes et le bien-être de la population. L'auteur atteste également que des amplitudes thermiques élevées sur une courte période (quotidienne ou hebdomadaire), combinées à des températures extrêmes, exposent la population à des conditions de santé déficientes, altérant les mécanismes de défense naturels du corps humain affectant le système immunitaire, l'exposant à des problèmes respiratoires. et cardiovasculaires. Sorre (1951), en critiquant l'importance accordée aux moyennes de températures, a fourni un nouvel horizon pour que les températures absolues soient étudiées, révélant ainsi les épisodes extrêmes qui sortent de l'habituel.

Cela dit, le présent travail a eu comme principal objectif d'identifier et d'analyser l'amplitude thermique quotidienne dans des environnements extérieurs de la ville de Martinópolis/SP (Brésil) dans des zones qui présentaient des bâtiments avec différents standards de construction lors d'épisodes de chaleur extrême (plus de 37ºC), entre le 10 et le 17 septembre 2019.

1. Zone d'étude

La ville de Martinópolis se trouve à 534 kilomètres (km) de la capitale de l'État, São Paulo, à une latitude de 22º 7' 35" Sud et une longitude de 51º 101' 48" Ouest. Considérée comme une ville de petite taille avec 24.219 habitants, selon l'Institut Brésilien de Géographie et de Statistique (IBGE, 2010), son origine vient de l'expansion de la culture du café et de la construction d'infrastructures ferroviaires visant à l'écoulement de la production depuis le début des années 1920. Après la crise de 1929, la culture du café a été remplacée par celle du coton et, selon Daltozo (1999), aussi bien la culture du café que celle du coton ont été fondamentales pour l'émergence et la consolidation de la ville. La formation urbaine s'est étendue à partir de la gare de chemin de fer, le réseau urbain ayant suivi le modèle orthogonal à partir de son origine, qui était courant dans de nombreuses autres villes fondées à la même époque (Ghirardello, 2010). La commune municipale a été créée en 1945, marquant officiellement la fondation et les limites territoriales légales telles qu'elles existent aujourd'hui. De nos jours, le secteur commercial est prédominant dans l'économie locale, suivi de la plantation de canne à sucre et de l'élevage de bétail.

Le relief de la ville, ainsi que de la municipalité, présente des ondulations variant de 2% à 7% de déclivité, se situe dans le Bassin Sédimentaire du Paraná et dans la sculpture morphologique du Plateau Occidental Paulista (Ross; Moroz, 1996).

Le climat régional a des caractéristiques d'une zone de transition entre les climats zonaux, avec une prédominance des systèmes tropicaux au printemps et en été, maintenant des températures élevées et des systèmes extratropicaux en automne et en hiver, permettant l'entrée de fronts plus froids et de l'air polaire. Compte tenu des séries historiques, entre 1969 et 2007, la température moyenne enregistrée par la Station Météorologique de Presidente Prudente est de 26ºC en été et de 20ºC en hiver. Cependant, au cours des dernières décennies, le nombre de jours avec des températures supérieures à 30ºC a été supérieur à 200 tout au long de l'année (Sant'anna Neto et Tommaselli, 2009). Le type climatique prédominant, selon Dubreuil *et al*. (2017), est AW (climat tropical humide sec - saison hivernale sèche).

2. Matériels et méthodes

Ce travail a été réalisé à partir de données obtenues par le biais de quatre équipements TFA - Klima Logger, avec un capteur de température sans fil externe connecté via radio (fréquence de 433 MHz) inséré dans des mini-abris météorologiques, les protégeant de l'exposition directe au soleil et des précipitations, installé à 1,5m de hauteur du soil est situé à de 1,5m des murs.

Des relevés de température de l'air ont été effectués toutes les heures en septembre 2019 et l'amplitude a été calculée à partir de la soustraction de la température la plus élevée par rapport à la plus basse pour chaque jour du mois. Les capteurs ont été installés à proximité de résidences populaires développées par la Companhia de Desenvolvimento Habitacional de Urbano (CDHU) et de résidences ayant des standards de construction moyen et élevé dans la ville, permettant de comparer l'amplitude thermique à proximité de différents modèles de construction.

L'identification des épisodes de chaleur extrême tout au long du mois a été réalisée à l'aide de données historiques de la station météorologique de Presidente Prudente - SP (Brésil), située à 22 kilomètres de la zone d'étude, car elle reflète les conditions atmosphériques d'un point de vue régional. Le mois de septembre a été choisi sur la base des données historiques de ladite station météorologique, car, bien que les températures moyennes les plus élevées enregistrées surviennent au cours des mois d'octobre et de novembre, en analysant les séries historiques entre 1969 et 2007, le mois de septembre a présenté l'occurrence la plus élevée de températures absolues supérieures à 37°C (Sant'Anna Neto et Tommaselli, 2009). En septembre 2019, sept jours ont été enregistrés avec des températures maximales supérieures à 37°C, c'est-à-dire dépassant la température moyenne de la période de plus de cinq degrés. La fréquence continue la plus élevée d'épisodes avec des températures supérieures à 37°C a été enregistrée entre le 10 et le 17 septembre.

3. Résultats

Dans l'hémisphère sud, le début du printemps commence officiellement le 23 septembre les années non bissextiles. Cependant, les dernières semaines de l'hiver 2019 ont été marquées par des températures élevées dans la région, où se situe la zone d'étude, de sorte que les moyennes quotidiennes sont restées proches et même supérieures à 30°C. De plus, l'atmosphère était stable (sans précipitations ni nuages) et avec une faible humidité relative de l'air.

Pour mener à bien l'étude, quatre points ont été sélectionnés dans la zone urbaine de Martinópolis qui représentent les caractéristiques de leur environnement respectif, compte tenu de l'utilisation et de l'occupation du sol. Les quartiers Hideo Nagai (Point 2) et Pedro et Zumira Bergamini (Point 4) présentent des structures et des modèles similaires, tous deux étant le produit du programme public de logement social de l'état, destiné à la population pauvre, appelé CDHU, livrés en 2002 et 2013 respectivement. Les deux possèdent des bâtiments allant de 43,18 m² à 52,36 m², avec un terrain allant de 194 m² à 223 m². Le quartier O Pioneiro (Point 1) a réalisé sa division en lotissement au début des années 1990 afin d'abriter la population avec un meilleur pouvoir d'achat, avec des résidences ayant un meilleur standard de construction, des finitions de meilleure qualité et des lots avec des dimensions supérieures à 260 m². Enfin, le quartier dénommé Centro (Point 3) existe depuis le processus de formation de la ville dans les années 1920, avec des bâtiments de haut standard dans le périmètre qui abrite principalement des résidences, en plus d'avoir beaucoup de lots de tailles irrégulières, généralement supérieurs à 300 m² (Fig.1).

Figure 1. Emplacement des Points

Dans des conditions de stabilité atmosphérique[1], de basse humidité relative de l'air (22% à 55%) et de températures élevées, la taille des lots, la densité du bâti et la qualité des matériaux de construction ont été des facteurs déterminants qui justifient la différence thermique entre chacun des points étudiés. Au point 4, qui a la densité de constructions la plus élevée, de petits lots et des matériaux de bas standard, celui-ci a présenté non seulement la température absolue la plus élevée la plupart des jours en la comparant aux autres points, mais également la plus grande amplitude thermique sur six des huit jours analysés (Fig.2). Le point 2, qui a des caractéristiques similaires au point 4, a présenté de grandes amplitudes thermiques quotidiennes, en plus de hautes températures, de sorte que les points 2 et 4 ont enregistré des températures maximales supérieures à 40°C.

[1] Pendant les jours de mesure, la vitesse moyenne du vent n'était pas supérieure à 2,5 m/s et inférieure à 1,2 m/s. Moins d'un quart du ciel est couvert de nuages tout au long de la mesure. Source: Station météorologique de Presidente Prudente/SP (A-707); Latitude: 22º07'11" S, longitude: 51º24'31" O. Altitude 435,55m, Situé à 22 Km loin de la zone d'étude.

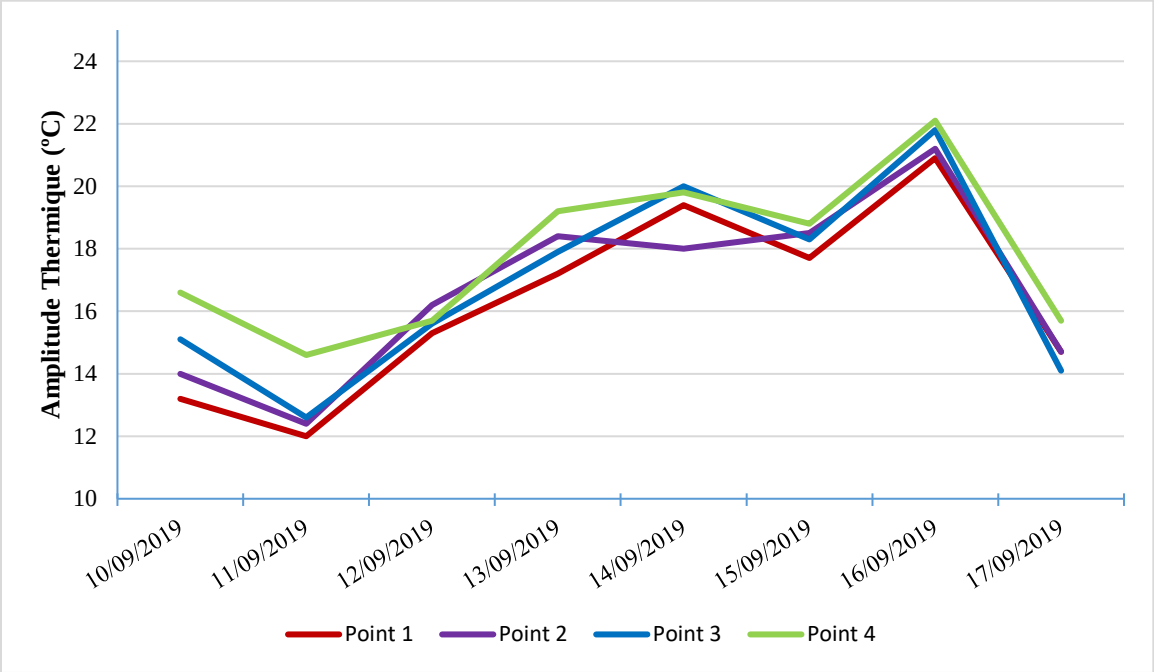


Figure 2. Représentation de l'Amplitude thermique sur chaque point (Source : Organisé par les auteurs (2020))

En observant les données (Fig.2), il est possible de remarquer que sur tous les points étudiés, l'amplitude thermique quotidienne a été égale ou supérieure à 12°C, montrant que les citadins ont été soumis à de fortes variations de température sur une courte période de temps. Cependant, l'inégalité sociale qui affecte le Brésil, dans son ensemble, soumet les populations les plus pauvres, qui vivent dans des résidences construites de manière précaire, sans ventilation naturelle et très souvent dépourvues d'appareils de climatisation artificielle, à ressentir de manière encore plus aigüe les variations de température et, par conséquent, d'être exposé à de pires conditions de santé et de bien-être.

Conclusion

Les travaux ont démontré que, même pendant l'hiver, les villes qui se trouvent dans des bandes de transition climatique entre les zones tropicales et extratropicales peuvent présenter des températures élevées.

De plus, quand on considère le microclimat urbain, il apparaît que les personnes qui vivent dans des quartiers où se trouvent des constructions de bas standard et plus densément peuplés sont plus susceptibles à de grandes variations de température sur une courte période de temps.

Bien que sur tous les points où les enregistrements ont été effectués, une haute amplitude thermique soit survenue, il est possible de noter que le phénomène est plus intense dans les endroits qui abritent principalement la population la plus pauvre (points 2 et 4) qui, en raison de facteurs économiques et socio-environnementaux, est plus susceptible de ressentir de manière plus aigüe la variation des conditions atmosphériques.

Remerciements

À la FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Procès nº 2019/10041-2) pour le soutien financier essentiel à la réalisation de cette recherche.

Au Programme de Spécialisation en Géographie de la Faculté de Sciences et de Technologie – FCT/UNESP (Campus de Presidente Prudente).

Bibliographie

Almeida M. J. R. M., 2012. *Fundamentação Teórica Para a Criação de um Sistema de Alerta e Resposta online Durante Episódios Térmicos de Calor Extremo.* Faculdade de Letras – Universidade do Porto, 133p.

Ayoade J. O., 1986. *Introdução à climatologia para os trópicos.* São Paulo, Ed. Drifle, 332p.

Sorre M., 1951. *Les Fondements de la Géographie Humaine.* Paris, Armand Colin.

Daltozo J.C., 1999. *Martinópolis, sua história e sua gente.* Martinópolis, Gráfica Martipel Ind. Com. Ltda, 200p.

Dubreuil V., *et al*., 2017. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo* (Paris), v. 1, 1-27.

Ghirardello N., 2010. *A formação dos patrimônios religiosos no processo de expansão urbana paulista (1850-1900).* São Paulo, Ed. UNESP, 268p.

Sant'Anna Neto J. L., Tommaselli, J. T., 2009. *O Tempo e o Clima de Presidente Prudente.* FCT-UNESP, Presidente Prudente.

Ross J. L. S., Moroz I. C., 1996. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia,* São Paulo, n.10, 41-56.

CONTRIBUTION DE LA TELEDETECTION OPTIQUE A LA CARTOGRAPHIE DE LA NEIGE DANS LA TUNISIE TELLIENNE

MJEJRA M.[1], SAMAALI M.[2]

1 Institut Supérieur des Sciences Humaines de Jendouba, Jendouba, Tunisie (mustaphamjejra@yahoo.fr)
2 Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, Tunis, Tunisie (samaalihamouda@yahoo.fr)

Résumé : *L'objet de ce travail est de cartographier la neige dans la Tunisie tellienne par l'application de l'algorithme SNOWMAP sur des images MODIS. En effet, le NDSI a montré qu'il est possible de cerner la dynamique de la couverture neigeuse dans la région étudiée. La neige, dans la plupart des cas, se concentre au mois de février et sur les massifs de la Kroumirie et les plateaux du Haut Tell. En outre, la répartition spatiale de ce phénomène climatique s'explique, essentiellement, par l'effet du relief. Mais, les résultats pourront être améliorés tout en couplant l'indice NDSI avec une carte d'occupation du sol et tout en mettant l'accent sur les facteurs atmosphériques.*

Mots clés : *la neige ; télédétection optique ; NDSI ; Tunisie tellienne*

Summary: ***Contribution of optical remote sensing to snow mapping in Tellian Tunisia.*** *The object of this work is to map the snow in Tunisia through the application of the SNOWMAP algorithm on MODIS images. Indeed, the NDSI has shown that it is possible to identify the dynamics of snow cover in the study area. The snow, in most cases, is concentrated in February and on the massifs of the Kroumiria and the plateaux of Haut Tell. In addition, the spatial distribution of this climatic phenomenon is mainly due to the effect of the terrain. However, the results can be improved by linking the NDSI with a land use map and focusing on these atmospheric factors.*

Key words: *snow; optical remote sensing; NDSI; Tunisia Tellian*

Introduction

En Tunisie, la neige demeure un paramètre climatique très souvent méconnu en raison des difficultés inhérentes à son étude aussi bien qualitative que quantitative. La manifestation de la neige reste très localisée dans l'espace correspondant aux secteurs d'altitude et très irrégulière d'une année à l'autre (Bousnina A., 1984). De plus, la neige peut tomber et fondre en quelques jours. Mais, l'apparition fréquente de ce phénomène climatique au cours des dernières années explique une part significative de la variabilité du climat en Tunisie (les rapports annuels de l'INM à partir de 2009). C'est le cas de la Tunisie tellienne, qui de par son cadre physique constitue un domaine représentatif des caractéristiques de la chute de neige en Tunisie. C'est dans ce secteur que la persistance de la neige et son extension géographique sont les plus observées. Le manteau neigeux, dans la Tunisie tellienne, se caractérise par une grande variabilité spatiale et temporelle (Bousnina A., 1984).

Dans ce contexte, nous avons examiné la possibilité d'utiliser la télédétection optique pour cartographier l'étendue du manteau neigeux dans la Tunisie tellienne. En particulier, les satellites MODIS Terra et Aqua sont considérés comme un outil optimal pour surveiller la couverture de neige à l'échelle régionale, notamment, avec des propriétés électromagnétiques facilement détectables par l'outil de la télédétection spatiale (Doutreleau, 2011). Elle permet d'obtenir des observations régulièrement réparties dans le temps et dans l'espace et de distinguer des disparités interrégionales de la région étudiée, ce qui n'est pas facilement réalisable à partir des observations locales conventionnelles (Boudhar A., 2009).

L'objectif est surtout de montrer comment, à travers l'exemple de la Tunisie tellienne, et en s'appuyant sur la télédétection optique, il est possible de suivre la manifestation de la neige et d'analyser la relation entre l'enneigement et la topographie. L'analyse a également pour but de préciser les facteurs à l'origine de la répartition et de l'évolution spatio-temporelles du manteau neigeux.

La question abordée dans cette étude est triple : i) est-il possible d'utiliser la télédétection optique pour caractériser la distribution spatiale de la neige dans la Tunisie Tellienne ? ; ii) Cette méthodologie permet-elle de dévoiler la relation entre l'enneigement et la topographie de la région d'étude ? iii) Peut-on suivre la dynamique de ce phénomène climatique ?

1. Zone d'étude, Données de base et méthodologie

1.1. Zone d'étude

Située au nord des chaînes montagneuses de la Dorsale, la Tunisie tellienne est la région du pays la mieux dotée par la nature, la plus peuplée et la plus riche. Son cadre physique lui offre une juxtaposition de plaines, de bassins enclavés, de collines et de montagnes à pentes fortes (Henia. 2008). La topographie relativement élevée à l'Ouest et au Sud-Ouest (des sommets pouvant dépasser 1000 m), s'abaisse progressivement vers l'Est où s'étendent des plaines basses côtières, qui sont influencés par l'effet modérateur de la mer (Fig.1). Dans cette région, les conditions climatiques se dégradent en allant du Nord vers le Sud ; où on y trouve successivement la variante humide, subhumide et semi-aride où du côté de Sud l'isohyète 400 mm constitue une limite pluviométrique très nette entre le domaine tellien au nord et le domaine steppique de la Tunisie centrale (Henia., 2008). Il s'agit donc d'un domaine représentatif des caractéristiques de la neige en Tunisie ; où lorsqu'elle se manifeste, couvre un espace limité et discontinu, correspondant aux secteurs les plus élevés (Bousnia A. 1984). C'est dans ce secteur que la persistance de la neige et son extension géographique sont les plus observées. Mais, le relief très accidenté de cette région rend difficile l'interprétation des images acquises en visée très oblique.

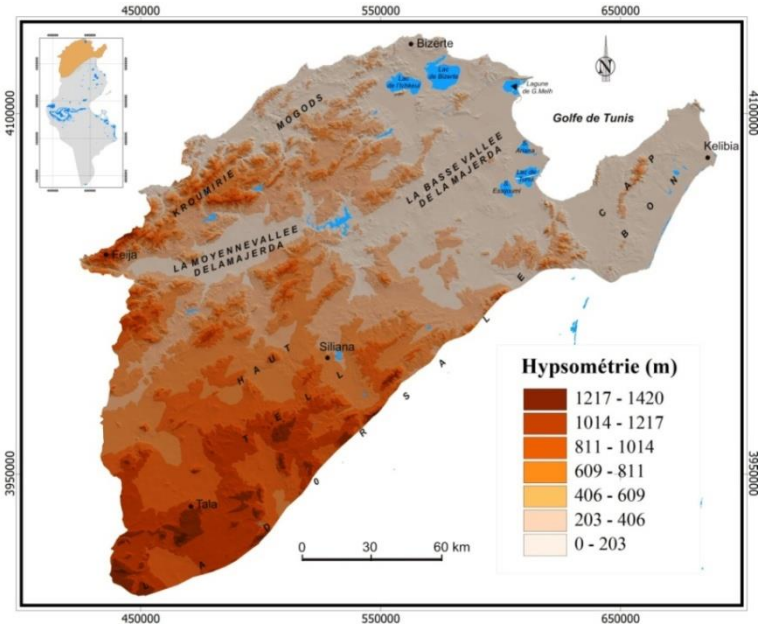


Figure 1. MNT et localisation de la région d'étude

1.2. Données de base

Pour apporter des éléments de réponse aux questions posées dans cette étude, nous avons exploité les données suivantes :

Une archive de dix ans de données satellitaires acquises par le capteur MODIS/Terra et Aqua (produits MOD10/A2 et MYD10/A2, avec une résolution spatiale disponible des images de 500 m). Ces produits fournissent donc une information pertinente sur la présence de la neige au sol, et en aucun cas sur sa hauteur (Cavallo., 2014). La période de l'étude se rapporte aux années hydrologiques 2009-2010 à 2018-2019. Dans cette étude nous avons utilisé la dernière version de l'algorithme de délectation de la neige (version 6) afin de limiter les "bruits" de l'image et de lever la confusion entre nuages et neige (Hall *et al*., 2016).
Les données concernant les chutes de la neige fournies par l'INM (Institut National de Météorologie) et les enregistrements du Centre National de Données Climatiques (météo

américaine) https://www.ncdc.noaa.gov/, et ce pour la même période d'étude (2009-2010 à 2018-2019).

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé dans cette étude provient des données altimétriques de la navette spatiale SRTM. Il est disponible gratuitement depuis 2004 sur l'Afrique du Nord à la résolution de 90m sur (http://seamless.usgs.gov/Website/Seamless/). Il a été utilisé pour calculer les caractéristiques topographiques telles que la pente, l'altitude et les expositions des versants. Les différents calculs effectués sur le MNT ont été réalisés à l'aide du module ENVI-DEM.

1.3. Méthodologie

La cartographie de la couverture nivale se base, essentiellement, sur l'algorithme de Normalized Difference Snow Index (NDSI). Cet indice est le plus utilisé pour les données MODIS, il a aussi l'avantage de réduire considérablement les effets radiométriques dus à la topographie (Touati., 2014). Des études ont démontré qu'il est efficace en terrain accidenté (Doutreleau, V., 2011, Boudhar A. 2009), tel est le cas de la région d'étude. NDSI permet à l'utilisateur "d'exploiter" directement les informations sans avoir recours à des classifications. La fiabilité des résultats est estimée à 97 % en surface ouverte sans couverture nuageuse, mais la confusion entre neige et nuages a été minimisée par la mise en place d'un algorithme « *Snowmap* » (version 6) qui permet de distinguer ces deux éléments (Touati., 2014).

Le NDSI combine les réflectances dans les deux bandes spectrales verte (Vert B4) et moyen infrarouge (infrarouge B6), il est proche de 1 quand la neige occupe une grande partie de la surface de chaque pixel et proche de -1 quand il n'y a pas de neige. Il est calculé par l'équation suivante :

$$\text{NDSI} = \frac{\textbf{Vert (B4)} - \textbf{infrarouge (B6)}}{\textbf{Vert(B4)} + \textbf{infrarouge(B6)}}$$

Pour réduire l'effet du sol et minimiser les erreurs d'estimation des surfaces de neige, cet indice a été calibré par une autre version notée MNDSI (Touati., 2014) :

$$\text{MNDSI} = \text{NDSI} - \text{NDSI0} * \frac{\textbf{NDSI100} - \textbf{NDSI}}{\textbf{NDSI100} - \textbf{NDSI0}}$$

Avec $NDSI_0$ l'indice de neige du pixel avec une couverture neigeuse de 0% et $NDSI_{100}$ l'indice de neige du pixel totalement couvert par la neige (100%). Enfin, la fraction de la surface enneigée (notée S) dans chaque pixel a été calculée par l'équation suivante (Boudhar., 2009) :

$$\mathbf{S = 0.97 \times MNDSI - 0.52}$$

Toutefois, l'application de NDSI pose trois problèmes majeurs : la mauvaise classification de nuages en neige, celle des plans d'eau en neige et celle de la neige en domaine de forêt. Une des solutions apportées pour résoudre « le bruit » des nuages est de combiner les produits neige des satellites Terra et Aqua. En effet, les deux satellites passent sur le même endroit à deux périodes différentes (le matin pour Aqua et l'après-midi pour Terra), ce qui permet d'extraire plus d'information en absence de nuage (Boos., 2009 et Doutreleau., 2011). Pour rappel, la neige se manifeste dans la Tunisie tellienne en hiver durant, en moyenne, 2 à 6 jours (Bousnina 1984), il est plus frais, blanc et moins compact, où les problèmes de la confusion entre neige-forêt et neige-plans d'eau ne perturbent pas l'exploitations des données. Ainsi, « Toutes erreurs confondues, la précision de ces produits est de 93 % ce qui fait de MODIS un capteur largement utilisé pour les études d'enneigement » Cosson., 2013.

2. Résultats

2.1. Analyse topographique de l'enneigement

La répartition régionale de la neige s'explique d'abord par l'effet du relief. En effet, la figure 2 relative à la répartition moyenne de la neige dans la Tunisie Tellienne (2009-2019), montre que l'altitude reste le facteur prépondérant dans la répartition spatiale du manteau neigeux. Les secteurs de la Kroumirie, le Haut Tell et la Dorsale Tunisienne, par leurs altitudes qui dépassent les 900 m, leur exposition aux masses d'air polaire déterminent davantage leurs caractères neigeux (Bousnina, 1984). Les altitudes d'enneigement sont cohérentes avec le régime climatique de la Tunisie tellienne. En fait, les altitudes d'enneigement minimales sont de l'ordre de 400 à 600 m pour les saisons humides contre 800 à 1000 m pour les saisons sèches. Le taux d'enneigement croît avec l'altitude, il est supérieur à 50 % pour les altitudes supérieures à 1000 m, alors qu'aucune neige pérenne n'est observée en dessous de 600 m (Fig.3).

L'analyse topographique des couverts neigeux en Tunisie tellienne prouve que la limite inférieure de la neige c'est-à-dire entre neige et sol nu tendrait à monter à 800 m sur les versants au vent, alors qu'elle est de 400 m sur les versants sous le vent. En effet, les versants orientés vers le nord sont exposés aux flux humides reçoivent plus de neige par rapport à ceux orientés vers le sud où l'ensoleillement est plus important. Toutefois, les secteurs d'altitude supérieure à 1000 m se caractérisent par la chute des neiges précoces à la fin du mois de décembre et la chute des neiges tardives au début du mois de mars, où on enregistre en moyenne de 6 à 8 jours de neige par an (Bousnina., 1984).

La figure 4 montre que la fraction du manteau neigeux dépend aussi de l'exposition des versants. A titre d'exemple, pour la tranche d'altitude 600 à 800 m et pour l'ensemble de la période d'étude et l'année la plus neigeuse (2011-2012), les versants orientés vers le nord reçoivent plus de neige par rapport à ceux orientés vers le sud, dans la mesure où les écarts sont aux alentours de 20%. Les versants nord de la Kroumirie sont exposés aux flux froids provenant du nord-ouest, par contre les versants sud sont à l'abri de ces flux.

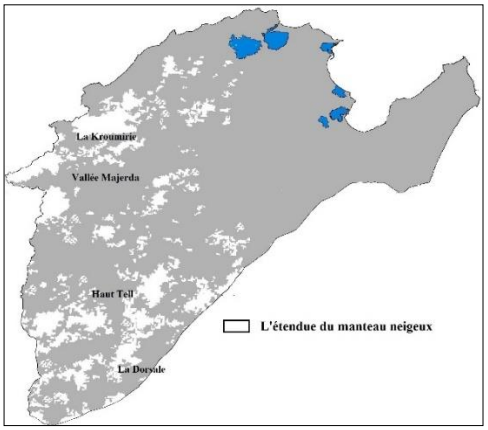


Figure 2. La répartition moyenne de la neige dans la Tunisie Tellienne (2009-2019)

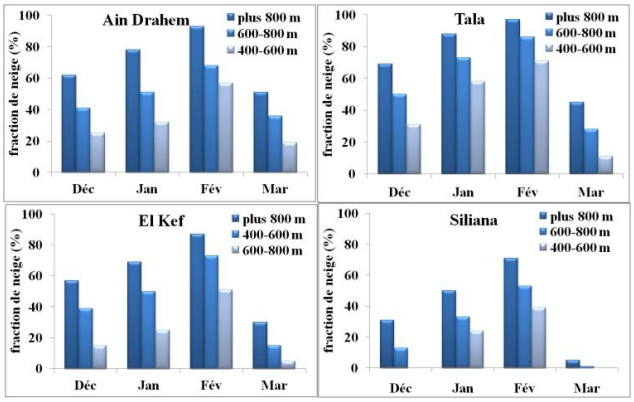


Figure 3. Fraction de la neige en fonction de l'altitude pour des fenêtres géographiques centrées sur les secteurs cités plus haut

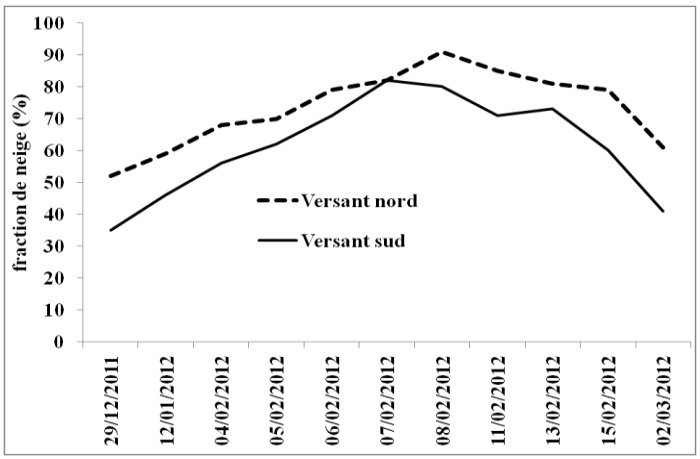


Figure 4. Fraction de la neige en fonction de l'exposition pour des fenêtres géographiques centrées sur le massif de la Kroumirie pour la tranche d'altitude de 600 à 800m

2.2. Suivi de la dynamique de la surface enneigée

En analysant l'enneigement pendant la période 2009-2019, on peut constater une irrégularité interannuelle très remarquable (Fig.5). Le record des jours de neige a été enregistré pendant l'année 2011-2012, soit 12 jours dans la station de Tala, par contre l'année 2016-2017 se caractérise par les valeurs les plus faibles (5 jours à Tala et 0 à Siliana). Dans les secteurs élevés, la variabilité est moins intense par rapport aux secteurs à moyenne altitude, dans la mesure où l'écart type atteint 1.2 à 1.9 jours à Aindrahem et Tala et alentours de 2.8 jours à Siliana.

En ce qui concerne le régime mensuel moyen des jours de neige, la figure 6 permet de constater que la manifestation de la neige se maintient sur la période allant du mois de décembre au mois de mars pour toute la Tunisie tellienne. Le mois de février est le plus neigeux dans la mesure où la fréquence des jours de neige dépasse les 50%. En contrepartie, le mois de mars se distingue par une fréquence très faible de l'ordre de 2 à 3%, où la neige apparaît de temps en temps sur les sommets.

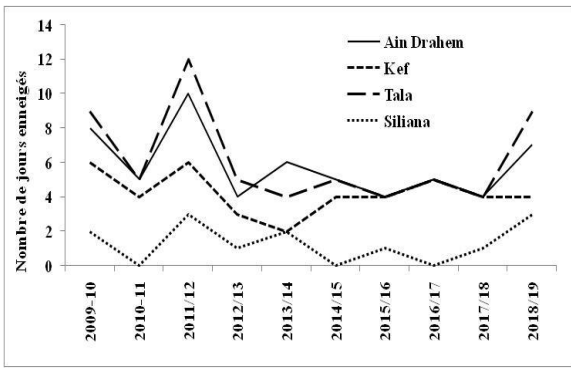


Figure 5. Variation du nombre des jours enneigés (2009-2019

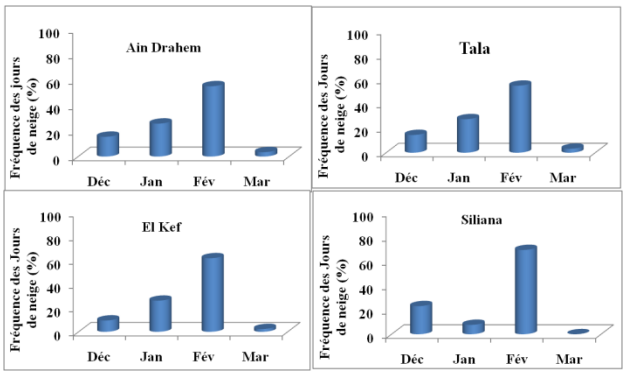


Figure 6. Régime mensuel moyen de nombre des jours enneigés (2009-2019)

Les chutes de la neige, durant la période étudiée, sont observées le plus souvent, à partir des jours isolés, et la manifestation en deux ou plusieurs jours successifs n'est qu'un phénomène exceptionnel. Néanmoins, l'étude de l'occurrence des jours de neige permet de constater que la fréquence des jours de neige isolés est alentours de 72,7 % à Ain Drahem, 78,5 % au Kef et 83.2% à Siliana. Par contre, l'occurrence des jours de neige successifs (2 à plus) est plus nette et intéresse les secteurs situés à des altitudes supérieures à 800 m (17.3% à Aindrahem, 24.2% à Tala). Ceci est expliqué, sans doute, par l'effet de l'altitude qui a tendance de distinguer des nuances régionales. En effet, la ligne de neige persistante est observée sur les massifs de la

Kroumirie, les plateaux de Tala et les sommets de la Dorsale occidentale, et ce quel que soit l'année humide ou sèche. En outre, la limite inférieure de la neige est enregistrée au-delà de 400 m sur les versants nord, mais elle est située à plus que 600 sur les versants sud, et ce pour l'exemple de la Kroumirie.

Conclusion

Cette étude a permis de mieux cerner les apports de l'indice radiométrique NDSI de produire une cartographie de la neige dans la Tunisie tellienne. Cet indice a pu mettre en avant l'influence de l'altitude, de l'exposition, ou encore de la latitude sur les variations temporelles et spatiales du manteau neigeux. Ce dernier reste, donc, un phénomène rare parce que, à la fois, il se répartie, sur des jours isolés et se concentre principalement au mois de février. De plus, elle se maintient, essentiellement, sur le Haut Tell et les secteurs de la Kroumirie.

Bien que le NDSI n'apporte pas de réponse sur la hauteur de la neige, nous renseigne sur l'évolution mensuelle et interannuelle des facteurs géographiques liés à l'enneigement, notamment les limites altitudinales. De plus les résultats montrent que cet indice classifie plus de neige que ce qu'il en existe en réalité (Cosson, 2013). Egalement, les facteurs climatiques de la variabilité spatio-temporelle du manteau neigeux devront aussi être mieux discriminés.

Enfin, les résultats de l'algorithme *Snowmap* de MODIS pourront être améliorés en les couplant avec les cartes de l'occupation du sol c'est-à-dire coupler le NDVI et le NDSI (Doutreleau., 2011). Quoi qu'il en soit, les produits de cartographie obtenus pour la Tunisie Tellienne seront utiles pour améliorer le potentiel du tourisme alternatif (des randonnées lors des chutes de neige), qui prend de l'importance dans cette région.

Bibliographie

Bigot S. & Rome S., 2008. Apports de l'imagerie satellitaire pour l'étude du climat et de l'enneigement du massif du Vercors. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 63-77.

Boos A., 2009. *Application de la télédétection optique à l'échelle globale pour la restitution cartographique multi temporelle des couverts neigeux dans les bassins versants du Pô et du Rhône*. Mémoire d'ingénieur, ESGT, Le Mans, France, 60p.

Bousnina A., 1984. La neige en Tunisie. *Revue Tunisienne de Géographie*, n°13, 9-51.

Boudhar A., 2009. *Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech*. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 215p.

Cosson J.P,. 2013. *Analyse topographique de l'enneigement en haute montagne par télédétection optique. Application au Tien Shan (Kyrgyzstan).* Sciences de l'ingénieur, 69p.

Cavallo, T., 2014. *Cartographie du manteau neigeux saisonnier dans les Alpes françaises par télédétection optique.* Mémoire d'ingénieur, ESGT, Le Mans, France, 65p.

Hall D.K. & Riggs G.A., 2016. *Couverture de neige MODIS / Aqua 5 min L2 Swath 500m, Version 6*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive.

Doutreleau, V., 2011. *Cartographie par télédétection optique MODIS des couverts neigeux en montagne : réalisation et analyse topographique (Asie centrale, Alpes).* Mémoire d'ingénieur, INSA, 61p.

Henia L., 2008 (sous la direction). *Atlas de l'eau en Tunisie*. Unité de recherche GREVACHOT, 186p.

I.N.M (les Rapports annuels) http://www.meteo.tn/htmlar/ADA/Information.html

Touati C., 2014. *Évaluation de l'apport des images MODIS désagrégées à 250m de résolution spatiale pour la cartographie de l'étendue du couvert nival dans l'Est du Canada à l'aide de l'algorithme SNOWMAP*. Mémoire de Master, Université du Québec, 116p.

URBAN HEAT ISLAND AND LAND COVER DIVERSITY IN THE CITY OF RECIFE/PE – BRASIL

MOREIRA A.B.[1], ZAMPARONI C.A.P.[2], NOBREGA R.S.[1], DUBREUIL V.[3]

1 NEMA/Tropoclima, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil (ayo.badiru@hotmail.com)
2 Posgeo, Universidade Federal de Mato Grosso, Mato Grosso, Brazil
3 LETG-Rennes, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, Rennes, France

Summary: *This study analyzed the Urban Heat Island (UHI) according to different land use patterns in the city of Recife-PE. Seven thermo-hygrometers were installed in different locations to collect temperature and humidity data along the year of 2018 with a 30-minutes interval. The landscapes of the installation sites ranged from sparsely horizontal and well-vegetated to densely populated areas. A meteorological automatic station was considered as the rural reference station. Hourly and monthly average UHI were calculated for the year 2018. The highest UHI intensity was recorded near the sea with an average temperature gradient of 3.9°C at 5 a.m. in August. The results showed that the magnitude of the average UHI in Recife varies between medium (2.0 to 3.0 degrees) and weak (up to 2.0 degrees) presenting its greatest intensity at night, between 6:00 p.m. and 6:00 a.m., from the months of May to August. The proximity to the sea both favored the formation of a freshness island during the day and intensified the heat island during the night on the coastline, due to the combination of the thermal characteristics of the surface materials and the higher temperature of the sea surface.*

Key words: *urban heat island; urban climate; Recife; Brazil*

Résumé : ***Ilot de chaleur urbain et diversité de la couverture terrestre dans la ville de Recife/PE – Brésil.*** *Cette étude analyse l'îlot de chaleur urbain (ICU) en fonction de l'utilisation des terres dans la ville de Recife-PE. Sept thermo-hygromètres ont été installés à différents endroits pour collecter des données de température et d'humidité tout au long de l'année 2018 avec un pas de temps de 30 minutes. Les sites d'installation allaient de zones peu densément peuplées et bien végétalisées à des zones densément urbanisées et verticalisées. La station météorologique automatique de l'INMET a été considérée comme la station de référence rurale. L'ICU moyen horaire et mensuel a été calculé pour l'année 2018. L'intensité la plus élevée a été enregistrée près de la mer avec un gradient de température moyen de 3,9 ° C à 5 heures du matin en août. Les résultats ont montré que l'ampleur de l'ICU moyen à Recife varie entre moyen (2,0 à 3,0 degrés) et faible (jusqu'à 2,0 degrés) présentant sa plus grande intensité la nuit, entre 18h00 et 6h00 du matin, de mai à août. La proximité de la mer rafraîchit la ville pendant la journée mais intensifie l'îlot de chaleur pendant la nuit sur le littoral, en raison de la combinaison des caractéristiques thermiques des matériaux de surface et de la température plus élevée de la surface de la mer.*

Mots clés : *îlot de chaleur urbain ; climat urbain ; Recife ; Brésil*

Introduction

Urban structures modify parameters such as air temperature and humidity, exchanges of radiation and energy and air currents, characterizing the Urban Climate. The phenomenon of the Urban Heat Island (UHI) is the clearest and best documented example of climate change caused by anthropic action (Oke, 1987).

The three aspects that characterize UHI are the shape, intensity and location of its warmest core. These aspects vary between cities, due to factors such as the time of day, time of year, the area morphology and the surfaces thermal properties (Lucena, 2013).

The disposition of the natural and artificial elements in the city of Recife acts as obstacles or corridors of wind, in addition to their thermal characteristics, influencing the thermodynamic processes and the transport of radiation trapped in the urban canyon. The diversity of its physical components, conditions and the local climate generates its own climate, bringing densely urbanized areas to higher temperatures. The present work is aimed to study the behavior of ICU in relation to different land cover elements in the city of Recife.

1. Data and Method

1.1. Study area

The study area comprises the city of Recife the capital of the state of Pernambuco located in the extreme east of the Northeast Region of Brazil (Fig.1). Recife pertains to the Brazilian Tropical Coastal Climate of the Eastern Northeast climate type, characterized by autumn/winter rains and low temperature and humidity annual range. According to Dubreuil *et al*. (2019), the As climate type of Köppen's classification represents 55% of annual situations.

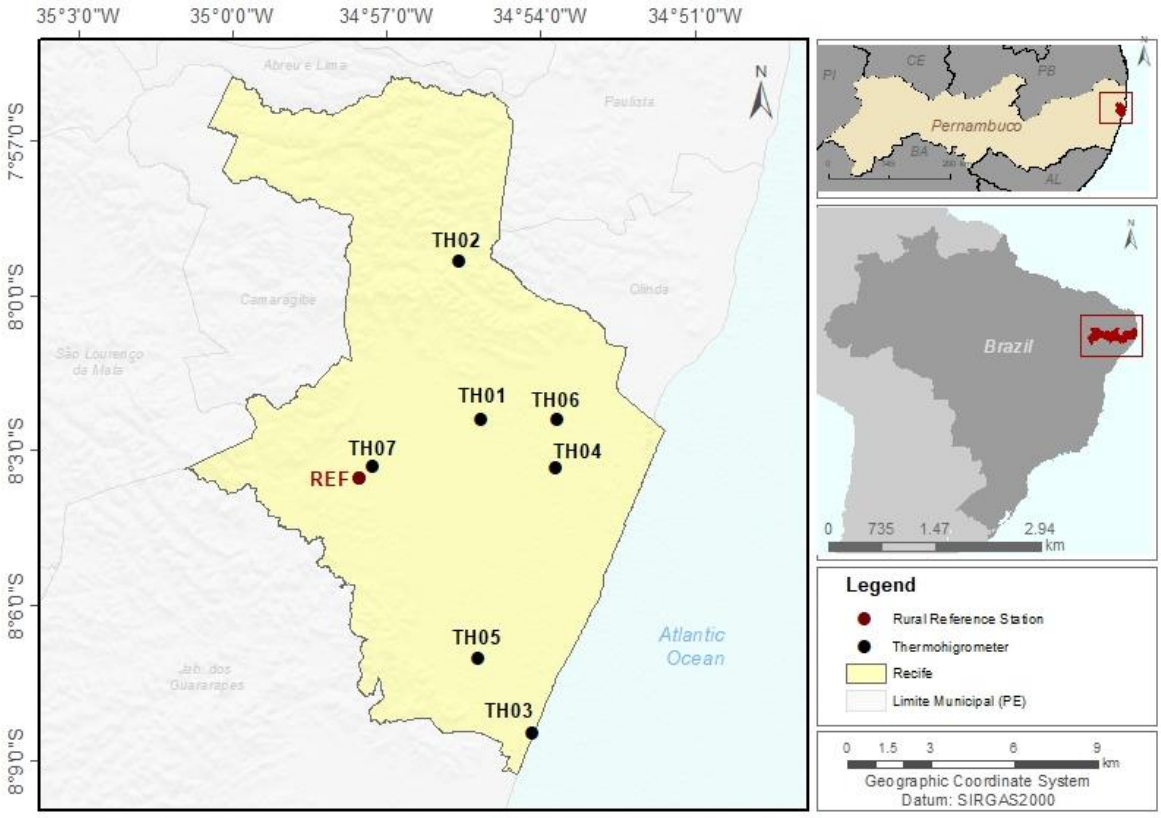


Figure 1. Location of the study area, the thermo-hygrometers and the rural reference station. (Fonts: The authors)

1.2. Methodological Procedure

The temperature and humidity data used are from seven HOBO thermo-hygrometers placed in the city of Recife. The rural reference station was the automatic station A301 of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Fig.1). Data were recorded with an interval of 30 minutes in Celsius degrees throughout 2018 which presented an accumulated precipitation of 1707mm/year and is classified as "very dry" by the quantile classification method for standard climatic year considering the historical mean of 2300 mm/year.

Data analysis considered hourly, monthly and seasonal scales. The location of the thermo-hygrometers was chosen considering the presence of vegetation, water bodies, urban density and proximity to the sea. Figure 2 shows the locations within a radius of 500 m from its surroundings. The TH07 is emphasized to be 645 m away from the rural reference station. The land cover classes are presented in percentage values and vary between vertical constructed, regular constructed, vegetation and water bodies.

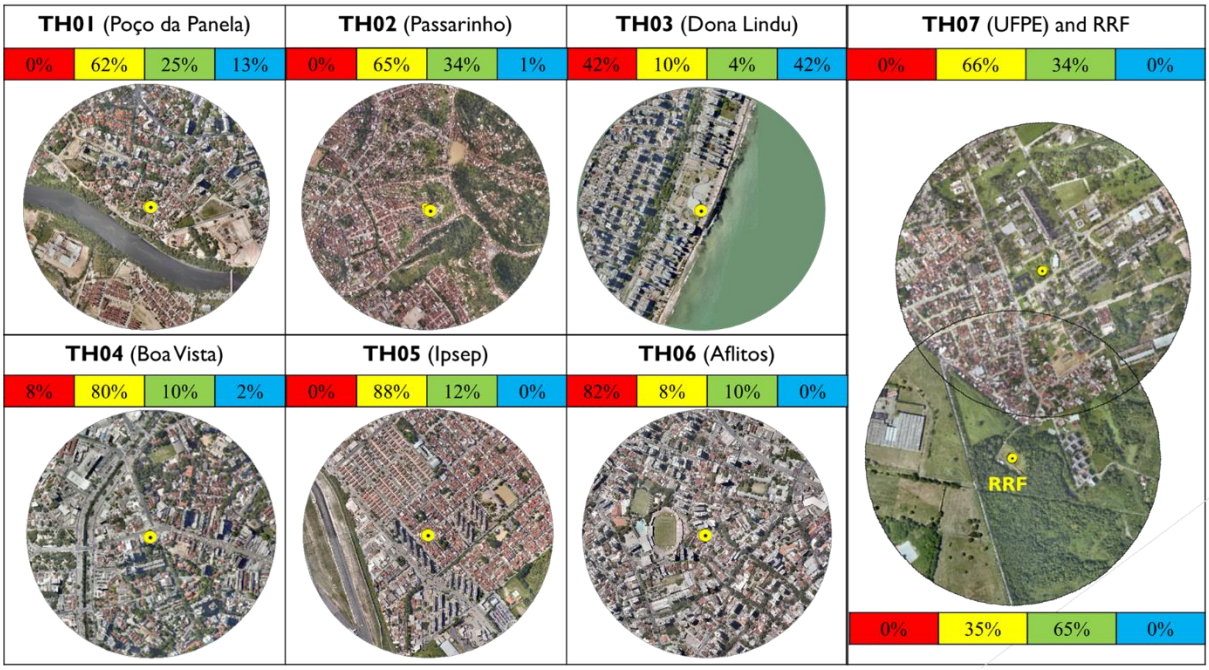
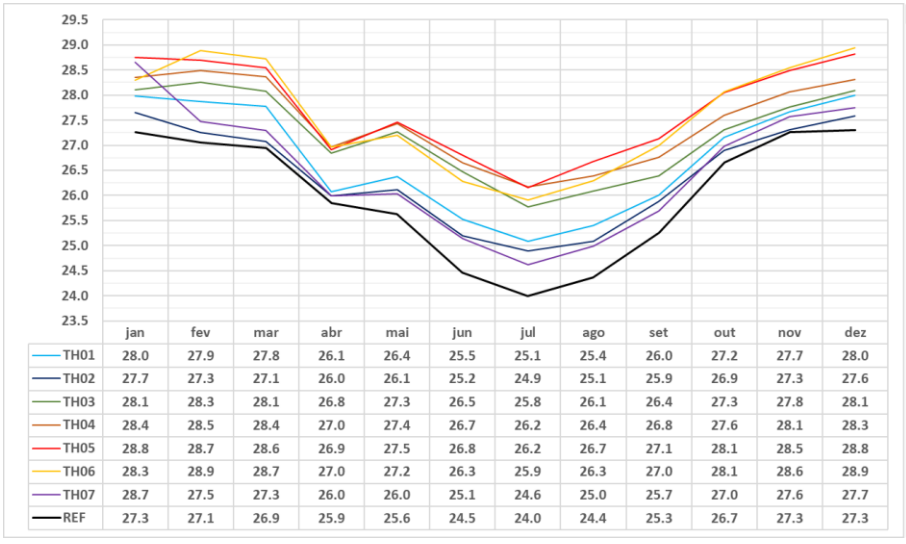


Figure 2. Location of thermohygrometers and a radius of 500 m from their surroundings and their respective percentages of surface class: vertical constructed (red), regular constructed (yellow), vegetation (green) and water bodies (blue). (Fonts: The authors)

2. Results

Figure 3 shows the graph of the average month temperature for each thermo-hygrometers and for the reference station with their respective values. On the right is the table of the average hourly UHI values for each thermo-hygrometer.



	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
TH01	28.0	27.9	27.8	26.1	26.4	25.5	25.1	25.4	26.0	27.2	27.7	28.0
TH02	27.7	27.3	27.1	26.0	26.1	25.2	24.9	25.1	25.9	26.9	27.3	27.6
TH03	28.1	28.3	28.1	26.8	27.3	26.5	25.8	26.1	26.4	27.3	27.8	28.1
TH04	28.4	28.5	28.4	27.0	27.4	26.7	26.2	26.4	26.8	27.6	28.1	28.3
TH05	28.8	28.7	28.6	26.9	27.5	26.8	26.2	26.7	27.1	28.1	28.5	28.8
TH06	28.3	28.9	28.7	27.0	27.2	26.3	25.9	26.3	27.0	28.1	28.6	28.9
TH07	28.7	27.5	27.3	26.0	26.0	25.1	24.6	25.0	25.7	27.0	27.6	27.7
REF	27.3	27.1	26.9	25.9	25.6	24.5	24.0	24.4	25.3	26.7	27.3	27.3

Annual hourly intensity

hour	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07
0	1.5	0.7	2.6	2.4	2.2	2.3	1.0
1	1.4	0.7	2.6	2.4	2.3	2.2	1.0
2	1.7	0.7	2.7	2.5	2.3	2.3	1.0
3	1.5	0.8	2.9	2.6	2.4	2.4	1.0
4	1.5	0.8	3.0	2.7	2.5	2.5	1.1
5	1.6	0.8	3.0	2.7	2.4	2.5	1.0
6	1.3	0.4	2.5	2.3	2.1	1.9	0.8
7	0.7	-0.1	1.2	1.5	1.5	1.1	0.5
8	0.5	-0.1	0.2	0.9	1.3	0.7	0.3
9	0.5	0.0	-0.2	0.8	1.4	1.1	0.3
10	0.8	0.9	-0.2	0.8	2.2	1.4	0.3
11	0.4	0.3	-0.7	0.7	1.7	1.5	0.3
12	0.4	0.5	-0.6	0.8	1.9	1.6	0.4
13	0.3	0.6	-0.6	0.7	1.9	1.8	0.3
14	0.1	0.7	-0.5	0.6	1.8	1.7	0.3
15	0.2	0.7	0.0	0.7	1.5	1.7	0.4
16	0.3	0.8	0.5	0.9	1.2	1.4	0.5
17	0.8	0.9	1.4	1.4	1.5	1.6	0.7
18	1.1	0.9	1.9	1.8	1.8	1.8	0.9
19	1.2	0.9	2.1	2.0	1.9	1.9	1.0
20	1.4	0.9	2.3	2.1	2.0	2.0	1.0
21	1.4	0.9	2.4	2.2	2.1	2.1	1.0
22	1.4	0.8	2.4	2.3	2.2	2.2	0.9
23	1.4	0.7	2.2	2.2	2.2	2.1	0.8

Figure 3. Graph of average annual temperature with their respective values and UHI hourly average intensities for each thermo-hygrometer. (Fonts: The authors)

For the study period, the minimum monthly average temperature was 24 degrees and the maximum 27.3 degrees at the reference station, with a low thermal amplitude. For all months the reference station had the lowest average temperature values.

The thermo-hygrometers showed the values closest to the reference station were TH07, TH02 and TH01 respectively. The highest temperature values were related to the TH05, TH06, TH04 and TH03. Among these, the first two showed little contrast in the intensity of UHI

between daytime and nighttime. TH03 presented a well-defined island of freshness between 09:00 a.m and 02:00 p.m. In general, the graph of annual UHI intensity in Recife shows a predominance of UHI between 06:00 p.m and 06:00 a.m.

The UHI behavior can change throughout the year according to the seasons and / or between the rainy and the dry periods. Amorim (2019) explains that in the rainiest periods, the greater amount of vegetation and humidity in the countryside contribute to increase the thermal contrast in relation to the city. In the dry period the field gets warmer and this reduces the thermal contrast.

Despite Recife's high annual rainfall, the period between September and December is the warmest and driest. The period between January and April is characterized by a transition period between dry and rainy with isolated rainfall events on a regional scale. Finally, the period between the months of May and August concentrates most of the total rainfall, characterizing the rainy period (Wanderley *et al*., 2018).

Considering the periods described above, Figure 4 shows the average hourly intensity of each thermo-hygrometer for the three periods: January-April, May-August and September-December.

Jan - Apr

	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07
0	1.3	0.4	2.5	2.2	2.3	2.2	1.2
1	1.0	0.3	2.5	2.2	2.3	2.1	1.1
2	1.3	0.4	2.6	2.3	2.4	2.2	1.1
3	1.3	0.5	2.8	2.4	2.5	2.3	1.3
4	1.3	0.6	2.9	2.6	2.6	2.4	1.4
5	1.3	0.5	2.8	2.5	2.4	2.2	1.2
6	1.0	0.0	2.0	1.9	2.1	1.6	0.7
7	0.7	-0.3	1.0	1.3	2.0	1.0	0.4
8	0.7	0.0	0.1	0.7	2.1	0.6	0.0
9	0.6	-0.3	-0.4	0.5	1.9	0.8	0.0
10	1.1	0.8	-0.3	0.5	2.6	1.0	0.1
11	0.5	0.1	-0.8	0.3	2.3	1.1	0.1
12	0.6	0.3	-0.8	0.5	2.3	1.3	0.3
13	0.3	0.4	-0.8	0.3	2.0	1.4	0.2
14	0.3	0.5	-0.6	0.4	1.8	1.4	0.3
15	0.3	0.7	-0.1	0.5	1.6	1.4	0.5
16	0.2	0.7	0.5	0.7	1.4	1.3	0.5
17	0.6	0.7	1.3	1.2	1.6	1.3	0.8
18	0.8	0.7	1.8	1.6	1.9	1.6	1.0
19	0.9	0.6	1.9	1.8	1.9	1.7	1.1
20	1.0	0.5	2.1	1.9	2.0	1.8	1.1
21	1.1	0.5	2.2	2.1	2.1	1.9	1.2
22	1.1	0.5	2.0	2.0	2.3	2.0	0.8
23	1.0	0.3	1.5	1.7	2.1	1.7	0.5

May - Aug

	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07
0	1.8	1.1	3.1	2.9	2.8	2.7	0.9
1	1.6	1.0	2.9	2.7	2.6	2.5	0.8
2	1.8	1.0	3.0	2.7	2.6	2.5	0.8
3	1.5	1.0	3.0	2.7	2.6	2.5	0.8
4	1.5	1.0	3.0	2.7	2.5	2.4	0.8
5	1.5	1.0	3.0	2.7	2.6	2.5	0.8
6	1.4	0.9	3.0	2.7	2.5	2.4	0.9
7	0.9	0.3	2.1	2.3	2.0	1.7	0.7
8	0.7	0.2	1.3	1.8	1.7	1.1	0.6
9	0.8	0.4	1.0	1.8	2.0	1.6	0.7
10	1.1	1.0	1.0	1.8	2.7	1.9	0.7
11	0.7	0.6	0.6	1.7	2.2	1.8	0.5
12	0.8	0.7	0.7	1.8	2.4	1.7	0.6
13	0.7	0.7	0.6	1.7	2.5	1.6	0.6
14	0.6	0.7	0.7	1.7	2.4	1.5	0.6
15	0.6	0.8	1.0	1.7	2.1	1.6	0.6
16	0.8	0.9	1.4	1.8	2.0	1.7	0.6
17	1.3	1.0	2.1	2.1	2.2	2.0	0.9
18	1.7	1.3	2.7	2.5	2.5	2.4	1.1
19	1.9	1.4	3.0	2.8	2.7	2.6	1.1
20	2.1	1.4	3.2	3.0	2.9	2.8	1.1
21	2.1	1.4	3.2	3.0	2.9	2.8	1.0
22	2.0	1.2	3.2	3.0	2.9	2.7	1.0
23	1.9	1.2	3.2	3.0	2.9	2.7	0.9

Sep - Dec

	TH01	TH02	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07
0	1.4	0.7	2.1	2.0	1.7	1.9	0.9
1	1.5	0.7	2.3	2.2	1.8	2.1	1.0
2	1.8	0.7	2.5	2.3	2.0	2.2	1.0
3	1.7	0.8	2.8	2.5	2.1	2.4	1.0
4	1.8	0.8	3.0	2.7	2.2	2.5	1.0
5	1.9	0.9	3.1	2.8	2.3	2.6	1.2
6	1.4	0.3	2.2	2.2	1.5	1.8	0.9
7	0.7	-0.2	0.7	1.1	0.6	0.8	0.5
8	0.4	-0.2	-0.2	0.6	0.3	0.7	0.3
9	0.4	0.1	-0.6	0.5	0.4	1.1	0.3
10	0.5	0.9	-0.7	0.5	1.3	1.3	0.4
11	0.3	0.5	-0.9	0.4	0.7	1.6	0.3
12	0.3	0.6	-0.9	0.4	1.0	2.0	0.3
13	0.3	0.9	-0.8	0.5	1.4	2.5	0.4
14	0.1	0.8	-0.7	0.2	1.3	2.5	0.3
15	0.0	0.8	-0.4	0.1	1.0	2.3	0.2
16	0.2	0.8	0.3	0.6	0.6	1.7	0.3
17	0.7	0.8	1.2	1.2	0.9	1.5	0.6
18	0.8	0.7	1.5	1.4	1.0	1.6	0.7
19	0.9	0.7	1.6	1.5	1.1	1.5	0.8
20	0.9	0.6	1.6	1.5	1.2	1.5	0.8
21	1.1	0.7	1.8	1.6	1.3	1.6	0.9
22	1.2	0.7	1.9	1.8	1.5	1.7	0.9
23	1.3	0.6	1.9	1.8	1.5	1.8	0.9

Legend -1.0 0.0 1.0 2.0 3.0

Figure 4. UHI hourly average intensities for each thermo-hygrometer for the intervals between January to April, May to august and September to December. (Fonts: The authors)

The first and third periods had the lowest UHI intensity, with an island of freshness in two thermo-hygrometers (TH02 and TH03). The second period showed the highest UHI intensity, with positive values during all hours, mainly between 5 pm and 7 am, while the other four months follow the annual period between 6 pm and 6 am.

TH03 showed low diurnal values, defining a well-defined urban freshness island in the first and third periods. In contrast, the values recorded during the nighttime were the highest. The proximity between this sensor and the sea intensifies the contrast, despite being located on the coastline and outside the urban canyon, its surrounding is composed of an impervious surface (concrete and asphalt mainly).

The constant sea winds contribute to the dispersion of income radiation during the day. At night the behavior of the terrestrial breeze, the higher sea surface temperature and the emission of radiation absorbed by the surface contribute to the formation of UHI in this location. Comparing to the UHI recorded in TH03 and its surroundings, Gomez *et al*. (2017) also found the highest UHI values in the city of Ubatuba (Brazil) in high densely constructed areas near the sea.

Teixeira (2018) discusses the relationship between intense verticalization and the concentration of sea winds in the coastal neighborhoods of Recife. The values presented by TH05 confirms this. TH05, which is located leeward of the largest vertical density area of the city, showed high UHI intensity during all hours. Santos *et al*. (2017) also discusses the high values of air temperature in this location.

When observing the general characteristics of the UHI in Recife (Tab.1), it shows that TH03 also has the highest mean UHI intensity, it's followed by TH04, TH05 and TH06. These four sensors are surrounded by a low percentage of vegetation. Both TH04 and TH05 are predominantly surrounded by horizontal constructions (80% and 88% respectively) While TH06 is surrounded by 82% of vertical buildings. These values are in accordance to the correlation between UHI and land surface of Foissard *et al*. (2019) which founded higher preponderance of built-up fractions and low vegetation to explain the UHI intensity.

According to the classification of Fernández (1996), the intensity of the average intensity of the UHI in Recife is of low magnitude for the TH01, TH02 and TH07 thermo-hygrometers and of medium magnitude for the others.

Table 1. Summary of UHI characteristics in Recife. (Fonts: The authors)

	TH01	*TH02*	*TH03*	*TH04*	*TH05*	*TH06*	*TH07*
Mean UHI (in°C)	1.4	0.8	2.5	2.3	2.1	2.1	1.0
UHI highest monthly intensity (in °C)	2.5	1.8	3.9	3.4	4.5	3.3	2.9
Highest intensity period	May to august	July	May to September	May to August	March to Septembre	May to August	April
Highest intensity frequency	20h – 05h	19h – 00h	18h – 06h	18h – 06h	19h – 07h	18h – 06h	18h – 06h

Conclusions and Discussion

The low thermal amplitude is one of the main climatic characteristics of the tropical environment to which the city of Recife belongs. Despite its tropical characteristics such as: low thermal amplitude, proximity to the sea and high records of pluviosity and nebulosity. The presence of UHI was recorded in all studied locations.

The results showed that the magnitude of the average UHI in Recife varies between medium (2.0 to 3.0 degrees) and low (up to 2.0 degrees) presenting its greatest intensity at night, between 6:00 p.m. and 6:00 a.m., from the months of May to August.

The proximity to the sea both favored the formation of a freshness island during the day and intensified the heat island during the night on the coastline, due to the combination of the thermal characteristics of the surface materials and the higher temperature of the sea surface.

Acknowledgments

The authors thanks to:
Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
Facepe – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Literature

Amorim M. C. C. T., 2019. Ilhas de Calor Urbanas: Métodos e técnicas de análise. *Revista Brasileira de Climatologia*. 22-46.

Dubreuil V., Fante K.P., Planchon O., Sant'anna Neto J.L., 2019. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*. (39) 1446–1456. Doi: 10.1002/joc.5893

Fernández G. F., 1996. *Manual de climatologia aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Madrid: Editorial síntesis, S.A., 285p.

Foissard X., Quenol H., Dubreuil V., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate* 29 (2019) 100490. Doi : 10.1016/j.uclim.2019.100490

Gomez W., Amorim M.C.C.T., Dubreuil V., 2017. Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. *Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo - Brasil*. Vol.34. 82-94. Doi: 10.11606/rdg.v34i0.133193.

Lucena A.J., 2013. Notas conceituais e metodológicas em Clima Urbano e Ilhas de Calor. *Revista Continentes* (UFRRJ). 2(2), 28 - 59.

Oke T. R., 1987. *Boundary layer climates*. Second edition. Nova York, Routledge London and New York, 464p.

Santos P. F. C., Moreira A. B., Almeida C. A. P., Nobrega R. S., 2017. Conforto térmico e diferentes tipos de tempo meteorológico na cidade do Recife (PE). *Revista Entre-Lugar* (UFGD. Impresso), v. 8, 12-30.

Teixeira A. F. M., Neto A. P. Q., 2018. Privatização do acesso aos ventos marítimos: o caso do bairro Boa Viagem – Recife/PE. *Revista Movimentos Sociais & Dinâmicas Espaciais*. v. 7, n. 1, 142 – 157.

Wanderley L. S. A., Nobrega R. S., Moreira A. B., Anjos R. S., Almeida C. A. P., 2018. As chuvas na cidade do Recife: Uma climatologia de extremos. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, 149-164.

MÉTHODE DE DESCENTE D'ÉCHELLE STATISTIQUE A PARTIR DE L'IMAGERIE SATELLITE THERMIQUE MODIS : APPLICATION A LA GIRONDE VITICOLE

MORIN G.[1], LE ROUX R.[2], LEMASLE P.G.[1], QUENOL H.[1]

1 LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, Rennes, France (gwenael.morin@univ-rennes2.fr)
2 CIRAD, UR-Forêts et Sociétés, Montpellier, France

Résumé : *L'utilisation des données de température de surface est aujourd'hui répandue en modélisation climatique, notamment les données satellitaires journalières des satellites MODIS. Toutefois, leur résolution spatiale est limitée pour appréhender la variabilité climatique aux échelles locales. Cette étude vise à employer des méthodes de descente d'échelles dans le but d'améliorer la résolution spatiale de la donnée thermique. Les températures de surface journalières (MOD11A1 et MYD11A1), ont été reconstruites avec les moyennes sur 8 jours (MOD11A2 et MYD11A2). Une méthode de machine learning (Support Vector Machine) a été utilisée pour modéliser les températures de surfaces (diurnes et nocturnes) en fonction de variables topographiques (altitude, pente, exposition nord-sud, exposition est-ouest et coordonnées géographiques). Les indices bioclimatiques basés sur les sommes de températures journalières ont été calculés avec les températures de surface journalières à l'échelle de la Gironde entre 2012 et 2018 et à plusieurs résolutions spatiales (90 m, 250m et 500m).*

Mots clés : *modélisation climatique ; télédétection thermique ; vignobles ; température de surface ; facteurs locaux*

Summary: ***Statistical downscaling method based on modis thermal satellite imagery: application to the winegrowing Gironde***. *Surface temperature is now widely used in climate modelling. Data from MODIS satellites have a medium spatial resolution but an intraday temporal resolution. Spatial downscaling methods are applied in order to improve the spatial resolution of the thermal data by taking into account the terrain structure. In this study, daily surface temperature data (MOD11A1 and MYD11A1), sometimes missing, are reconstructed with 8-day averaged data (MOD11A2 and MYD11A2). A statistical method using the Support Vector Machine algorithm is used, the surface temperature data are modelled on a daily scale by products (day and night) as a function of topographical variables such as altitude, slope, north-south exposure, east-west exposure and geographical coordinates. The bioclimatic indices used mainly for air temperatures are then calculated with daily surface temperatures on the scale of the Gironde between 2012 and 2018 and at several spatial resolutions (90m, 250m and 500m).*

Key words: *climate modelling; thermal remote sensing; vineyards; land surfaces temperature; local factors*

Introduction

La température joue un rôle majeur dans le développement de la vigne et sur la qualité des vins. La variabilité des températures d'un terroir viticole, est largement influencée par les facteurs locaux. La modélisation climatique prenant en compte l'environnement local est une approche déterminante pour la profession viticole car elle permet de spatialiser les températures à l'échelle locale (Quénol, 2014). Les stratégies d'adaptation viticoles reposent sur les modélisations du climat futur à cette échelle. Récemment, des simulations climatiques aux échelles locales, fondées sur les relations statistiques entre températures de l'air enregistrées par des capteurs disposés dans les vignobles et les facteurs locaux (topographie, pente, orientation), ont été développés. Ces approches sont contraintes par les coûts d'installation et d'entretien des réseaux de capteurs de températures. Le potentiel de la télédétection thermique a été évaluée pour le suivi climatique en contexte viticole (Morin *et al.*, 2018) et plus particulièrement en modélisation climatique utilisant des méthodes de descentes d'échelles (Hutengs et Vohland, 2016 ; Sismanidis *et al.*, 2017 ; Bartkowiak *et al.*, 2019, Ebrahimy et Azadbakht., 2019).

Cette étude a pour objectif d'utiliser l'imagerie thermique MODIS pour modéliser les températures et des indices bioclimatiques à haute résolution spatiale à l'échelle de la Gironde viticole de 2012 à 2018. A la suite de travaux réalisés en modélisation climatique utilisant la température de l'air issue de réseaux de mesures denses (Le Roux *et al.*, 2017), la température

de surface MODIS à 1km de résolution spatiale a été évaluée. Une première étape a consisté à reconstruire la série temporelle des températures de surfaces minimales et maximales journalières (MOD-MYD11A1) en intégrant un composite sur 8 jours des satellites MODIS (MOD-MYD11A2). Une seconde étape a eu pour objectif de modéliser températures de surfaces (issues de l'imagerie) à différentes résolutions spatiales : 500m, 250m et 90m.

1. Données et Méthodes

1.1. Site d'étude et données

Le vignoble bordelais situé principalement au nord-est du département de la Gironde (France) est composé de 7 appellations d'origines contrôlées sur 58 637 hectares (www.planete-bordeaux.fr). La Gironde viticole regroupe 6 sous-régions : Le Médoc, Les Graves, l'Entre-Deux-Mers, le Sauternais, le Libournais et le Blayais-Bourgeais. Le contexte topographique de cette région viticole est gradué par des plaines sur la façade ouest bordant l'océan Atlantique jusqu'à un relief approchant les 120 m d'altitude à une centaine de kilomètres vers l'est. La Gironde et la Dordogne, deux cours d'eau principaux, traversent le vignoble bordelais et apportent une particularité topographique (fond de vallée) et climatique (entrées climatiques maritimes). Le climat de type océanique de Bordeaux (*Cfb*, Köppen) est caractérisé par une température moyenne annuelle de 12,7°C, des températures minimales moyennes d'environ 2°C pour les mois les plus frais (Décembre-Février) et des températures maximales moyennes d'environ 25°C pour les mois les plus chauds (Juin-Août). Le cumul de précipitations annuelles est en moyenne de 931 mm (https://fr.climate-data.org/).

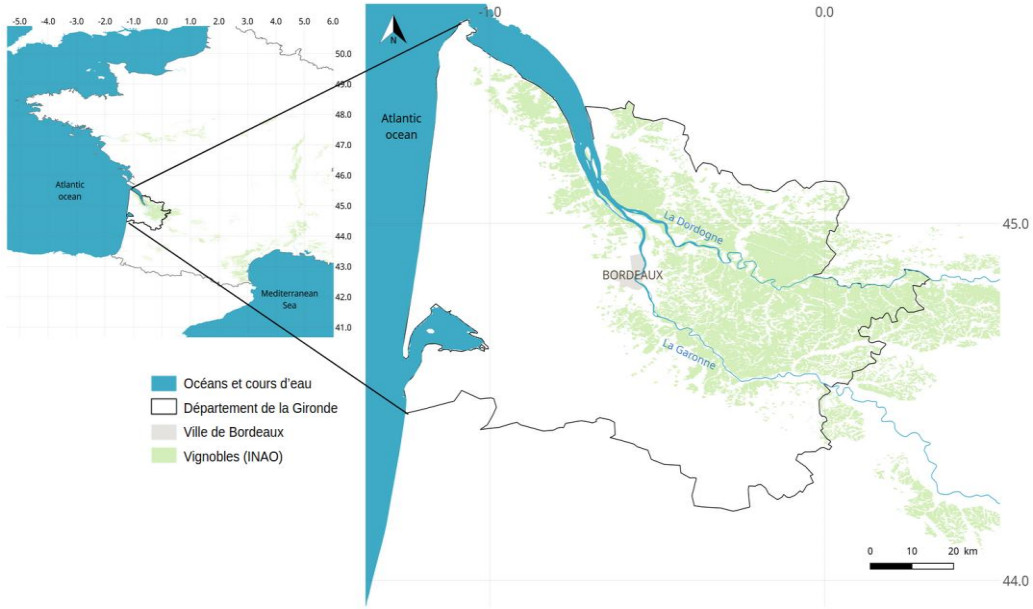


Figure 1. Localisation du site d'étude : La Gironde viticole.

Les données topographiques sont issues de Modèles Numériques de Terrain (MNT) téléchargées sur *Earth Explorer* (https://earthexplorer.usgs.gov/).Ils sont issus (Tab.1a) de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission - NASA) pour la résolution de 3 arc-second (~90 mètres) et de GMTED2010 - Global Multi-résolution Terrain Elevation Data (GMTED10 - USGS) pour une résolution de 7,5 arc-second (~250 mètres) et de 15 arc-second (~500 mètres). Les variables topographiques sont dérivées de ces MNT : altitude (mètres), pente (degrés), orientation Nord-Sud (degrés), orientation Est-Ouest (degrés) et coordonnées géographiques (latitudes/longitudes).

Les températures de surfaces (LST) (Tab.1b) ont été acquises par les satellites Terra (MOD)

et Aqua (MYD) embarquant le capteur MODIS et téléchargées via *AppEEars* (https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/) sur la Gironde de 2012 à 2018. Ces deux satellites acquièrent quatre données quotidiennes : *Terra* en orbite descendante acquiert à environ 10h30 et 22h30 et *Aqua* en orbite ascendante à environ 01h30 et 13h30 (Wan *et al.*, 2008). Pour cette étude, deux types de produits ont été utilisés : MOD11A1/MY11A1 (quotidien) et MOD11A2/MYD11A2 (composite 8 jours).

Tableau 1. Données utilisées

Donnée	Source	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Variable
(a) Modèle numérique de terrain	SRTM Digital Elevation Model - NASA	90 m	-	Altitude (m); Pente (°); Orientation N/S (°); Orientation E/W (°); Coordonnées (LatLong)
	GMTED - USGS	250 m	-	
		500 m	-	
(b) Températures de surfaces	MOD11A1/ MYD11A1	1000 m	Quotidien (2 nocturnes, 2 diurnes)	Température minimale et maximale de surface (°C)
	MOD11A2/ MYD11A2	1000 m	Composition de 8 jours (2 nocturnes, 2 diurnes)	Température minimale et maximale de surface (°C)

1.2. Méthodologie

1.2.1. Méthodologie de descente d'échelle spatiale des températures de surfaces

La méthode de descente d'échelles (Fig.2) est divisée en trois étapes et a été appliquée pour chaque produit MODIS : MYD_NIGHT, MOD_DAY, MYD_DAY et MOD_NIGHT. La première étape a été le téléchargement et le pré-traitement des températures de surfaces MODIS et des modèles numériques de terrain à 30 m, 90 m, 250 m, 500 m et 1km. La seconde étape a consisté à la reconstruction de la série temporelle journalière des températures de surfaces (MOD11A1-MYD11A1). Pour chaque pixel, si la valeur du produit journalier est manquante et il est remplacé par la donnée du composite moyenné sur 8 jours (MOD11A2-MYD11A2). La troisième étape a été d'extraire les variables topographiques à partir du MNT. Puis, la dernière étape a été la mise en relation des températures de surfaces avec les variables topographiques à l'aide de l'algorithme SVM (Cortes et Vapnik, 1995). Les packages caret (Kuhn, 2012) et e1071 (Meyer *et al.*, 2014) ont été utilisés dans le logiciel R. Un noyau radial a été utilisé et les valeurs optimales des hyper paramètres ont été déterminées par 5 validations croisées. Ainsi, le meilleur modèle journalier a été appliqué et les températures de surfaces ont été prédites à différentes résolutions spatiales : 90 m, 250 m et 500 m.

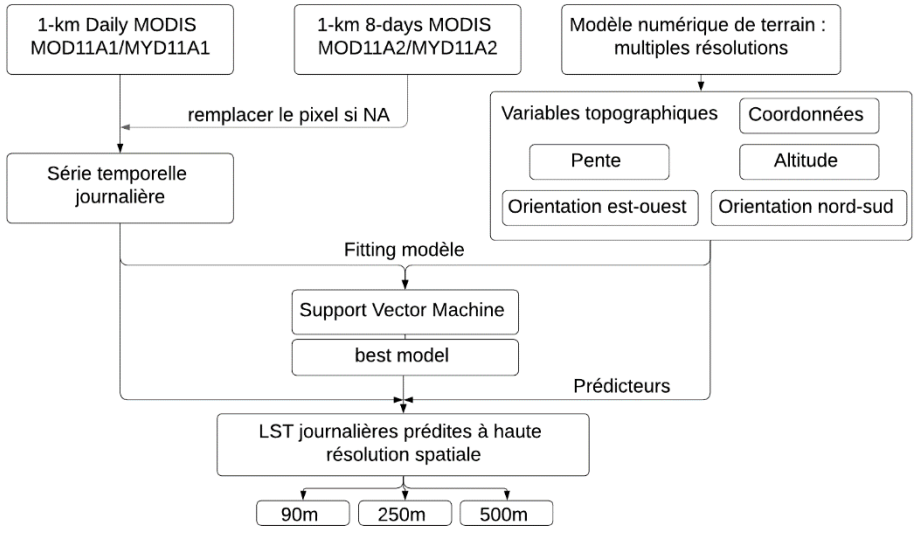


Figure 2. Schéma de traitements

1.2.2. Calcul d'indices bioclimatiques

Plusieurs indices bioclimatiques spécifique en viticulture (ex : Huglin et Winkler) ont été calculés (Tab.2). Ces indices, basés sur des sommes de températures journalières durant la saison végétative de la vigne, permettent d'évaluer l'impact de la température sur la croissance de la vigne et sur les caractéristiques des raisins (niveau de sucre, par exemple).

Tableau 2. Indices bioclimatiques

Indice	Equation	Référence
Winkler	$WI = \sum_{1.04}^{31.10}(Tmean - 10)$	Jones *et al.*, 2009
Huglin	$HI = \sum_{1.04}^{30.09}\left\lceil \frac{(Tmean - 10) + (Tmax - 10)}{2} \right\rceil * k$	Huglin, 1978

2. Résultats

2.1. Suivi climatique de la saison végétative

Les quatre produits MODIS (MYD_NIGHT, MOD_DAY, MYD_DAY et MOD_NIGHT) ont été traités séparément afin de d'identifier l'impact de la prise de vue des images thermiques. Par exemple, pour l'année 2012 avec 90m de résolution spatiale (Fig.3), les produits du satellite Terra (MOD) ont eu des valeurs mensuelles de températures de surfaces plus élevées que celles des températures de surfaces issues du satellites Aqua (MYD). Pour les températures maximales, les mois de mai, d'août et de septembre, des secteurs plus chauds ont été identifiés à 13h30 comparés aux données de 10h30. Pour les températures minimales, sur l'ensemble des mois de la saison végétative, les températures de surfaces acquises à 22h30 étaient moins élevées que les températures de surfaces acquises à 01h30 (Fig.3).

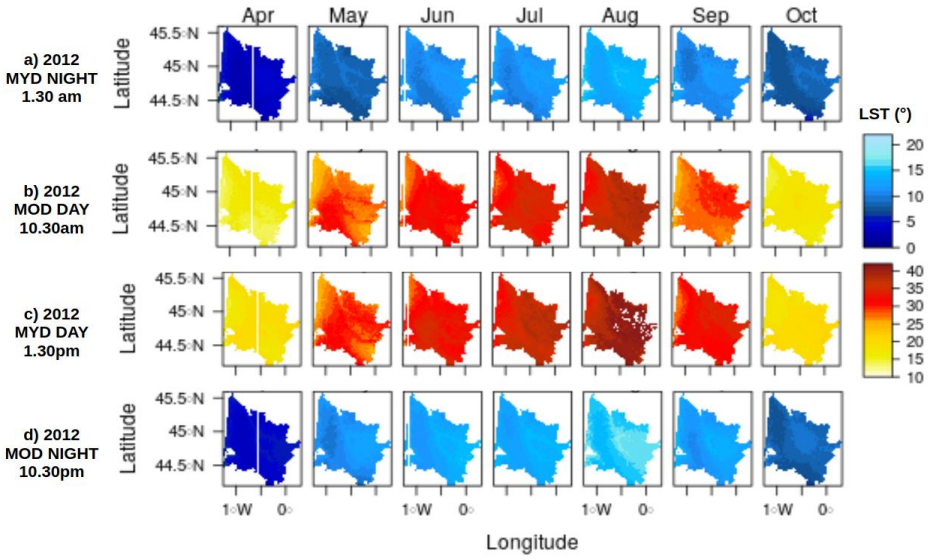


Figure 3. Températures de surfaces mensuelles pour l'année 2012 prédites à 90 m pour les quatre produits MODIS : a) MYD_NIGHT (1.30am), b) MOD_DAY (10.30am), c) MYD_DAY (1.30pm) et d) MOD_NIGHT (10.30pm).

2.2. Indices bioclimatiques

L'indice de Huglin de 2012 calculé à partir des températures de surfaces prédites sur la Gironde a permis de donner plus de poids aux températures maximales contrairement à l'indice de Winkler qui est basé sur le cumul des températures moyennes. A l'échelle de la Gironde, ces

indices ont une structure spatiale globalement similaire. Les valeurs les plus faibles (≈ 1900°C pour Huglin et 1340°C pour Winkler) sont concentrées sur le littoral et au sud de la Gironde regroupant ainsi les secteurs non viticoles. Les valeurs d'indices les plus élevées (> 2000°C pour Huglin et > 1700°C pour Winkler) sont situés du centre au nord-est de la Gironde. Ces secteurs plus chauds sont concentrés dans les fonds de vallée de la Dordogne et de la Gironde avec un secteur marqué au sud du Libournais (Fig.4).

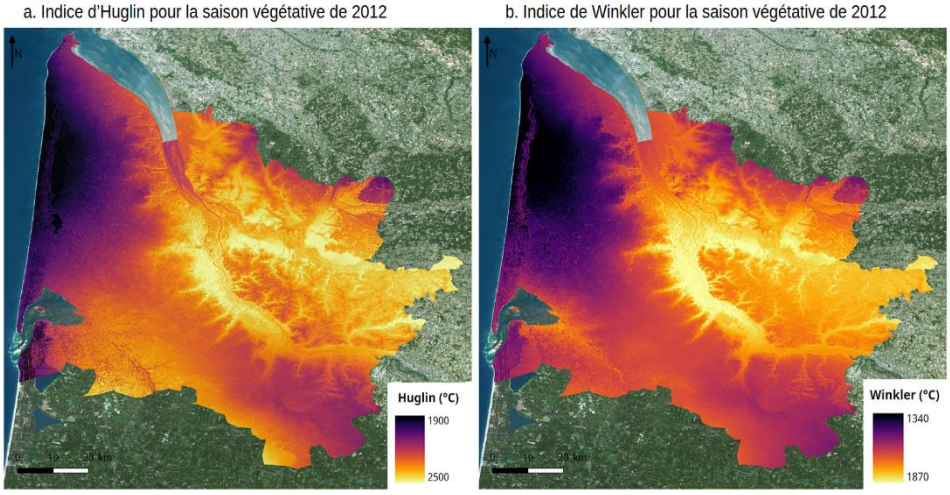


Figure 4. Indices bioclimatiques pour l'année 2012 à 90 m de résolution : a) Huglin et b) Winkler.

Conclusion et Discussion

Cette étude a eu pour objectif d'évaluer une méthode de descente d'échelles spatiales de températures de surfaces MODIS pour le calcul d'indices bioclimatiques sur la Gironde. La méthode de descente d'échelles spatiales fondée sur la relation entre températures et facteurs locaux a été utilisée pour analyser les effets des facteurs locaux sur la variabilité climatique à plusieurs échelles (1 km, 500 m, 250 m, 90 m et 30 m). Cependant, le changement de résolution entre la donnée brute, la température de surfaces MODIS à 1 km, et la donnée « prédite » engendrent d'importants biais. Les résolutions spatiales de 500 m et 250 m semblent les mieux adaptées pour le calcul d'indice bioclimatique régional permettant ainsi d'identifier les effets topographiques sur la répartition des structures thermiques. Dans la continuité de cette étude et dans le but d'évaluer l'origine et le gradient des biais, il sera nécessaire de valider les structures thermiques de températures de surfaces prédites par les structures thermiques modélisées à partir des températures de l'air issues de stations météorologiques réparties sur la Gironde. Dans le but d'améliorer la descente d'échelle et la prédiction des températures de surfaces, des données de couverture et d'occupation du sol et des données de végétation seront également intégrer dans l'analyse en tant que prédicteurs (Sismanidis, 2017 ; Bartkowiak, 2019 ; Zhao, 2019).

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet AVVENIR « Adaptation de la filière vigne et vin aux enjeux environnementaux-innovations et recherche » financé par le Conseil Interprofessionnelle du Vin de Bordeaux (CIVB). Les auteurs tiennent à remercier le CIVB ainsi que les partenaires et les professionnels viticoles participants à ce projet.

Bibliographie

Bartkowiak P., Castelli M., & Notarnicola C., 2019. Downscaling land surface temperature from MODIS dataset with random forest approach over alpine vegetated areas. *Remote Sensing*, 11(11), 1319.

Cortes C. & Vapnik V., 1995. Support-vector networks. *Mach. Learn*, 20, 273–297.

Ebrahimy H., Azadbakht M., 2019. Downscaling MODIS land surface temperature over a heterogeneous area: An investigation of machine learning techniques, feature selection, and impacts of mixed pixels. *Comput. Geosci.*, 124, 93–102.

Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C. R. Acad. Agric.* 1117–1126.

Hutengs C., Vohland M., 2016. Downscaling land surface temperatures at regional scales with random forest regression. *Remote Sens. Environ.*, 178, 127–141.

Jones G., Moriondo M., Bois B., Hall A. & Duff A., 2009. Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Bull. OIV*, 82, 507–517.

Kuhn M., 2012. *The caret package. R Found. Stat. Comput.*, Vienna, Austria. URL: http Cran R-Proj. Org Package Caret.

Le Roux R., De Rességuier L., Corpetti T., Jégou N., Madelin M, Van Leeuwen C., Quénol H., 2017. Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing areas. *Agric. For. Meteorol*. 247, 159–169.

Meyer D., Dimitriadou E., Hornik K., Weingessel A., Leisch F., Chang C.C. & Lin C.C., 2014. e1071: Misc functions of the Department of Statistics (e1071). TU Wien. R Package Version, 1.

Morin G., Le Roux R., Sturman A. & Quénol H., 2018. Évaluation de la relation entre températures de l'air et températures de surface issues du satellite MODIS : application aux vignobles de la vallée de Waipara (Nouvelle-Zélande). *Climatologie*, 62-83.

Quénol H., 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier Tec&doc, Cachan, 444p.

Sismanidis P., Keramitsoglou I., Bechtel B. & Kiranoudis C. T., 2017. Improving the downscaling of diurnal land surface temperatures using the annual cycle parameters as disaggregation kernels. *Remote Sensing*, 9(1), 23.

Wan, Z., 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sens. Environ.* 112, 59–74.

Zhao W., Duan S. B., Li A. & Yin G. A., 2019. Practical method for reducing terrain effect on land surface temperature using random forest regression. *Remote sensing of environment*, 221, 635-649.

MORPHOLOGIE URBAINE ET ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À L'ÉCHELLE FINE DANS UN QUARTIER DE BEYROUTH (LIBAN)

MOUHAMAD ALI S.[1], ADJIZIAN GÉRARD J.[1], BADARO SALIBA N.[1], ZAAROUR R.[1], GÉRARD P.C.[1], BITAR H.[2]

1 Centre de Recherche en Environnement, Espace Méditerranée Orientale (CREEMO), Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Saint Joseph (USJ), Beyrouth, Liban (soumaya.mouhamadali@net.usj.edu.lb)
2 Institut d'Urbanisme, Académie Libanaise des Beaux-arts (Alba), Université de Balamand, Tripoli, Liban

Résumé : *Depuis plus d'un demi-siècle, la ville de Beyrouth enregistre des transformations morphologiques remarquables. Pour mieux appréhender l'effet de la morphologie urbaine et de sa transformation sur le microclimat d'une ville, nous avons analysé l'évolution de la température en relation avec la morphodynamique du bâti entre 1962 et 2017 à Furn el Hayeck ; un quartier de la capitale libanaise. Grâce au logiciel de simulation 3D Envi-met (2015), il a été possible d'analyser l'évolution de la température durant un cycle journalier (24 heures). L'approche comparative de deux cartes du bâti révèle l'importance de la morphologie urbaine sur le microclimat et le rôle de la végétation dans le rafraichissement de la température.*

Mots clés : *microclimat ; Envi-met ; Furn El Hayek ; ville ; végétation*

Summary: ***Urban morphology and fine-scale temperature evolution in a neighbourhood of Beirut (Lebanon).*** *For more than half a century, the city of Beirut had undergone remarkable morphological transformations. To better understand the effect of urban morphology and its transformation on the microclimate of a city, we analyzed the evolution of temperature in relation to the morphodynamics of buildings between 1962 and 2017 in Furn el Hayeck; a neighborhood of Achrafiyeh. Using Envi-met 3D simulation software (2015), it was possible to analyze the temperature change during a daily cycle (24 hours). The comparative approach of two building maps reveals the importance of urban morphology on the microclimate and the role of vegetation in cooling climate.*

Key words: *microclimat, Envi-met; Furn El Hayek; city; vegetation*

Introduction

La population urbaine augmente d'une manière constante et elle représente aujourd'hui la plus grande partie de la population mondiale. Selon un rapport publié par le FNUP en 2007, le taux d'urbanisation a franchi les 50% et confirme une mutation profonde de la société humaine avec un passage d'une société majoritairement rurale à une société majoritairement urbaine (Najjar, 2005). Cette tendance est amenée à s'accentuer dans les prochaines années où le pourcentage de la population urbaine devrait se situer au-dessus de 61% vers 2030. La ville attire ainsi une part importante des activités socio-économiques (logements, transports, réseaux, etc.), avec toutes les préoccupations économiques, sociétales et environnementales qui en découlent (Junk, 2003). La configuration des quartiers urbains, les propriétés thermiques et l'imperméabilité des matériaux de construction ainsi que la perte des espaces verts sont des facteurs qui entrainent la modification du microclimat et contribuent à l'élévation des températures à cause de l'effet de l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) (Givoni, 1978).

Ce phénomène implique une augmentation des températures enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales (Akbari,1992). Face à cet enjeu, les études sur le microclimat urbain se concentrent sur la définition de stratégies qui vont atténuer l'effet d'îlot de chaleur d'une part et, d'autre part, mener à l'amélioration des ambiances et du confort thermique en espaces extérieurs (Bozonnet, 2006).

La végétation urbaine dense peut jouer donc un rôle important dans les stratégies urbaine (OKE, 1981). Selon Marjorie Musy (2014), la végétation est un outil de gestion permettant de lutter contre l'ICU, de gérer le cycle hydrologique de la ville, d'apporter une qualité d'ambiance qui influence les usages et les perceptions des habitants, etc... Elle est présente sous différentes

configurations et à des échelles variées : à celle du bâtiment en façade et en toiture, à celle du quartier dans les rues et les espaces publics et à celle de la ville où l'on retrouve les parcs, jardins et trames vertes. La végétation permet donc de contrer la hausse des température grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration qu'elle produit (Smoyer *et al.*, 2000).

Beyrouth, capitale du Liban, est aujourd'hui confrontée à une nette dégradation de l'environnement (Zaarour *et al.,* 2008 ; Adjizian-Gerard *et al.,* 2013). La tendance croissante à la densification horizontale et verticale, laisse peu de place aux espaces verts devenus rarissimes. Le tissu urbain beyrouthin est très hétérogène et sa densité varie suivant les quartiers (Fahed, 2017). Compte tenu de cette urbanisation anarchique, nous nous sommes intéressés à traiter l'impact de l'évolution de la morphologie urbaine sur la modification de la température, dans un quartier de Beyrouth, grâce au logiciel de simulation 3D Envi-met (2015). L'évolution thermique, en relation avec la morphodynamique a été obtenue à partir d'une approche comparative du bâti entre 1962 et 2017. Le choix de travailler à l'échelle fine avait pour objectif d'appréhender l'influence de la végétation sur le microclimat urbain.

1. Données et Méthodes

1.1. Zone d'étude

D'une superficie de 20 km^2, Beyrouth- Municipe se situe au centre du pays, le long de la côte méditerranéenne. La ville est limitée à l'est par le Mont-Liban, puissante muraille calcaire qui dépasse 3 000 mètres d'altitude au nord et 2 000 mètres au sud. Son site est un cap saillant orienté vers l'ouest, s'avançant de presque 6 kilomètres dans la mer et bordé au nord comme à l'ouest par la Méditerranée, au sud par une plaine où a été implanté l'aéroport. La capitale libanaise occupe donc une presqu'île. Beyrouth a une topographie complexe. Le site est constitué deux collines principales. La première, à l'Est (secteur d'Achrafieh), culmine à 100 m. La seconde, dans le secteur de Tallet el Khayat (à l'ouest), est légèrement moins élevée, puisque son altitude maximale ne dépasse pas 90 m. Les deux collines sont séparées par un col qui, à 59 m d'altitude, constitue le point le plus bas de la ligne de crête. Avec des étés chauds et humides et des hivers doux et pluvieux, Beyrouth jouit d'un climat méditerranéen (Naaman., 2015)

Furn El Hayek, est un quartier localisé au cœur d'Achrafiyeh, à l'Est de Beyrouth. D'une surface d'environ 161.000 m2, il est caractérisé par une morphologie urbaine représentative des évolutions qu'a connues la capitale et des mutations socio-économiques de la ville de Beyrouth.

Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

1.2. Simulation du microclimat avec ENVI-met

ENVI-met version 4.0 (2015) est un logiciel de simulation 3D capable de reproduire le comportement microclimatique et physique des espaces urbains et ruraux (Bruse, 2007). La configuration géométrique (x,y,z) de cette zone a été saisie. Chaque pixel correspond à une résolution réduite 5m x 5m x 5m (dx=5m, dy=5m et dz=5m). Les Figures 2 et 3 montrent les modèles 2D du bâti pour 1962 et 2017. Ils ont été tracés à l'aide d'ENVI-met.

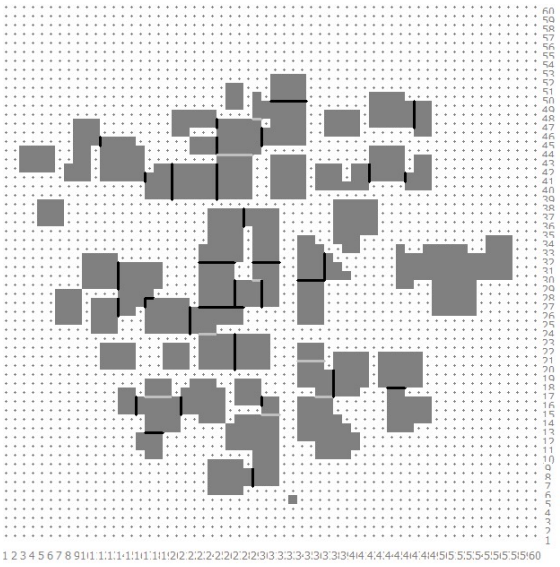


Figure 2. Le modèle 2D, crée à l'aide d'ENVI-met, 1962.

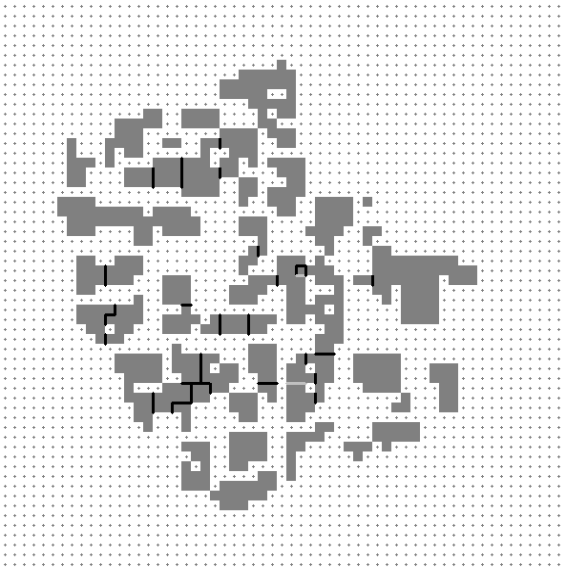


Figure 3. Le modèle 2D, crée à l'aide d'ENVI-met, 2017.

La simulation microclimatique a été réalisée pour une seule journée chaude d'été : celle du 23 Août 2017. La période de simulation est de 24 heures. Le temps de départ choisi pour le calcul est 5:00 TU. A cause de l'absence de stations météorologiques urbaines, les données climatiques d'entrée ont été obtenues à partir d'une descente d'échelle à 250 m avec le modèle WRF. La température maximale est de 30°C et la minimale s'élève à 25°.

Pour mieux appréhender l'impact de la morphologie urbaine, les mêmes conditions climatiques ont été appliquées pour les deux années concernées.

2. Analyse et discussion : Rôle de la végétation

La comparaison des deux cartes représentant les résultats des modèles microclimatiques de 1962 et 2017 pour le quartier de Furn El Hayek (Fig.4, 5) révèle une hausse remarquable des températures du quartier. La simulation donne une valeur de 23°en 1962 et de 27° en 2017 pour la température minimale. La valeur maximale passe de 26°C (1962) à 30° (2017). L'augmentation est de l'ordre 16 %. Cette élévation thermique serait due aux transformations du tissu urbain caractérisé par une augmentation de la surface bâtie et de la hauteur moyenne des constructions. Les bâtiments ont diminué en nombre (97 bâtis en 1962, 59 bâtis en 2017) mais ont gagné, de manière remarquable, en surface et en hauteur.

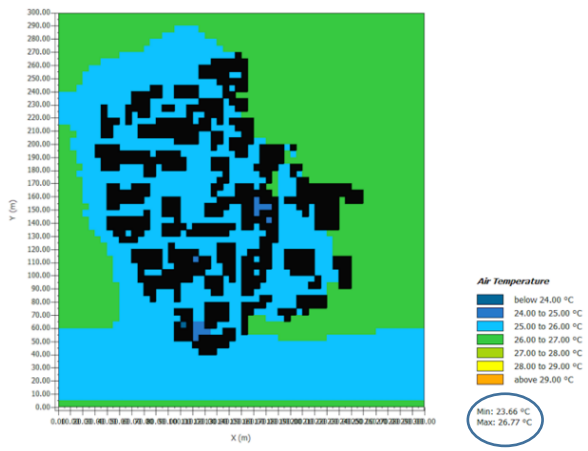


Figure 4. Cartes de la température de l'air en 1962 à 14 :00.

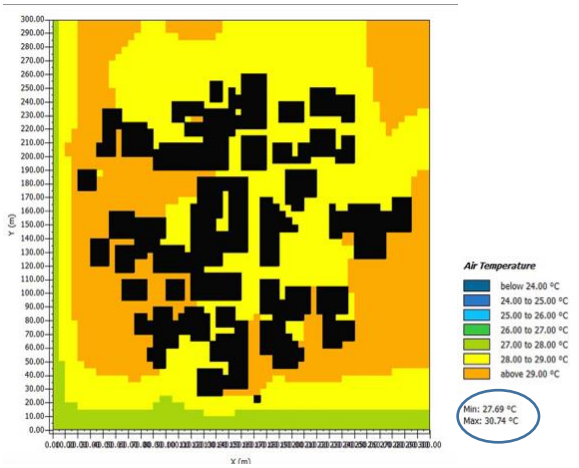


Figure 5. Cartes de la température de l'air en 2017 à 14 :00.

Les modèles d'arbres tridimensionnels sont utilisés dans la simulation comme les pins, les oliviers, les orangers, et les palmes. On trouve souvent ces types d'arbres dans les villes libanaises, notamment les pins. La simulation du quartier végétalisé a été réalisée pour 2017. En effet, nous ne disposions d'aucune information pour 1962. Nous avons procédé à 2 simulations ; la première sans arbre, la seconde avec la végétation actuelle ; Pour ce faire, nous avons conservé les mêmes conditions aux limites et les mêmes conditions initiales.

Un premier résultat montre bien qu'en 2017 on observe une diminution remarquable de la température maximale de l'îlot qui passe de 30° (cas sans végétation) à 27° (cas avec végétation). La minimale qui est de 27° (sans végétation) tombe à 25° dans le cas simulé avec végétation. Ainsi, l'analyse de ce premier cas nous montre bien le rôle potentiel de la végétation urbaine comme régulateur du microclimat. La création d'un ilot de fraicheur contribue à faire baisser de manière significative les températures par des effets d'ombrage et par son action sur l'évaporation de l'eau du sol.

Cependant, l'ampleur de ces effets dépend considérablement du type de végétation urbaine concerné et de la quantité de la biomasse végétale. La variabilité des températures à l'intérieur de l'îlot d'habitation montre bien que là où la végétation est le plus dense, la diminution thermique est la plus significative (Fig. 6, 7, 8).

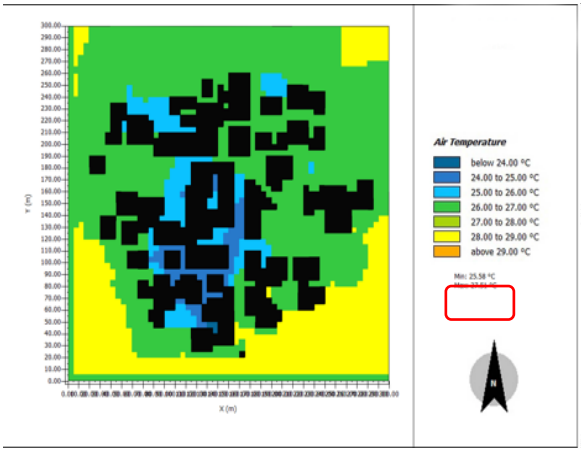


Figure 6. Cartes sans végétation de la température de l'air à 14 :00 crée à l'aide d'ENVI-met Leonardo.

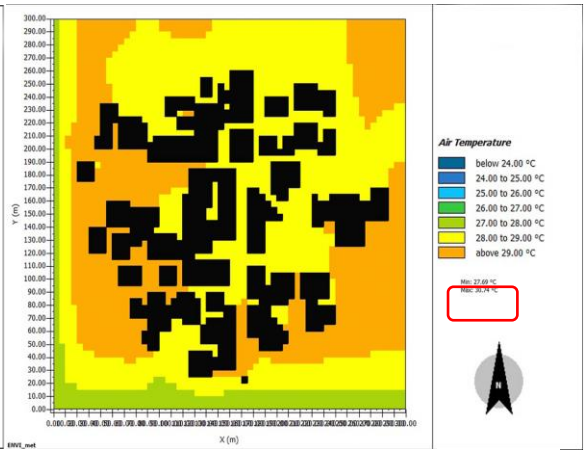


Figure 7. Cartes avec végétation de la température de l'air à 14 :00 crée à l'aide d'ENVI-met Leonardo.

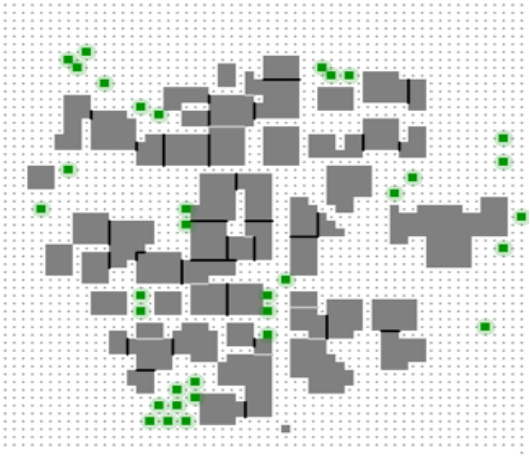


Figure 8. Le modèle 2D avec végétation, crée à l'aide d'ENVI-met Spaces.

En effet, la figure 7 montre bien que la température peut chuter de 3 degrés dans les zones végétalisées et à moins de 2 degrés dans celles qui ne le sont pas.

Il est vrai que ce premier résultat, obtenu à partir d'une simulation des températures sur une seule journée, devrait être confirmé et validé, notamment par une approche expérimentale. Néanmoins, l'approche comparative entre deux années a mis en avant l'impact des transformations morphologiques du bâti et de la végétation sur la qualité de l'ambiance climatique.

Conclusion

La ville attire ainsi une part importante des activités socio-économiques, avec toutes les préoccupations économiques, sociétales et environnementales qui en découlent. La densification, l'étalement du bâti, la transformation de la morphologie urbaine, la configuration des quartiers urbains, ainsi que la perte des espaces verts sont des facteurs qui entrainent la modification du microclimat et l'élévation des températures dans le milieu urbain. Face à cet enjeu, la plupart des études mettent en évidence les impacts positifs de la végétation urbaine en termes d'amélioration du microclimat urbain. La végétalisation des villes apparaît donc comme une stratégie pertinente pour la mitigation des températures, l'adaptation au changement

climatique. Or, il serait intéressant, en termes d'aménagement urbain, d'affiner la connaissance de l'effet de la végétation (selon l'espèce, la localisation, les conditions d'implantation,…) sur la qualité de l'environnement et de l'ambiance climatique des villes.

Remerciements

Je remercie M. Hassan Bitar pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur cette recherche ; mes remerciements s'adressent au conseil de la Recherche de l'Université saint-Joseph (Beyrouth, Liban) pour leur soutien financier.

Bibliographie

Naaman A., 2015. *Le Liban. Histoire d'une nation inachevée*. Paris, Editions Glyphe, 2200p.

Adjizian-Gérard J., Zaarour R., Badaro-Saliba N., Traboulsi M., Gérard P.C., Bakhache C., Kehdy N., & El Ess F., 2013. Beyrouth face à l'aridification du climat. *Sécheresse* 24: 214-23.

Akbari J., Davis S., Dorsano S., Huang J., & Winnett, S., 1992. *Cooling Our Communities: A Guidebook on Tree Planting and Light- Colored Surfacing*. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 217p.

Bozonnet E., 2006. Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti. XXIVème Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006. CIB. 2001. Towards Sustainable Roofing. CIN publication no.27

Bruse M., 2007. *Particle filtering capacity of urban vegetation: A microscale numerical approach*. W. Endlicher, editor, 61-70p.

Fahed J., Ginestet S., Kinab E. & Adophe L., 2017. *Simulation and comparison of urban heat island mitigation strategies under Mediterranean climate: The case of Dora district, Beirut, Lebanon*. Edinburgh, PLEA conference.

Givoni B., 1978. *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris, Editions du moniteur, 461p.

Junk J., Helbig A., & L uers J., 2003. Urban climate and air quality in trier/germany. *International Journal of Biometeorology*, 238p.

Musy M., 2014. *Une ville verte : Les rôles du végétal en ville*. Versailles, Editions Quae, 195p.

Najjar G., Kastendeuch P., Ringenbach N., Colin J., Stoll M.-p., Nerry F., Bernard J., 2005. Bilan radiatif et d'énergie dans un canyon urbain. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 2, 41-54.

Oke, T.R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparisons of scale model and field observations. *Int. J. Climatol*, 1, 237–254.

Smoyer K.E., Rainham D.G.C., & Hewko J.N., 2000. Heat-stress related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980–1996. *International Journal of Biometeorology*, 44(4):190-7.

Zaarour, R., Voiron-Canicio, C., Buccianti-Barakat, L., 2008. Création de données dans un contexte imprécis et incertain : application à la dynamique urbaine de Beyrouth. 1956-1999. *Incertitude & Environnement - La fin des certitudes scientifiques*. Nicole Vernazza-Licht, pp.141-150

CARACTÉRISATION DE LA SÉCHERESSE DANS LE BASSIN DU FLEUVE SÃO FRANCISCO, BRÉSIL : ÉVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE SUR LA PÉRIODE 1942-2016

MUTTI P.[1,2], DUBREUIL V.[2], BEZERRA B.[1,3]

1 Climate Sciences Post-graduate Program, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil (pedromutti@gmail.com ; bergson.bezerra@gmail.com)
2 LETG-Rennes-COSTEL, UMR-6554 CNRS, Université Rennes 2, Rennes, France (vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)
3 Department of Atmospheric and Climate Sciences, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Brazil

Résumé : *La sécheresse est un phénomène caractérisé par la persistance d'un déficit en eau résultant de la variabilité naturelle du système climatique. Cependant, ses impacts sont directement liés à la vulnérabilité de la population et des régions touchées. Dans ce contexte, les bassins versants inclus partiellement ou totalement dans les régions semi-arides sont particulièrement vulnérables aux effets de la sécheresse. L'objectif de l'étude est donc de caractériser l'évolution de la sécheresse dans le bassin versant du fleuve São Francisco pendant une période de 75 ans (1942-2016). La sécheresse a été évaluée à partir du déficit d'évaporation estimé par le bilan hydrique simplifié. Les analyses ont été effectuées en tenant compte de trois périodes de 25 ans : 1942-1966 ; 1967-1991 et 1992-2016. Les résultats ont montré que les 25 dernières années ont été les plus sèches de la série historique, avec une augmentation de la fréquence d'occurrence des mois avec déficit en eau et une diminution de l'occurrence des mois avec excédent d'eau.*

Mots clés : *aridité ; déficit d'évaporation ; vulnérabilité ; évapotranspiration ; changement climatique*

Summary: ***Drought characterization in the São Francisco watershed, Brazil: evolution of water balance during the 1942-2016 period****. Drought is a phenomenon characterized by the persistence of a water deficit resulting from the natural variability of the climate system. However, its impacts are directly related to the vulnerability of the affected population. In this context, watersheds partially or totally located in semi-arid regions are particularly vulnerable to the effects of drought. The objective of the study is, therefore, to characterize the evolution of drought in the São Francisco watershed over a 75-year period (1942-2016). Drought was assessed based on the evaporation deficit estimated by a simplified water balance. The analyses were carried out considering three 25-year periods: 1942-1966; 1967-1991 and 1992-2016. Results showed that the last 25 years were the driest in the historical series, with an increase in the frequency of occurrence of months with water deficit and a decrease in the occurrence of water surplus months.*

Key words: *aridity; evaporation deficit; vulnerability; evapotranspiration; climate change*

Introduction

La sécheresse est un phénomène caractérisé par la persistance d'un déficit en eau résultant de la variabilité naturelle du système climatique. Cependant, ses impacts sont directement liés à la susceptibilité géographique locale de la population et des régions touchées. Dans ce contexte, les bassins versants insérés partiellement ou totalement dans les régions semi-arides sont particulièrement vulnérables aux effets de la sécheresse. Au Brésil, le bassin versant du fleuve São Francisco (BVSF), partiellement inséré dans la région semi-aride du nord-est du pays, joue un rôle stratégique régional et national dans la production hydroélectrique, l'irrigation et le transport fluvial. Dans le BVSF, le développement agricole et l'approvisionnement en eau dans les parties basses du bassin (São Francisco Semi-aride – SFSA) dépendent principalement du régime hydrologique des parties hautes du bassin, où le climat subtropical tempéré d'altitude prédomine et où les précipitations sont plus abondantes (São Francisco Subtropical – SFST).

Des études récentes montrent que dans un contexte de changement climatique, les projections indiquent une réduction du volume des précipitations et une augmentation de la température dans le BVSF (Marengo *et al.*, 2012). Par conséquent, ces scénarios indiquent un déséquilibre plus accentué dans le bilan entre les offres (précipitations – P) et les demandes (évapotranspiration potentielle – ETP) atmosphérique d'eau. Ainsi, le bilan hydrique simplifié

(P – ETP) est un indicateur simple mais important de l'évolution de ce déséquilibre, représentant les conditions de sécheresse ou au contraire d'abondance hydrique sur une certaine région. Pourtant, l'évaluation du comportement climatologique du bilan hydrique dans le SFSA et le SFST permet de comprendre, de manière préliminaire, les caractéristiques de l'incidence de la sécheresse dans les deux régions climatiques les plus contrastées du bassin. Cette étude est donc une première étape importante pour étudier en profondeur les effets de la sécheresse sur la végétation, le sol et la disponibilité des ressources en eau dans tout le bassin versant. L'objectif de l'étude est ainsi de caractériser l'évolution de l'incidence de la sécheresse dans le SFSA et le SFST pendant une période de 75 ans (1942-2016).

1. Données et méthodes

1.1. Données

Les données de précipitations et de température moyenne mensuelles interpolées du produit CRU TS v 4.02, élaboré par la *Climate Research Unit* de l'université d'East Anglia, au Royaume-Uni, ont été utilisées. Ces données sont présentées dans une grille horizontale de 0,5º x 0,5º (~56 km, Fig.1). Une série synthétique mensuelle (1942-2016) de précipitations et de températures a été créée pour la SFSA et la SFST à partir de la moyenne des valeurs de chaque point de grille situé dans chaque région. Nous avons choisi d'utiliser les données interpolées du produit CRU TS v4.02 parce que la disponibilité des données observées dans la région est hétérogène à la fois dans l'espace et dans le temps. L'ETP a été calculée à partir des données de température en utilisant la méthode classique de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

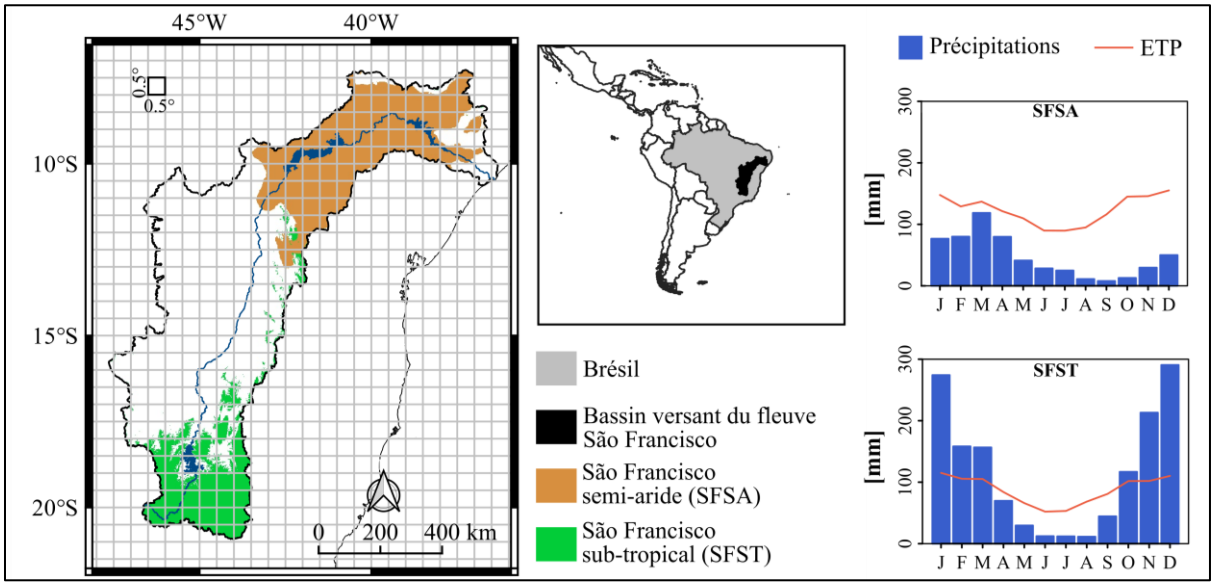


Figure 1. Localisation du bassin versant du fleuve São Francisco (à gauche) et climatologie des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la région semi-aride et subtropicale du bassin au cours de la période 1942-2016 (à droite).

1.2. Méthodes

La sécheresse a été évaluée à partir des éléments du bilan hydrique simplifié d'abord proposé par Thornthwaite (1948) et ensuite détaillé par Thornthwaite et Mather (1955). Ce bilan hydrique est basé sur la relation entre P et ETP, en tenant compte à la fois des flux d'offre d'eau et des effets de la demande atmosphérique et de la température. Les conditions de sécheresse seront évaluées à partir du déficit d'évaporation mensuel (DE – mm), qui consiste en la différence entre l'ETP et l'évapotranspiration réelle (ETR) mensuelle [équation 1] :

$$DE = ETP - ETR \qquad \text{[éq. 1]}$$

où:

$$ETR = \begin{cases} ETP, & P \geq ETP \\ P + dRU, & P < ETP \end{cases}$$

L'ETR obtenue à partir du bilan hydrique dépend de la relation entre P et ETP. Si P > ETP, la disponibilité en eau est maximale, la surface évapotranspire dans des conditions potentielles et il n'y a pas de DE. En revanche, si P < ETP, alors ETR sera égal à la valeur de P plus un volume d'eau stocké dans le sol évapotranspirant (dRU – mm), et DE représentera le déficit en eau atmosphérique. La valeur de dRU [équation 2] consiste en une estimation empirique de la différence entre la réserve utile d'eau dans le sol du mois précédent (RU_{i-1} – mm) et la réserve utile d'eau dans le sol du mois considéré (RU_i – mm) :

$$dRU_i = RU_{i-1} - RU_i \qquad \text{[éq. 2]}$$

où :

$$RU = RU_0 e^{[\sum(P-ETP)/RU_0]}$$

et $\sum$(P - ETP) est la somme cumulée des déficits pluviométriques (lorsque P < ETP) et RU_0 est la réserve utile du sol à la fin de la saison humide. Une RU_0 égale à 100 mm a été adoptée sur la base des recommandations des études antérieures du bilan hydrique dans le BVSF (dos Santos *et al.*, 2018 ; Lopes *et al.*, 2017). La méthodologie complète et détaillée de calcul du bilan hydrique se trouve dans Thornthwaite et Mather (1955), utilisée par exemple en France par Dubreuil (1996).

La classification des mois en termes de sécheresse en fonction du bilan hydrique et du DE est présentée dans le Tableau 1. Les limites de classes ont été choisies à partir d'une simple progression arithmétique.

Tableau 1. Classification des mois selon le bilan hydrique et le déficit d'évaporation (DE).

Bilan hydrique	*Classification des mois*
P > ETP, excédent hydrique	Hyper humide
P > ETP, reconstitution de la RU	Humide
P < ETP, DE < 40 mm	Faible déficience
P < ETP, 40 ≤ DE < 80 mm	Sec
P < ETP, 80 ≤ DE < 120 mm	Très sec
P < ETP, DE ≥ 120 mm	Extrêmement sec

Les analyses du bilan hydrique ont été effectuées sous l'aspect climatologique, en considérant les moyennes mensuelles, et également sous l'aspect séquentiel, en suivant les conditions de déficit ou d'excédent en eau dans le temps. Ces analyses ont été effectuées en considérant trois périodes de 25 ans, à savoir : 1942-1966, 1967-1991 et 1992-2016. Les trois périodes ont été choisies pour diviser les 75 années de données validées disponibles en trois groupes d'effectifs égaux. Il est important de rappeler que dans le SFSA, les précipitations sont concentrées en automne de février à mai (Fig.1), tandis que dans le SFST, les volumes précipités sont plus importants et se produisent de la fin du printemps à la fin de l'été (Fig.1).

2. Résultats et discussion

La Figure 2 montre la climatologie du bilan hydrique (moyennes mensuelles) pour chaque période de 25 ans dans le SFST et le SFSA, en comparaison avec la valeur moyenne pour l'ensemble de la période de 1942 à 2016. Dans le SFST, on observe qu'au cours des 75 années, il y a une réduction du surplus d'eau observé pendant la saison humide. Au cours de la période 1992-2016, par exemple, le mois de novembre a pratiquement cessé de présenter des excédents, avec des valeurs jusqu'à 25 mm inférieures à la moyenne climatologique. Il en va pratiquement de même pour le mois de février. Les différences les plus prononcées se sont produites précisément au début et à la fin de la saison des pluies, ce qui peut indiquer un raccourcissement de celle-ci. Les résultats peuvent également être associés à une augmentation de la température à la fin du printemps et de l'été, qui a déjà été observée dans d'autres études dans la région (da Silva *et al.*, 2018). Au STSA, la période de 1942 à 1966 a montré un comportement proche de la moyenne. Les 25 années suivantes ont montré un bilan moyen plus favorable tout au long de l'année. Cette situation s'est inversée au cours de la dernière période, de 1992 à 2016, où les déficits observés ont été plus importants que la moyenne. Dans la zone semi-aride, le bilan hydrique est principalement contrôlé par les précipitations, et les résultats indiquent donc qu'au cours des 25 dernières années, le volume des précipitations a diminué dans cette région.

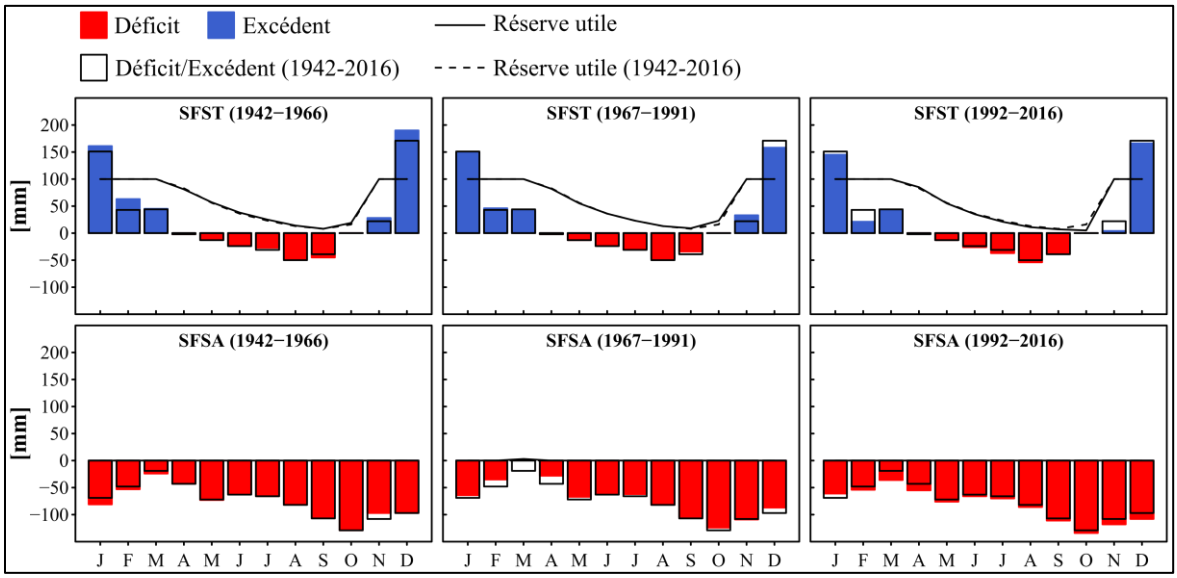


Figure 2. Bilan hydrique mensuel moyen dans le São Francisco subtropical (SFST) et semi-aride (SFSA) pour chaque période de 25 ans par rapport à la climatologie du bilan hydrique pour l'ensemble de la période 1942-2016.

Ces résultats peuvent être analysés plus en détail en observant le bilan hydrique mensuel séquentiel tout au long de la période d'étude (Fig.3). Dans le SFST, par exemple, on peut observer que les mois secs et très secs sont devenus plus fréquents à partir de 1994. A partir de 1982, on peut également noter que le mois de novembre est devenu plus fréquemment classé comme un mois humide au lieu d'être hyper humide. La figure montre également que la période de 2012 à 2016 a été l'une des plus déficitaires dans la région, avec une prolongation de la saison sèche et la saison des pluies moins intense que la normale. En fait, il s'agit de la période de sécheresse la plus sévère jamais enregistrée dans la région du nord-est du Brésil (Marengo *et al.*, 2017). Dans le SFSA, la période de 1963 à 1989 a été marquée par quelques années de fort bilan hydrique positif : 1964, 1974, 1980-81 et 1985. En revanche, de 1989 à 2016, ce n'est qu'en 2008 qu'un mois hyper humide a été observé. Comme pour la SFST, la période de 2012 à 2016 a également été critique, 95 % des mois étant classés au moins comme secs.

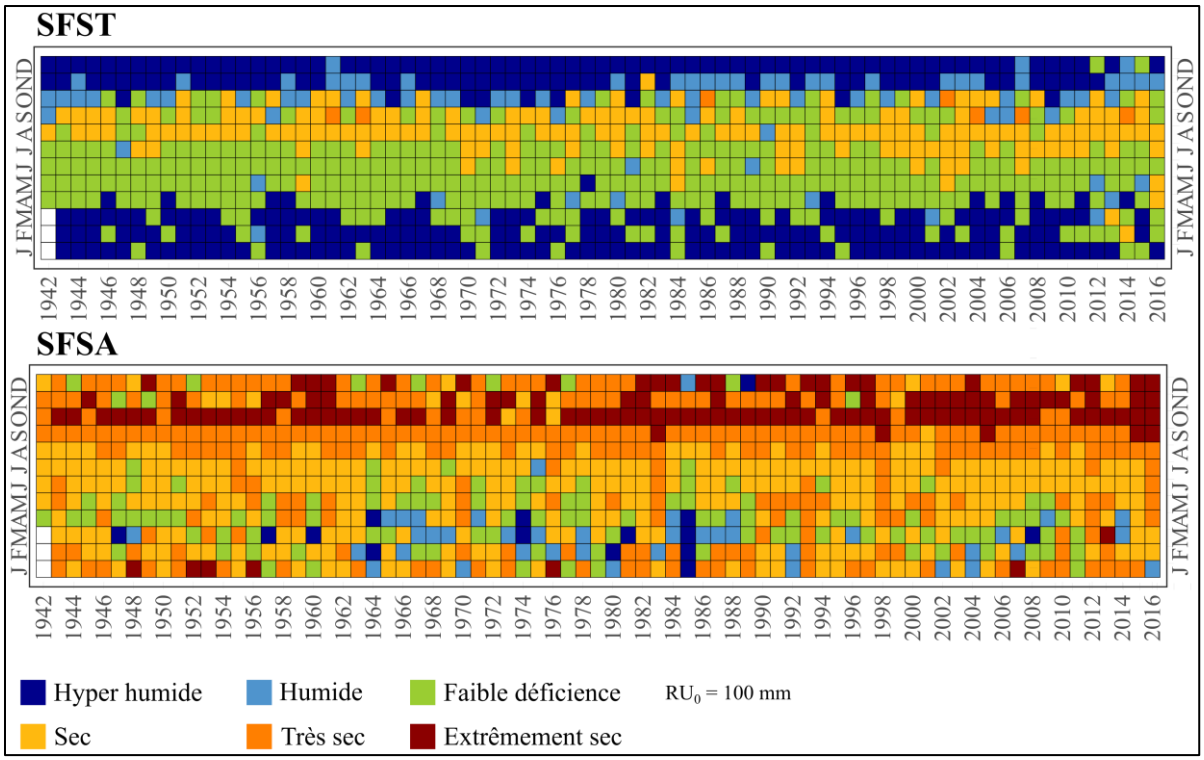


Figure 3. Variabilité interannuelle du bilan hydrique dans le São Francisco subtropical (SFST) et semi-aride (SFSA) au cours de la période 1942-2016.

Ces changements dans les fréquences d'occurrence des classes de bilan hydrique peuvent être mieux observés sur la Figure 4. Dans le SFST, par exemple, il est possible de remarquer la réduction progressive de l'occurrence des mois hyper humides aux mois de novembre, février et mars, qui sont les mois de début et de fin de la saison humide. En outre, les mois secs et très secs sont devenus plus fréquents dans cette région au cours des 25 dernières années. Dans le SFSA, la Figure 4 montre également une réduction évidente de la fréquence des mois humides et hyper humides pendant la saison des pluies. Cela indique que même pendant la saison humide, le volume des précipitations dans cette région ne peut pas satisfaire les demandes atmosphériques.

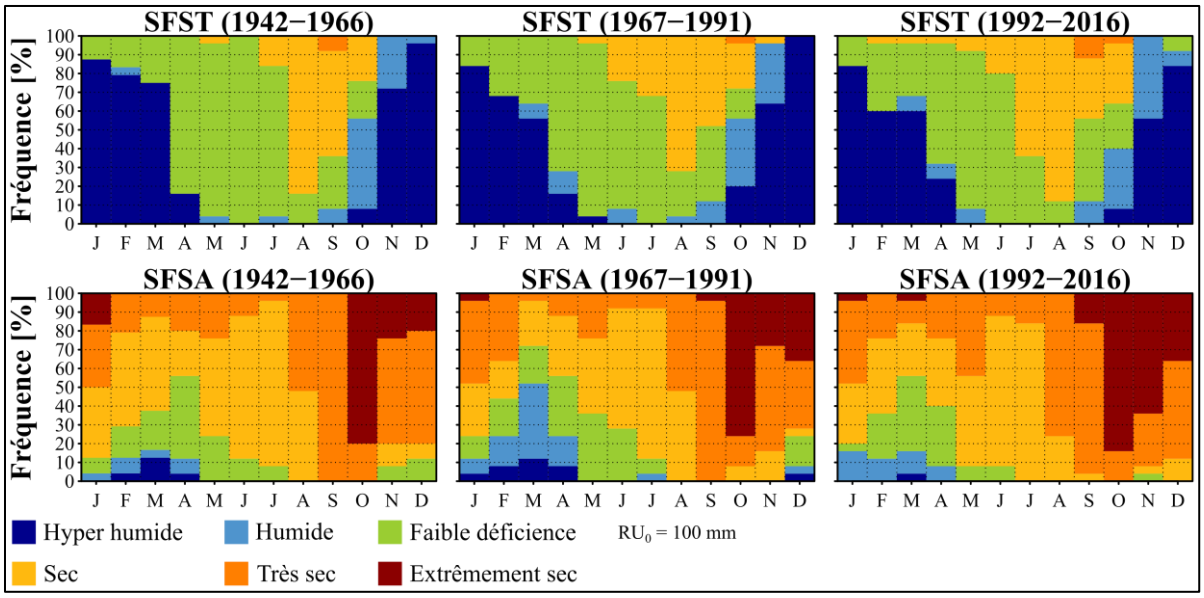


Figure 4. Fréquence mensuelle d'occurrence de chaque classe du bilan hydrique dans le São Francisco subtropical (SFST) et semi-aride (SFSA) dans chacune des trois périodes de 25 ans étudiées.

Les résultats trouvés dans cette étude préliminaire corroborent les études récentes menées dans le BVSF et dans la région du Nord-Est du Brésil. Dubreuil *et al.* (2019), par exemple, ont montré une tendance à l'intensification et à l'expansion des conditions d'aridité dans le nord-est du Brésil, qui a pu être observée avec l'évolution du bilan hydrique au cours des 75 dernières années tant dans le SFST que dans le SFSA. En ce qui concerne le SFST, Bezerra *et al.* (2019) ont également montré une tendance vers le raccourcissement de la saison des pluies, avec des volumes de précipitations moins intenses. L'analyse séquentielle du bilan hydrique a également montré les périodes de sécheresse extrême dans la région, comme 2012-2016, qui a été la plus sévère sécheresse jamais enregistrée dans la région du nord-est du Brésil (Marengo *et al.*, 2017).

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'évolution du bilan hydrique dans les régions subtropicales et semi-arides du BVSF, sur la période de 1942 à 2016 (75 ans). Les résultats ont indiqué une réduction de la fréquence des mois hyper humides dans la région du SFST, en particulier au début et à la fin de la saison des pluies. Dans le SFSA, les 25 dernières années ont présenté des déficits en eau plus importants que la moyenne, ce qui indique une intensification des conditions d'aridité dans la région. Il est important de noter que ce travail présente des indications préliminaires pour une étude plus approfondie de la sécheresse dans la région, qui devrait inclure l'analyse spatiale de l'incidence de la sécheresse, ainsi que ses effets sur la végétation et les ressources en eau du bassin versant étudié.

Bibliographie

Bezerra B. G., Silva L. L., Santos E Silva C. M., & de Carvalho G. G., 2019. Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 565–576. Doi: https://doi.org/10.1007/s00704-018-2396-6

Dos Santos D. P., Montenegro A. A. de A., Dos Santos C. S., Araújo D. C. Dos S., & Dos Santos, M. A. L., 2018. Dinâmica de vegetação, balanço climatológico, índices climáticos, na sub-bacia do Rio São Francisco. *Sustentare*, Edição Esp (II SBHSF), 44–55.

Dubreuil V., 1996. Synthèse géographique de la sécheresse dans les régions océaniques. *La Météorologie*, 8(15), 22–34. URL : http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/46994

Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O., & Sant'Anna Neto J. L., 2019. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1446–1456. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.5893

Lopes I., Guimarães M. J. M., de Melo J. M. M., & Ramos C. M. C., 2017. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. *Irriga*, 22(3), 443–457. URL: https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p443-457

Marengo J. A., Alves L. M., Alvala R. C., Cunha A. P., Brito S., & Moraes O. L., 2017. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 1–13. Doi: https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206

Marengo J. A., *et al*., 2012. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38(9–10), 1829–1848. Doi: https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5

Da Silva P. E., Santos e Silva, C. M., Spyrides M. H. C., & Andrade L. de M. B., 2018. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, (January), 1–17. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.5829

Thornthwaite C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. Doi: https://doi.org/10.2307/210739

Thornthwaite C. W., & Mather J. R., 1955. The Water Balance. *Climatology*, 8, 1–86.

LA REUSSITE DE LA RIZICULTURE PLUVIALE FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS L'HYDROSYSTEME DU BANDAMA (COTE D'IVOIRE)

N'DA K.C.[1], N'ZUE K.A.[2], SULTAN B.[3]

1 Institut de Géographie Tropicale, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan, Abidjan, Côte d'Ivoire (christndak@yahoo.com)
2 Direction de la Météorologie Nationale, Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique, Abidjan, Côte d'Ivoire (nzue2@yahoo.fr)
3 IRD-ESPACE-DEV, Maison de la Télédétection, Montpellier, France (benjamin.sultan@ird.fr)

Résumé : *Les besoins hydriques des cultures annuelles comme le riz évoluent en fonction des cycles de croissance. En vue de comprendre les récurrentes pertes de production du riz dans les paysanneries ivoiriennes, cette étude évalue le niveau de satisfaction hydrique de la riziculture pluviale dans le contexte climatique actuel. L'étude est menée au niveau de l'hydrosystème du Bandama en Côte d'Ivoire. Des données climatiques (pluie et évapotranspiration potentielle de 1981 à 2015) et agrotechniques (réserve hydrique du sol, coefficients et durées de cycles culturaux) ont été utilisées pour estimer le bilan hydrique efficace afin d'identifier les conditions agroclimatiques du milieu et de conclure à l'inadéquation entre apports et besoins en eau des phases reproductives des plantes qui conditionnent la réussite de la riziculture. La demande en eau de la phase reproductive n'est satisfaite que 5 années sur 10 dans le bassin versant, excepté à Korhogo (au nord du pays) où la pluviosité garantit 100% de réussite.*

Mots clés : *changement climatique, ; riz pluvial ; production agricole ; hydrosystème du Bandama ; Côte d'Ivoire*

Summary: ***Successful rainfarming facing climate change in Bandama hydrosystem (Ivory Coast).*** *The water requirements of annual crops such as rice change according to growth cycles. In order to understand the recurrent losses of rice production in Ivorian peasantry, this study assess the level of water satisfaction of rain-fed rice growing under current climatic contex. The study is being carried out at the Bandama hydrosystem in Ivory Coast. Climatic (rain and potential evapotranspiration from 1981 to 2015) and agrotechnical (soil water reserve, coefficients and durations of cropping cycles) data were used to estimate the effective water balance in order to identify the agro-climatic conditions and conclude that the inadequacy between water supply and water requirements of the reproductive phases of plants which conditions the success of fed rice cultivation. The demand for water in the reproductive phase is satisfied 5 out of 10 years only in the watershed, except Korhogo (in the north of the country) where rainfall is sufficient to guarantee 100% success.*

Key words: *climate change; rain-fed rice growing; agricultural production; Bandama hydrosystem; Ivory Coast*

Introduction

Les changements climatiques ne laissent aucune société indifférente, encore moins les pays dont l'économie et les sociétés dépendent exclusivement d'un système agricole traditionnel et pluvial (FAO, 2003 ; Sultan, 2011 ; GIEC, 2014). Dans un contexte où un mauvais apport d'eau pluviale aux plantes provoque une chute de rendement ou une perte de la récolte (L'homme et Monteny, 1982 ; Noufé, 2011 ; N'Da, 2016), le rapport de cause à effet entre climat et agriculture inquiète. Pourtant, depuis 1970, l'on assiste à une forte irrégularité de la pluviométrie et une baisse des rendements agricoles, notamment le riz (Roudier *et al.*, 2011b).

Le riz étant une culture annuelle exigeante en eau, sa réussite est conditionnée par l'adéquation entre les besoins en eau de ses phases de croissance sensibles et la répartition de la pluviométrie (Sié *et al*., 1997 ; Diomandé, 2013 ; Kouakou *et al*., 2013). Le défi que la Côte d'Ivoire affiche en créant un poste ministériel pour la promotion de la riziculture en 2019 est d'optimiser la production intérieure pour parvenir à l'autosuffisance en riz. Cependant, les conditions de variabilité pluviométrique croissante peuvent-elles garantir la satisfaction hydrique et la réussite des cultures de riz pluvial en Côte d'Ivoire ? L'étude se propose ainsi d'évaluer le niveau de satisfaction hydrique et de réussite des cultures du riz pluvial de cycles court et moyen dans le bassin versant du Bandama (Fig.1).

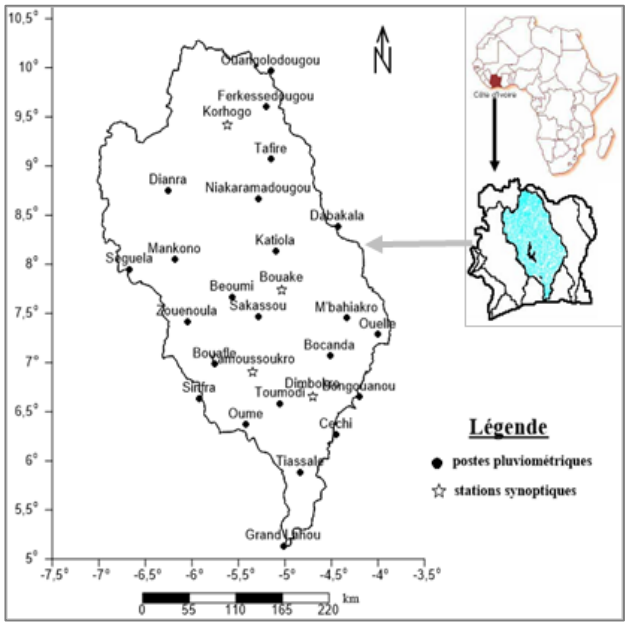


Figure 1. Localisation du bassin versant du Bandama

1. Données et méthodes

1.1. Données de l'étude

Les données climatiques (pluie et évapotranspiration potentielle) sont issues des relevés quotidiens de la SOciété de Développement et d'EXploitation Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) de Côte d'Ivoire pour les périodes 1981-2000 et 2013-2015. Les données manquantes de 2001 à 2012 sont comblées sur la base des *réanalyses* du *Global Précipitation Climatology Project* (*GPCP*) de la *National Aeronautics and Space Administration* (*NASA* : Huffman *et al.*, 1997). Ces données ont déjà fait l'objet d'étude à l'échelle du Bassin versant du Bandama (N'Da *et al*., 2016).

Les données agrotechniques (Réserve Hydrique du Sol : RHS, durée des cycles culturaux et les coefficients culturaux : Kc) sont utilisées pour évaluer le bilan hydrique des cultures. Trois niveaux de RHS sont retenus dans le bassin versant du Bandama : 100 mm au sud, 60 au centre et 30 au nord (Perraud, 1979 ; Noufé, 2011 ; N'Da, 2016). La variété de riz de cycle court (90 à 100 jours) choisie pour l'étude est le NERICA et celle de cycle moyen (105-115 jours) est l'IDSA10. Pour les différentes phases phénologiques de durées variables selon la variété comme décrites dans Amani *et al*. (2013), un Kc est appliqué (Forest et Reyniers, 1985). Le Kc est le rapport entre les besoins en eau de la culture et la perte d'eau de référence (ETP) du site et de la période considérée. Il est également fonction des conditions moyennes de vent et d'humidité relative de l'air au cours de la période de culture (Allen *et al.*, 1998).

1.2. Méthodes de traitement des données

Les sécheresses agricoles du bassin versant du Bandama sont appréciées par le bilan hydrique efficace développé par Franquin (1973). Il consiste à représenter, comme indiqué sur la figure 2, les courbes de pluie (P), d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de la moitié de l'évapotranspiration potentielle (ETP/2) dans un même repère. Les intersections de la courbe pluviométrie (P) avec celles d'ETP et ETP/2 sont projetées sur l'axe des abscisses dont l'unité de temps est la décade. Des points de projection (A2, B1, B2 et B3) sont matérialisés sur cet axe pour délimiter les périodes suivantes. L'intervalle A2-B1 est la période ***préhumide*** durant laquelle P est globalement supérieure à ETP/2 et inférieure à ETP. C'est le temps idéal pour les semis et la croissance végétative du riz (Kassam *et al*., 1991). La période ***humide*** est l'intervalle B1-B2 ou P > ETP. Au cours de cette période, la quantité de pluie tombée est suffisante pour satisfaire aux besoins en eau des phases de croissance plus exigeantes des plantes comme la floraison et la fructification. La période ***posthumide*** B2-B3 est le temps durant lequel P redevient inférieure à ETP et reste supérieure à ETP/2. Elle correspond à la phase de maturation des fruits. L'étude fréquentielle de ces évènements agro-climatiques permet d'obtenir les périodes de cultures sans irrigation (Amani *et al*., 2013).

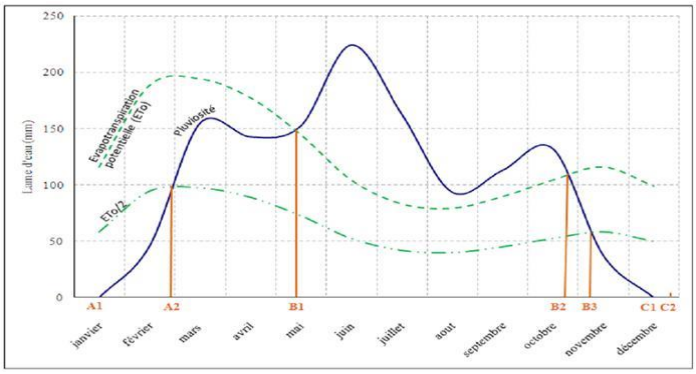


Figure 2. Schématisation du découpage de la saison humide. (Source : Franquin, 1973)

Les probabilités de réussite du riz pluvial sont déterminées à partir du postulat selon lequel la réussite de la culture est conditionnée par la satisfaction de ses besoins en eau (Kassam *et al*., 1991 ; N'Da, 2016). De ce fait, la probabilité de réussite des phases végétative, reproductive et de maturation des variétés étudiées est estimée par la méthode de bilan hydrique (Eldin, 1985). Il s'agit d'évaluer le nombre d'années pendant lesquelles l'apport d'eau est supérieur à la demande en eau sur le nombre total d'années étudiées. La demande hydrique étant égale à l'Evapotranspiration Maximale (ETM = ETP x Kc) et la consommation réelle étant égale à l'Evapotranspiration Réelle (ETR = P + RHS_{i-1} ; $_{i-1}$ pour la valeur de la décade précédente), l'indice de satisfaction IS est déterminé comme suit :

IS = ETR/ETM = (P + $RHSi_{-1}$)/(ETP x Kc)
Alors Si P + $RHSi_{-1} \geq$ ETM, ETR = ETM => IS = 1
Et Si P + $RHSi_{-1}$ < ETM, ETR = P + $RHSi_{-1}$ => IS= (P + $RHSi_{-1}$) /ETM

2. Résultats et discussions

2.1. Evolution des saisons culturales entre 1981 et 2015

La longueur de la première période propice au semis du riz est de cinq décades en générale à Dimbokro et de six décades à Bouaké (Fig.3). Mais, débutant à la deuxième décade de février, elle est plus précoce depuis 2010. La deuxième période préhumide est très courte.

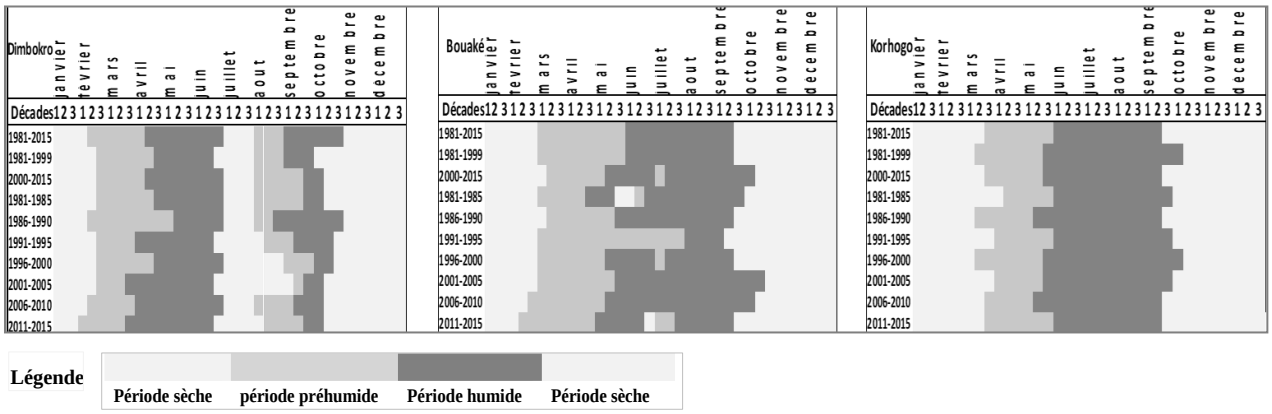


Figure 3. Evolution quinquennale des périodes culturales de 1981 à 2015. *(1 ; 2 et 3 de chaque mois représente des décades (10 jours). La décade 1 part du 1[er] au 10[ème] jours du mois ; la décade 2 du 11[ème] au 20[ème] jours du mois et la décade 3 du 21[ème] au 30[ème] ou 31[ème] jour du mois). (*Source : données SODEXAM et GPCP/NASA.)

Il y est peu probable de réussir le semis du riz de cycles moyen et long. Le début de cette phase végétative varie peu. Par contre, sa fin, très instable, est observée tantôt à la fin d'avril, tantôt à la fin de mai et quelques rares fois en juin. Deux périodes plus humides correspondant

à la phase de floraison du riz se distinguent clairement dans la zone sud du bassin versant comme c'est le cas à Dimbokro. La première (1ère) dure trois mois (avril-juin).

À l'opposé, la deuxième (2ème) ne tient que sur trois décades (fin septembre - mi-octobre) à Dimbokro. À Bouaké, la tendance est à la saison humide unique. De Bouaké à Korhogo, le démarrage de l'unique période reproductive intervient respectivement à la 2ème et troisième (3ème) décade de mai. Il est toutefois très incertain. La fin de cette phase humide est stable, autour de la 1ère ou la 2ème décade de septembre. Toutefois, Korhogo est la zone qui affiche les meilleurs profils agro-hydro-météorologiques pour la réussite du riz pluvial. La période de croissance y est relativement importante (à partir de 21 mars à fin septembre) pour couvrir les besoins en eau des stades phénologiques de la riziculture. Amani *et al*. (2013) ont abouti aux mêmes résultats. Par ailleurs, ils estiment que le rendement d'une culture n'est optimisé que si la période de croissance du régime bioclimatique est assez longue pour couvrir la durée du cycle de croissance de la culture donnée. Aussi, cette étude corrobore la migration du régime soudanien du nord de la Côte d'Ivoire vers le sud comme évoqué par Brou (2005). Il convient d'évaluer l'influence de ces mutations bioclimatiques sur la riziculture pluviale.

2.2. Satisfaction hydrique et réussite de la riziculture pluviale sur la normale 1981-2010

La figure 4 présente les déficits et excédents hydriques par rapport aux besoins de la culture de riz pluvial. Pour chaque décade, le déficit d'eau est exprimé par une valeur négative et l'excédent par une valeur positive. Pour toutes les stations étudiées et pour les deux cultivars de riz choisis, les phases végétatives ne manquent pas d'eau. Par contre, la période de reproduction qui est la plus critique reçoit moins d'eau qu'elle en a besoin. Au niveau de Bouaké et Dimbokro, cette phase présente 20% de déficit par rapport à ses exigences. Ce déficit est plus prononcé pour les riz de cycle moyen (105 jours).

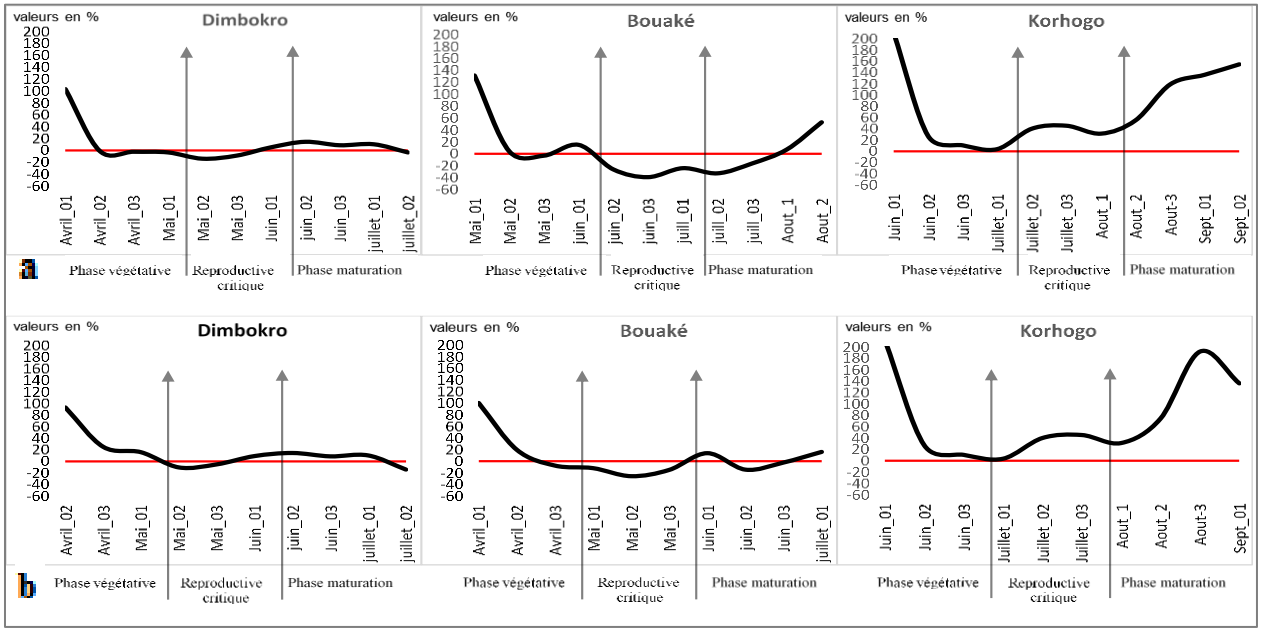


Figure 4. Déficit et excédent hydrique par rapport à la demande en eau du riz pluvial de 105 (a) et 90 (b) jours. *La barre rouge est le point d'équilibre entre demande et apport réel d'eau climatique aux plantes*. (Source : données SODEXAM et GPCP/NASA.)

La phase de maturation ne présente pas de déficit hydrique majeur. A Korhogo, pour toutes les étapes de croissance des variétés de riz en étude, il n'est observé aucune privation. L'insatisfaction hydrique de la phase reproductive qui garantit la réussite de la culture du riz se voit clairement sur la figure 5. L'étude prend pour référence la probabilité 7,5 années sur 10 (75% : droite rouge sur les graphes) qu'elle considère comme la fréquence de stabilité (N'Da,

2016). Quel que soit le cultivar étudié, le niveau de satisfaction hydrique des cycles de riz étudiés est généralement important à la phase végétative. Elles dépassent partout la fréquence de référence (Fig.5). Mais, il diminue à mesure qu'on va à la période reproductive. Les fréquences y deviennent faibles (inférieure à 50% pour le riz de 105 jours à Bouaké). À Dimbokro, elles remontent à 70% au cours de la floraison du cycle court. Korhogo confirme sa forte potentialité de réussite du riz pluvial des deux cycles. En effet, les besoins hydriques sont partout satisfaits à plus de 75%. Bouaké présente le cas le plus critique en saison unique.

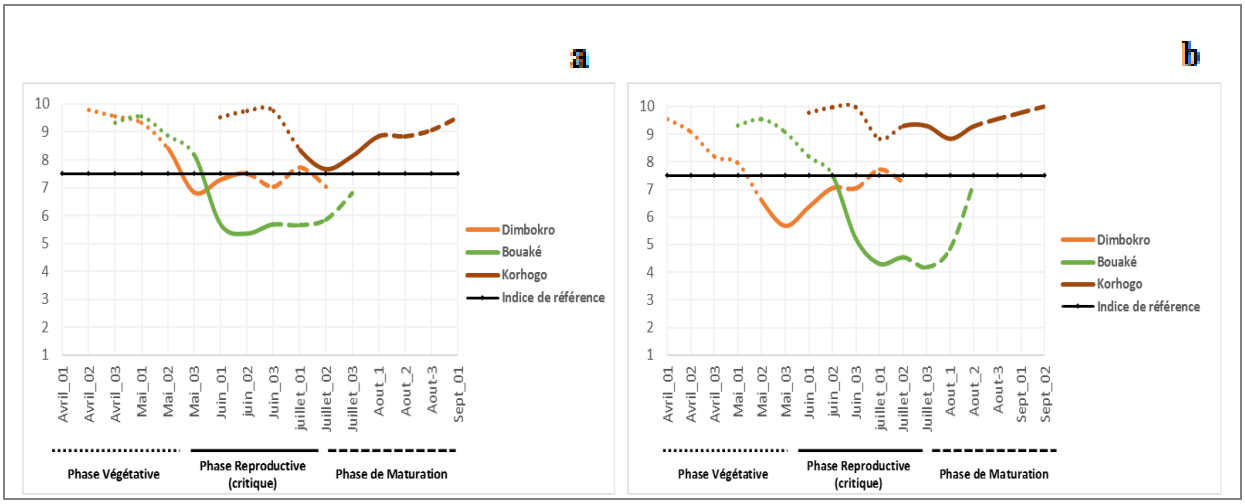


Figure 5. Fréquences (années sur 10) de satisfaction hydrique du riz pluvial de 90 jours (a) et 105 jours (b). (Source : données SODEXAM et GPCP/NASA)

De Dimbokro à Bouaké, les faibles probabilités de réussites du riz pluvial s'expliquent par la mauvaise distribution des hauteurs de pluie (Diomandé, 2013 ; N'Da, 2016). La première saison pluvieuse, plus importante que la seconde, reste insuffisante pour assurer les besoins de la culture du riz. Ainsi, à la date optimale de semis, les régimes unimodaux des régions du nord et de la zone de transition atténuée paraissent plus favorables à la riziculture pluviale (Tab.1) car il offre 100% de chance de réussir les deux cultivars étudiés (90 et 105 jours).

Tableau 1. Probabilité (Prb.) de réussite du riz pendant la première saison des pluies (*PEHM = Période d'Exigence Hydrique Maximale)* (Source : N'Da, 2016)

	Cycle cultural	Date de semis	Prb. de réussite du semis	Prb. de réussite de la PEHM	Prb. de réussite de la culture
Dimbokro	90 jours	11-20 avril	0,97	0,59	0,59 (59%)
	105 jours	01-10 avril	0,94	0,59	0,57 (57%)
Bouaké	90 jours	01-10 avril	0,67	0,58	0,56 (56%)
	105 jours	01-10 mai	1,00	0,52	0,52 (52%)
Korhogo	90 jours	01-10 juin	1,00	1,00	1,00 (100%)
	105 jours	01-10 juin	1,00	1,00	1,00 (100%)

Conclusion

Il ressort de l'étude que la forte variation des saisons de pluie affecte la planification bioclimatique de la riziculture en créant une inadéquation entre les apports d'eau aux phases reproductives des plantes et leurs besoins réels. En effet, la satisfaite hydrique n'étant que d'environ 50% à Dimbokro et Bouaké, la réussite du riz pluvial devient incertaine sans irrigation et sans appuis de services climatiques appropriés. Il n'y a que Korhogo, au nord du pays, qui enregistre 100% de réussite si le semis est effectué en juin (période optimale de semi). Les indices de réussite diminuent donc au fur et à mesure qu'on progresse vers le sud du bassin versant du Bandama.

Bibliographie

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage*, Rome, Italy, UN-FAO, 56p.

Amani K. K. E., Kouassi A., Kouassi F. W., Goula B. T. A., & Savane I., 2013. Détermination des périodes optimales de semis du riz pluvial au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 3, 3(8), 719-726.

Brou Y.T., 2005. *Climat, mutation socio-économique et paysages en Côte d'Ivoire*. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches, Université des sciences et techniques de Lille, France, 226p.

Diomandé M., 2013. *Impact du changement de pluviosité sur les systèmes de production agricoles en zone de contact forêt-savane de Côte d'Ivoire*. Thèse pour obtenir le titre de docteur, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire,181p.

Eldin M., 1985. Risques climatiques, élément des risques encouru pour la production agricole. *Dynamique des systèmes agraires à travers champs, agronomes et géographes*. Collection et séminaire, Paris – Orstom éditions.

Food and Agricultural Organisation (FAO), 2003. The state of food insecurity in the world, Rome,

Forest F. et Reyniers F. N., 1985. Propositions de classification en termes de bilan hydrique des situations agroclimatiques de riziculture pluviale. In Conférence Internationale sur le riz pluvial, Jakarta, Indonesia, 17p.

Franquin P., 1973. Analyse agroclimatologique en régions tropicales : méthodes des intersections et période fréquentielle de la végétation. *L'agronomie tropicale*, (28), 6-7.

GIEC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

Huffman G.J., Adler R.F., Arkin P.A., Chang A., Ferraro R., Gruber A., Janowiak J.E., McNab A., Rudolf B.R. et Schneider U., 1997. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bulletin of American Meteorological Society*, (78), 5-20.

Kassam, A. H., Velthuizen, H. T.V., Fischer, G. W., and Shah, M. M., 1991. Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning a case study of Kenya resources data base and land productivity. FAO, 173p.

Kouakou K. E., Kouassi A., Kouassi F.W., Goula B-T.A., and Savane I., 2013. Détermination des périodes optimales de semis du riz pluvial au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 3 (3), 719-726.

L'homme J.P., Monteny B.A, 1980. *Eléments de bioclimatologie*. Abidjan, ORSTOM, Adiopodoumé, 90p.

N'Da K.C., 2016. *Variabilité hydroclimatique et mutations agricoles dans un hydrosystème anthropisé : l'exemple du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire*. Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 272p.

N'Da K.C., Dibi Kangah P., Noufé D., Dje K.B., Koli Bi Z., 2016. Changement climatique : quelques aspects de la variabilité climatique dans le bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. *Revue des Sciences Sociales : RSS-PASRES*, vol. 10, (4), 84-103.

Noufé D., 2011. *Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire*, Thèse soutenue à l'Université de Paris 1, France, 375 p.

Perraud A., 1979. *Les Sols in Atlas de la Côte d'Ivoire*. ORSTOM / IGT, Paris, p. A5a-A5b.

Roudier P., Sultan B., Quirion P., Berg A., 2011b. The impact of future climate change on West African agriculture : what does the recent literature say ?. *Global Environmental Change*. Doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007.

Sié M., Dingkuhn M., Wopereis M. C. S. & Miézan K., 1997. Rice crop duration and leaf appearance rate in a variable thermal environment, TI Genetic diversity. *Field Crops Research*, in press.

Sultan, 2011. *L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales*. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 137p.

CONTRIBUTION DES PLANTATIONS BOIS DE FEU DE PAHOU ET OUEDO A L'EMISSION DU CARBONE AU SUD DU BENIN DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

ODJOUBERE J., KOOKE G.X., DJOSSOU J.-M., TENTE A.B.H.

Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale, Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin (odjoubj@yahoo.fr)

Résumé : *Au Bénin, les plantations de Acacia auriculiformis de Pahou et Ouèdo ont pour objectif de satisfaire les demandes en bois énergie des populations. Cette recherche vise alors à évaluer la part de carbone libéré chaque année par ces deux forêts. Pour ce faire, les recommandations faites par l'IPCC et celle de FAO ainsi que des équations allométriques ont permis d'estimer le taux de carbone. Il ressort qu'en moyenne sur cinq ans (2013-2018), 51 et 84 hectares de Acacia auriculiformis respectivement de 6 et 4 ans à Ouèdo et à Pahou sont coupés pour alimenter les foyers en énergie. Le stock de carbone libéré est de 38 t C/ha à Pahou et de 76 t C/ha à Ouèdo. Le bois que l'on brûle ne fait que rendre à l'atmosphère le carbone qui lui a été emprunté pour la photosynthèse de la matière ligneuse mais ce faisant il participe à l'augmentation des gaz à effet de serre. La durabilité naturelle des produits bois est suffisante pour que ceux-ci puissent pleinement jouer un rôle modérateur par séquestration du carbone.*

Mots clés : *Bénin ; carbone ; bois de feu ; forêts classées de Pahou et Ouèdo ; photosynthèse*

Summary: ***Contribution of Pahou and Ouèdo fuelwood plantations to carbon emissions in southern Benin in a context of climate change.*** *In Benin, the Acacia auriculiformis plantations in Pahou and Ouèdo aim to meet the population's demand for fuelwood. This research then aims to assess the share of carbon released each year from these two forests. To do this, the recommendations made by the IPCC and that of FAO as well as allometric equations made it possible to estimate the carbon content. It appears that on average over five years (2013-2018), 51 and 84 hectares of Acacia auriculiformis of 6 and 4 years respectively in Ouèdo and Pahou are cut to supply homes with energy. The carbon stock released is 38 t C / ha at Pahou and 76 t C / ha at Ouèdo. The wood that is burned only gives back to the atmosphere the carbon that was borrowed from it for the photosynthesis of woody material, but in doing so it contributes to the increase in greenhouse gases. The natural durability of wood products is sufficient for them to fully play a moderating role by carbon sequestration.*

Key words: *Benin; carbon; fuelwood; classified forests of Pahou and Ouèdo; photosynthesis*

Introduction

Dans le monde, 95 % des énergies renouvelables proviennent de la biomasse solide, sous forme de bois de feu et de charbon de bois. Le bio-gaz et les biocarburants liquides n'en représentent que 5 %. Environ 2,5 milliards d'hommes utilisent le bois de feu pour la cuisson, chiffre supposé croître jusqu'à 2,7 milliards en 2030. Cette consommation libère deux milliards de tonnes de $C0_2$/an dans l'atmosphère qui, si elle n'est pas produite durablement, est une source nette de gaz à effet de serre. Cette bio-énergie représente 10 % de la consommation globale d'énergie, proportion qui s'élève à 65 % en Afrique (De Galbert *et al*., 2013). Si les forêts sont gérées durablement, elles ont un réel potentiel de procurer des moyens de subsistance aux peuples qui en dépendent. Par exemple, au Mozambique, environ 15 % de la population est impliquée dans la production et le commerce du charbon de bois (Cuvilas *et al*., 2010). En Tanzanie, un emploi est créé chaque fois que 520 kg de charbon de bois sont produits (Peter et Sander, 2009).

Au Bénin, certaines plantations sont destinées à satisfaire les demandes en bois énergie des populations. Ces plantations constituent une composante importante dans le changement global parce qu'elles peuvent présenter, selon leur mode de gestion, un impact positif ou négatif du changement climatique induit par l'homme (Ngueguim *et al.*, 2015 ; Bello *et al*., 2017). *Acacia auriculiformis*, est introduite dans les plantations domaniales des forêts classées de Pahou et de Ouèdo pour alimenter les ménages en bois de feu (Kooké *et al*., 2019). Or, pour limiter

l'accroissement de l'effet de serre, la combustion de toute matière carbonée, fossile ou renouvelable, devrait être évitée autant que possible. L'objectif de cette recherche est de contribuer à une gestion durable des plantations de *Acacia auriculiformis* de Pahou et Ouèdo pour l'atténuation des changements climatiques.

1. Matériel et méthodes

1.1. Milieu d'étude

Géographiquement, la forêt de Ouèdo est située entre 2°16' et 2°17' longitude Est et entre 6°30' et 6°32' latitude Nord, couvrant une superficie de 580 ha. Celle de Pahou, est comprise entre 6°22' et 6°27' latitude Nord et 2°8' et 2°14' longitude Est avec une superficie de 765 ha (Fig.1).

Ces forêts appartiennent à une région soumise à un climat subéquatorial caractérisé par deux saisons pluvieuses alternant avec deux saisons sèches. La pluviométrie moyenne annuelle de la région calculée sur la période de 1985 à 2016 est de 1147 mm (Fig.2).

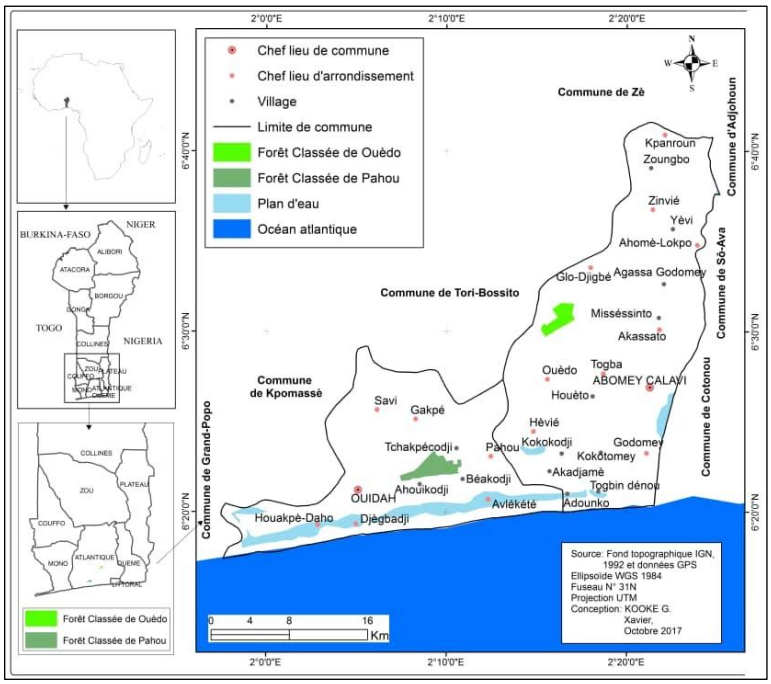


Figure 1. Situation géographique des forêts classées de Pahou et Ouèdo au sud du Bénin.

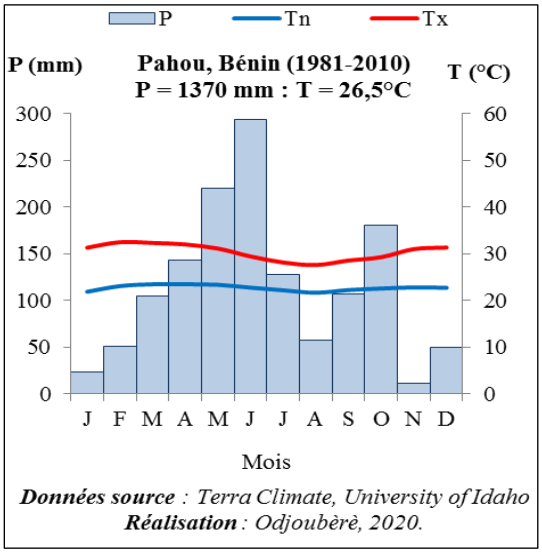


Figure 2. Diagramme ombrothermique de la région de Pahou, Bénin. (Source : Les données en point de grille sont générées par Climate ToolBox et proviennent de Terra Climate, Université de l'Idaho (USA)).

Deux types de sols sont rencontrés à Pahou : les terres de barre et les sables littoraux. Quant à la forêt classée de Ouèdo, elle repose entièrement sur des sols ferralitiques faiblement désaturés appauvris, sur sédiment meuble argilo-sableux du continental terminal.

1.2. Méthode

1.2.1. Mesure dendrométrique

- Diamètre à hauteur de poitrine (DBH)

Il est déterminé à partir de la circonférence mesurée à l'aide d'un mètre ruban, à 1,30 m au-dessus du sol. Ce DBH est calculé par la formule : DBH= $\frac{C}{\Pi}$

Avec C : circonférence de l'arbre à 1,30 m au-dessus du sol et ∏=3,14

- Hauteur de l'arbre

Pour déterminer la hauteur H de l'arbre, deux visées ont été réalisées. Une première au sommet de l'arbre (V1) et une seconde au pied de l'arbre (V2). Ces visées sont en pourcentage de la distance (L) séparant l'opérateur de l'arbre. La hauteur totale de l'arbre mesurée est obtenue par la relation H selon Rondeux (1999) suivante : H= $\frac{(V2-V1)*L}{100}$

1.2.2. Estimation du carbone libéré dans l'atmosphère

Pour estimer la biomasse des grands arbres, il a été recommandé d'utiliser l'équation de la FAO (1997) pour les zones arides (<1500 mm par an) [équation 1]. Pour estimer la biomasse aérienne et racinaire présente dans chaque arbre les équations suivantes ont été utilisées [équation 2].

Equation 1 : BA = $exp^{(-1,996+2,32lnD)}$(D en cm)

Equation 2 : BR = $exp^{(-1,0587+0,8836*\ln(BA))}$

La détermination de la quantité de carbone présente dans les différentes composantes de l'arbre et dans chaque plantation a été faite en s'appuyant sur les équations allométriques (*i.e*. changement dans les proportions au cours de sa croissance) de la FAO (1997) et adaptées (Tab.1) selon les modèles du stock de carbone pour les différentes composantes des arbres par Boulmane *et al*. (2013).

Tableau 1. Modèles de stock de carbone pour les différentes composantes des arbres. (Source *: Boulmane et al., 2013*)

Composante de l'arbre	***Estimation du stock de carbone exprimée en kg/arbre***
Tronc	*SCTr = 191 x (D^2H)*
Branche	*SCBr = 46 x (D^2H)*
Feuille	*SCF = 5,4 x (D^2H)*

Avec D : diamètre à 1,30 m, H : hauteur de l'arbre en m. D et H en m. SCT r : stock de carbone dans le tronc, SCBr : stock de carbone dans les branches, SCF : stock de carbone dans les feuilles.

2. Résultats

2.1. Stock de carbone organique dans les différents compartiments de Acacia auriculiformis

Les différents compartiments de *Acacia auriculiformis* étudiés tiennent compte de la biomasse aérienne (tronc, branches et feuilles) et biomasse racinaire (racines). Le stock de

carbone varie significativement (P<0,05) selon les différents compartiments des *Acacia auriculiformis.* En fonction de ces compartiments, le stock de carbone est plus élevé dans : 1) le tronc, 72,09 % de la biomasse aérienne dans les plantations de 4 ans à Pahou et 84,83 % dans les plantations de 6 ans à Ouèdo, 2) les branches : respectivement 17,37 % et 20,43 % de la biomasse aérienne à Pahou et à Ouèdo et 3) les feuilles : respectivement 2,04 % et 2,57 % de la biomasse aérienne à Pahou et à Ouèdo. Les résultats des stocks de carbone organique dans les différents compartiments des *Acacia auriculiformis* sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2. Stock de carbone contenu dans la biomasse aérienne et racinaire (valeurs moyennes ± erreur standard). (Source : G. X. KOOKE *et al*., 2019)

Plantations de Acacia auriculiformis	Age	Stock de carbone dans				
		Tronc (t C/ha)	Branches (t C/ha)	Feuilles (t C/ha)	Biomasse aérienne (t C/ha)	Biomasse racinaire (t C/ha)
(Pahou)	4	20,46 ± 5,24 b	4,93 ± 1,26 b	0,58 ± 0,15 b	28,38 ± 6,52 ab	10,00 ± 02,03 a
(Ouèdo)	6	42,51 ± 06,75 a	10,24 ± 1,62 a	1,29 ± 0,19 a	50,11 ± 7,14 a	26,09 ± 13,55 a
Probabilité		0,04	0,04	0,04	0,1	0,51

Légende : t C/ha = tonne de Carbone par hectare.
Les moyennes suivies des mêmes lettres alphabétiques de mêmes caractères et pour les mêmes caractéristiques ne sont pas significativement différentes (P>0,05) d'après le test de la plus petite différence significative.

De l'analyse du tableau 2, il ressort qu'il existe une différence significative (*P<0,05*) entre les âges des plantations et les types de sol pour ce qui concerne les stocks de carbone contenu dans le tronc, les branches et les feuilles. Globalement, entre la biomasse aérienne et racinaire, il n'est noté aucune différence significative (*P>0,05*) en ce qui concerne les stocks de carbone des différents âges. Les valeurs les plus élevées du stock de carbone sont observées de façon décroissante en partant des plantations d'âge avancé vers les plantations d'âge plus bas. Ainsi, l'âge influence la capacité de séquestration du carbone. En considérant uniquement l'âge, que ce soit au niveau des troncs, des branches, des feuilles et racinaires, les valeurs les plus élevées du stock de carbone ont été observées dans les plantations les plus âgées. D'une manière générale, les plantations de *Acacia auriculiformis* âgées de 6 ans à Ouèdo ont plus stocké de carbone dans les différents compartiments des arbres, alors que celles de la même espèce (*Acacia auriculiformis*) âgée de 4 ans à Pahou, ont le moins stocké selon le test de la plus petite différence significative. Ces compartiments sont reconnus importants dans la séquestration du carbone dans les plantations de *Acacia auriculiformis* de Pahou et Ouèdo au Bénin (Fig.3).

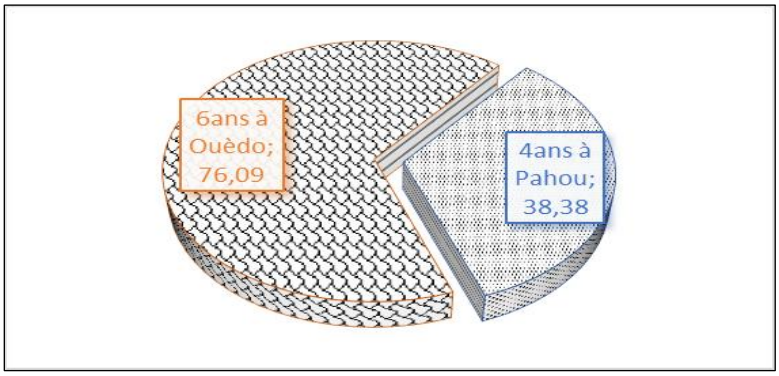


Figure 3. Quantité (en %) de carbone séquestré par hectare dans les plantations d'âge différent.

2.2. Acacia auriculiformis, bois de feu et changements climatiques

Les usages énergétiques de *Acacia auriculiformis* renvoient directement dans l'atmosphère le carbone puisé dans celle-ci par la croissance ligneuse. Les rôles de source d'énergie combustible et de puits de carbone qu'on souhaite voir jouer à ces plantations sont donc antinomiques. Aussi en déduit-on un peu hâtivement que la substitution du bois aux

combustibles fossiles éviterait l'émission dans l'atmosphère de dioxyde de carbone (CO_2), ce qui, devant la menace d'un changement climatique d'origine anthropique, confèrerait à cette substitution un caractère vertueux. Ce renforcement passe logiquement par l'arrêt de la déforestation, l'augmentation des volumes ligneux dans les forêts existantes et dans les produits bois durables, ainsi que le rétablissement des forêts sur les espaces qui ne sont pas indispensables aux activités humaines. Cependant, ce sont les plantations qui sont plus sollicitées pour la fabrication du charbon du bois, source de pollution par le dégagement de la fumée (Fig.4).

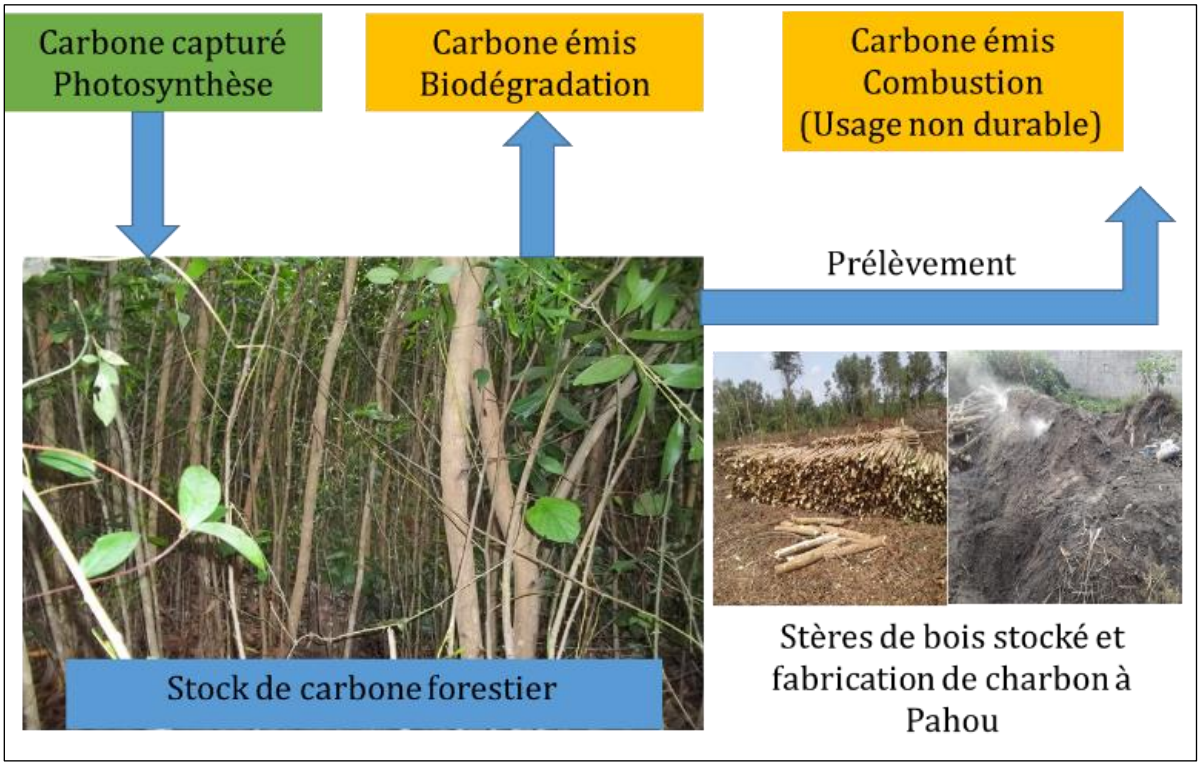


Figure 4. Stock de carbone et utilisation de bois dans les plantations de Pahou et Ouèdo. (Prise de vue : ODJOUBERE J., novembre 2018)

La figure 4 montre le flux et l'exploitation des plantations de *Acacia auriculiformis* de Pahou et Ouèdo. Le maintien de ces plantations comme réservoir de carbone, autant dans les sols que la biomasse, serait un élément important de l'atténuation du changement climatique. Cette condition de permanence ne peut être remplie que si les plantations sont gérées à volume sur pied. On occulte ainsi, contre toute évidence, la possibilité, au moins transitoire, de faire jouer à la forêt le rôle de puits de carbone et de conserver le bois qui en est issu. L'intérêt environnemental de la substitution du bois aux combustibles fossiles (émission de CO2 « évitée ») est ainsi remis en question.

Discussion

Au niveau mondial, environ 2,9 milliards de tonnes de carbone sont émises tous les ans comme une conséquence de la déforestation et de la dégradation tropicale (Pan *et al.* 2011). Cette recherche a révélé en général que le stock de carbone diminue du plus grand au plus petit âge dans les plantations de *Acacia auriculiformis*. Thompson *et al*. (2003), avait fait le même constat en affirmant que plus l'arbre grandit, plus il séquestre du carbone. Selon les différentes plantations, le stock de carbone dans la biomasse aérienne varie entre 14,48 ± 5,40 tC/ha et 50,11 ± 7,14 tC/ha. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Albrecht et Kandji (2003) et Bello *et al.* (2017) qui l'estiment entre 7 et 25 tC/ha dans un système agroforestier.

L'utilisation du bois comme matériau permet un stockage direct du carbone puisé dans l'atmosphère. L'augmentation du stock des produits en bois participe ainsi positivement et doublement au bilan carbone global. La forêt s'offre ainsi comme un moyen crédible de géo-ingénierie pour atténuer l'effet de serre. Le concept de neutralité carbone, sur lequel s'appuient les promoteurs des utilisations énergétiques du bois (et de la biomasse en général), est trompeur.

Utilisé dans sa forme brute, le bois de feu est non seulement peu efficace, mais sa combustion pollue l'air intérieur et présente aussi des risques majeurs de santé pour les habitants des maisons (Cuvilas *et al*., 2010). Améliorer la production durable et l'utilisation de l'énergie primaire requiert plus d'attention, spécialement dans les pays les plus pauvres.

Conclusion

Les plantations de *Acacia auriculiformis* de Pahou et Ouèdo participent à l'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone atmosphérique, mais l'utilisation non durable de ces plantations fait libérer dans l'atmosphère chaque année en moyenne 3876 et 3154 tonne de carbone respectivement à Ouèdo et Pahou. Pour limiter l'accroissement de l'effet de serre, la combustion de toute matière carbonée, fossile ou renouvelable, devrait être évitée autant que possible. Dans la mesure où le bois peut être longtemps conservé en forêt sur pied ou hors forêt comme matériau, sa formation par photosynthèse contribue directement à la capture du carbone atmosphérique.

Bibliographie

Albrecht A., Kandji S. T., 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 99, 15-27. Doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(03) 00138-5

Bello O.D., Saïdou A., Ahoton E. L., Ezin A., V., Avaligbé J. F. Y., Akponikpè P. B. I., & Aho N., 2017. Assessment of organic carbon stock in cashew plantations (Anacardium occidentale L.) in Benin (West Africa). *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 3 (4): 3471- 3495.

Boulmane M., Regina I.S., Khia A., Oubrahim H., 2013. Estimation du stock de carbone dans les iliçaies du Haut Atlas Marocain. *Ann. Rech. For*. Maroc, 20 (2): 275-286.

Cuvilas *et al*., 2010. Energy Situation in Mozambique: A Review.*Renewable and Sustainable Energy Review*s 14, 2139–2146.

De Galbert M., Schmitt F., Dieterle G., Larson G., 2013. *Des forêts tropicales atténuant le changement climatique. Leur rôle dans la substitution aux énergies fossiles et les futures économies vertes*. 61p.

FAO. 1997. State of the world's forest. World end publication, Oxford, UK, pp.1-5

Kooké G. X., Ali R. K. F. M., Djossou J-M. et Toko Imorou I., 2019. Estimation du stock de carbone organique dans les plantations de *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. des forêts classées de Pahou et de Ouèdo au Sud du Bénin. 277-293. 7057-*IJBCS*.

Ngueguim J. R., Zapfack L., Noumi V. N., Onana D., Betti, J. L., Riera B., 2015. Expériences sylvicoles au Cameroun : Croissance, mortalité et adaptabilité des espèces de bois d'œuvre dans la station forestière de Mangombé (1964-2010). *Int. J. Biol. Chem. Sci*., 9(6): 2789-2807. Doi : http://dxdoi.org/10.4314/ijbcs.v9i6.22

Yude P., *et al*., 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*. 19 August 2011: Vol. 333 no. 6045, 988-993.

Christian P. & Sander K.. 2009. *Environmental crisis or Sustainable Development Opportunity? Transforming the charcoal sector in Tanzania*. A Policy Note. The World Bank. Washington, DC.

Rondeux J. 1999. *Les mesures des arbres et des peuplements forestiers*. Gembloux, Belgique, Les presses agronomiques de Gemblou, 522p.

Thompson I. D., Baker J. A. & Ter-Mikaelian M., 2003. A review of the long-term effects of post-harvest silviculture on vertebrate wildlife, and predictive models, with an emphasis on boreal forests in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*. vol. 177, no 1-3, 441 à 469. URL: https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=21497.

CLIMATIC RISK TO ARBOVIRUSES IN RIO DE JANEIRO CITY

OSCAR JÚNIOR A.[1], MENDONÇA F.[2]

1 Institute of Geography, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brazil (antonio.junior@uerj.br)
2 Department of Geography, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, Brazil (chico@ufpr.br)

Summary: *The present study reveals a correlation between the surface temperature in the city of Rio de Janeiro and the distribution of Dengue vector larvae. In order to demonstrate this spatial correlation, mean annual surface temperature data obtained from the MODIS sensor and the spatial distribution of Aedes aegypti larvae were used to derive spatial correlation. The result explains the susceptibility to arboviruses. Spatially, , high potential for heating was shown in the central and northern zones, as well as in the area of west expansion of the city, the same areas with higher larvae densities and which are also poorer and densely-populated areas..*

Key words: *aedes aegypti; urban climate; epidemiology*

Résumé : *Risque climatique pour les arbovirus dans la ville de Rio de Janeiro.* *La présente étude révèle une corrélation entre la température de surface de la ville de Rio de Janeiro et la répartition des larves de vecteurs de la dengue. Afin de mettre en évidence cette corrélation spatiale, les données moyennes annuelles de température de surface obtenues à partir du capteur MODIS et la distribution spatiale des larves d'Aedes aegypti ont été utilisées. Le années épidémiques de 2002 ont été sélectionnées pour tester la corrélation spatiale et les résultats étaient cohérents. Ces résultats expliquent la sensibilité aux arbovirus. Spatialement, un fort potentiel de réchauffement a été mis en évidence dans les zones centrale et nord, ainsi que dans la zone d'expansion ouest de la ville. Les mêmes zones avec des densités de larves plus élevées et qui sont également plus pauvres et densément peuplées, révèlent l'importance des déterminants sociaux et de la production sociale de l'espace urbain dans le processus de santé-maladie.*

Mots clés : *aedes aegypti; climat urbain; épidémiologie*

Introduction

Urbanization re-signifies spatial relations, promoting a diachronic interaction between the city and its site, as well as reproducing in its space the unequal relations of the capitalist model (Lefebvre, 1974), directly impacting the urbanite's quality of life and health (Barata, 2009). In this sense, the urban climate emerges as one of the byproducts of this process, highlighting environmental changes that impact on the urban populace (Ribeiro *et al.*, 2016; Monteiro and Mendonça, 2003).

Among the impacts most recently associated with the urban model of socio-spatial production and reproduction are arboviruses, such as dengue fever (Barreto and Teixeira, 2008), which is a disease considered currently neglected (WHO, 2019) and still without clinical control. Changes in the local climate increase the capacity of the lower atmosphere to maintain the vector's (Aedes aegypti) ideal characteristics and, consequently, the spread of the disease. In this perspective, the urban climate attracts special attention in recent studies involving possible interactions with the urban climate, especially in regards to urban heat islands (UHIs), and public health (Ribeiro *et al.*, 2016).

These are new perspectives for urban planning, especially where public health is concerned, but according to Maricato *et al*. (2000), Brazilian urban planning is attached to "misplaced ideas", that is, lacking attention to the empirical, especially when it comes to environmental issues (MENDONÇA, 2004). Thus, contributing to empirical grounding for urban planning that includes dengue coping guidelines for public administrators, this paper aims to test the spatial correlation between land surface temperature and *Aedes aegypti* density for the epidemic year 2008.The goal is to offer an easy and replicable methodology for the public administration.

1. Materials and Methods

1.1. Study area

The climate of Rio de Janeiro (Fig.1) is tropical (hot and humid), with average annual temperature of 23.2ºC; in summer temperatures can reach 40 ° C and in winter occasionally reaching 30°C. The average annual rainfall index is over 1,100 mm, with the months from October to March representing wettest period, while the dry season occurs from May to August (Lucena, 2005).

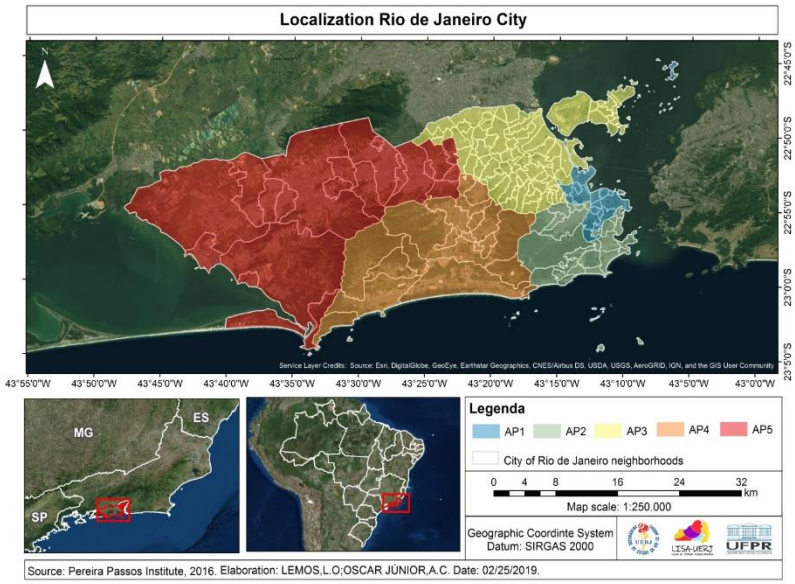


Figure 1. Rio de Janeiro - Geographical location. Note: AP1 - Planning area 1; AP2 – Planning area 2; AP3 – Planning area 3; AP4 – Planning area 4; and, AP5 – Planning area 5

1.2. Urban climate susceptibility

According to Chao *et al.* (2011), urban climate map studies were started by German researchers in the 1970s and the method is currently used in 15 countries to implement guidelines and mitigation measures for local planning practices including epidemiology and public health. Considering the results obtained in the initial stage of this study, and the development of tools for use in climatic urbanism, the second methodological stage consists of the mapping of the Urban Climate of the city of Rio de Janeiro.

In addition to its use in urban planning and public health activities, the urban climate map is intended for the diagnosis of the thermodynamic field of the city of Rio de Janeiro, for which the methodological proposal of Katzschner (2005) was used. The creation of the UCmap consisted of the calculation of geospatial information of the site and the urban design, through the definition of weights and classification in Geographic Information System environment.

Nine layers were selected for the construction of the respective thematic maps: building volume (layer 1), land uses relative to anthropogenic gains (layer 2), topographic height (layer 3), bioclimatic effects (urban green areas) (layer 4), land coverage by building (layer 5), natural landscapes (layer 6), slope (layer 7), orientation of the slopes (layer 8) and ventilation (layer 9). The information was extracted from a LANDSAT-8 image from the 1 Level-1 collection (purchase date of September 14, 2017 and processed on September 28, 2017).

The layers were systematized into two categories: 1) thermal load and 2) dynamic potential. The layers considered as having negative effects were those that contribute to the heating of the

city (highly favorable to the development of *Aedes aegypti*), and classified with weights of positive values. The layers considered as having positive effects, pointing to cooling, were classified with negative values (limiting the development of *Aedes aegypti*).

After drawing up each thematic map and making its classifications by weight, the matrix equation (fuzzy logic) sketched a first approximation of the potential for the formation of an urban heat island (heat map) and cool islands (dynamic potential map). These last two maps were again submitted to fuzzy logic, which provided values that could be validated by comfort indexes and field studies developed by Brandão (1996), resulting in the development of the urban climate map.

1.3. Spatial correlation: surface temperature and Dengue larvae density

In order to identify any spatial relationship between the air temperature and the development of the dengue vector, a correlation was run between the average annual surface temperature data obtained from the International Research Institute for Climate and Society website (IRI - Columbia University) and data on the density of Aedes aegypti larvae in the city of Rio de Janeiro, provided by the municipal Civil Defense Agency.

Land Surface Temperature (LST) data were extracted from orbital images from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a sensor on board the Terra satellite, with 1 km of spatial resolution. MODIS LST is derived from two thermal bands in the infrared channel, that is, bands 31 (10.78-11.28μm) and 32 (11.77-12.27 μm), using the window division algorithm (Wan *et al.,* 2002), which corrects the atmospheric effects based on the global thermal emissivity in the thermal infrared (Snyder *et al.,* 1998). According to Vancutsem *et al.* (2010), the MODIS sensor data are highly accurate, especially relative to the minimum temperatures, and can be used for a variety of studies, allowing analyses at least on a weekly basis, which can be important for research involving epidemics such as dengue.

In order to test the correlation between air temperature and dengue, we chose data from larvae collected by civil defense agents during technical visits in homes and commercial establishments. The decision to opt for these data, rather than cases of the disease, stems from intractability – inherent to the Brazilian public database, as well as the nature of dengue transmission itself – of discerning the site of disease contraction. Thus, it was assumed that areas with higher density of larvae in the vector pose a greater risk to the population (either to the resident population or to the site users).

To test the correlation, the methodological option was for Spearman's correlation. According to Silvestre (2016), the Spearman test is a non-parametric test, that is, suitable for the data used in this step since they do not follow a normal distribution. The Spearman coefficient (ρ), used to measure the intensity of the relationship between ordinary variables, assuming, when using the observed value, only one order of execution, can be calculated using the equation 01:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n^3 - n}, \quad \text{(Equation 01)}$$

where: n is the number of pairs (xi, yi) and d_i (positions of x_i among the values of x) - (positions of y_i among the values of y).

Considering the graver epidemics that occurred in the city, for the correlations between dengue fever and air temperature the year of 2008 was chosen. The data were granulated through geocoding techniques, allowing the calculation of spatial density using the Kernel technique. As regards LST data, such as vector larvae data, the three most epidemic years were used.

2. Results

As a first approximation of the urban climate of Rio de Janeiro, the map of the susceptibility to the formation of heat islands was elaborated (Fig.2). It is an instrument capable of showing urban climatic susceptibility to dengue, which in turn can help inform public policy and urban health planning.

The urban climate map of the city of Rio de Janeiro highlighted areas with both heating and cooling potential in eight classes: 1 - Air Cooling ; 2 - Renovation and circulation of air ; 3 - Low climate activity ; 4 - Relevant climate activity ; 5 - Low thermal load ; 6 – Relevant thermal load ; 7 - High thermal load ; and 8 – Heat island (Tab.1).

For Rio de Janeiro, the urban climatic map presented a high heating potential, represented by classes 6 (relevant thermal load), 7 (high thermal load) and 8 (heat islands), in the zones already mentioned: Center, North and West -- (not coincidentally) the zones with the most vulnerable characteristics. This indicates that these areas are revealed as being highly susceptible to the development of heat islands, therefore, favoring the proliferation of *Aedes aegypti* and, consequently, a higher incidence of the disease.

The results confirm the association between hot areas and areas favorable to the development of the dengue vector larva, and the urban climatic map of the city of Rio de Janeiro can be used as an important tool for the planning of disease control actions in the city. In addition, this mapping may contribute to the control of other climate-dependent vector-borne diseases, which fit into diseases neglected by the WHO (2019) - airborne diseases.

In order to test the correlation between Dengue fever and urban climate, remote sensing data present qualitative limitations for the computation of a heat island (Fig.3), but nonetheless offer relevant information regarding the development structure of the phenomenon (Monteiro and Mendonça, 2003; Lemos and Oscar Júnior, 2018). In this light, the surface temperature (Fig.3) rendered an interesting result regarding the spatial distribution logic of the heat island of the city of Rio de Janeiro, whose hottest areas were mainly located in the Central and North Zone, and as far as the West Zone. This spatial distribution of temperature revealed an important correlation pertaining to both the density of *Aedes aegypti* larvae (Fig.4).

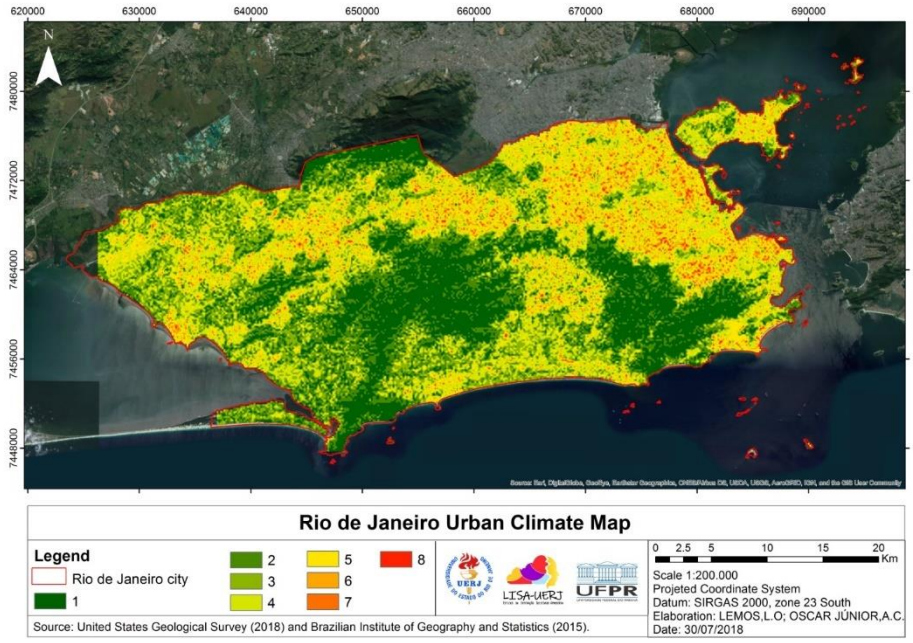


Figure 2. Rio de Janeiro: Urban climatic map of the city of Rio de Janeiro

Table 1. Rio de Janeiro - Classes of the urban climate map (Source: Katzschner (2008))

Class	Name	Impact on thermal comfort	Description	Evaluation
1	Air Cooling	Moderate	Areas vegetated or close to bodies of water	Very important for climate mitigation- High protection
2	Renewal and circulation of air	Light	Woods, woodland and green fields	Important in the circulation of the winds - Preserve
3	Low climate activity	Neutral	Low density areas, many open spaces and presence of vegetation	Does not affect the increase of the temperature of the air - Permitted changes in the densification
4	Relevant climate activity	Light	Areas densified by small residential buildings, presence of open spaces and low roughness	Relevant influence on climate - Changes in wind dynamics
5	Low thermal load	Moderate	Houses and residential blocks of 4 floors, few green spaces and low roughness	No high heat loads - Provide vegetation
6	Relevant thermal load	Moderately strong	Areas strongly densified by low-rise residential buildings - impossible considerable roughness	Thermal comfort already impaired - Provide vegetation and reduce soil waterproofing
7	High thermal load	Strong	Dense areas with buildings, scarcity of vegetation and open space - high roughness	Negative effects - mitigate by actions that favor ventilation and vegetation
8	Heat island	Very strong	Areas with high density, low soil permeability and low vegetation - higher roughness	Critical effects - sanitation action under the climate aspects

Conclusions et Discussion

The urban climate arouses special attention when analyzing the thermodynamic field and the effects of heat islands on the health of the population. Air temperature, intensified by urbanization, directly influences the development of certain diseases such as Dengue fever.

This brief report shows a diagnosis of the thermal field of the city of Rio de Janeiro and establishes a correlation between those thermal characteristics and the proliferation of the dengue vector, the Aedes aegypti mosquito. Based on the results obtained in the study, we were able to show that an urban climatic should be an important parameter for monitoring and controlling the urban environment, helping to identify areas that are ecologically favorable to the vector.

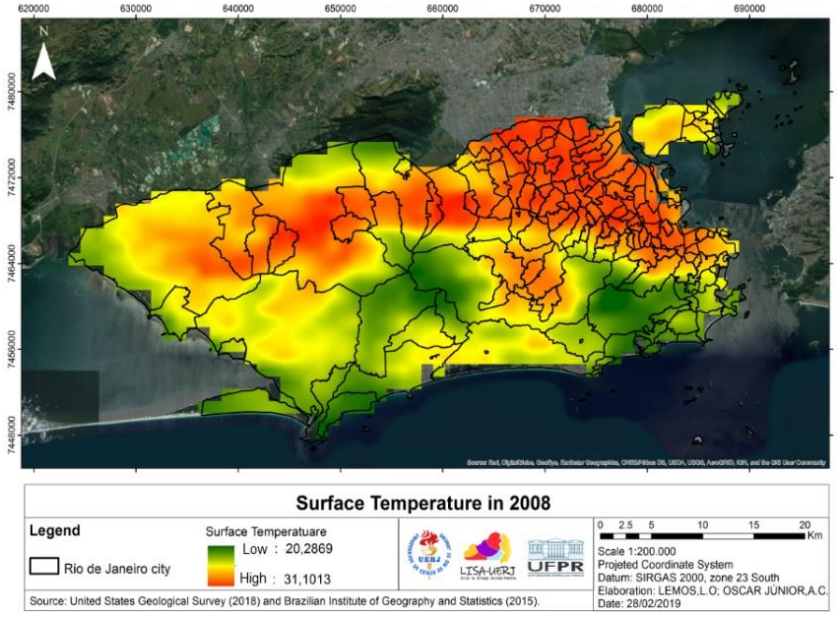


Figure 3. Rio de Janeiro - Average annual surface temperature (2008)

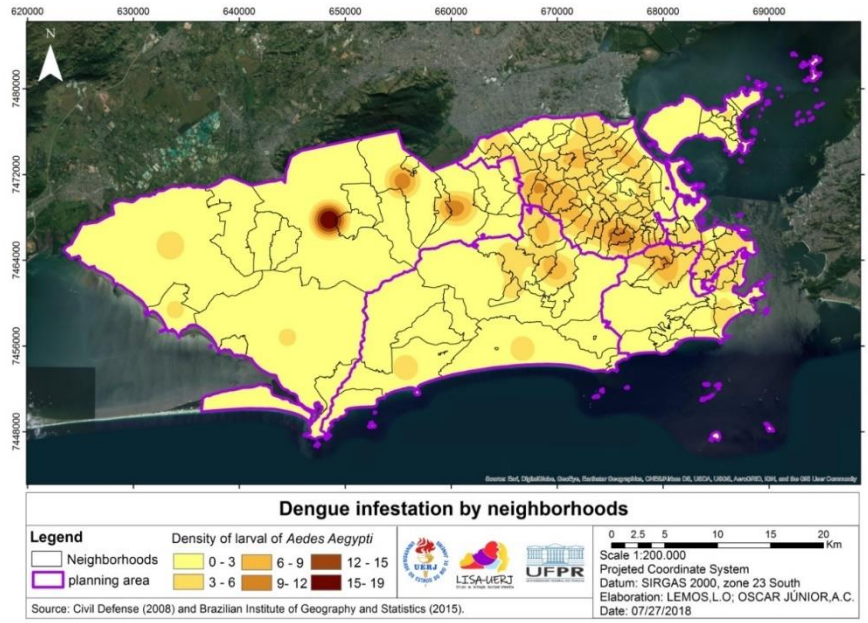


Figure 4. Rio de Janeiro - larvae density of *Aedes aegypti* (2008)

Acknowledgements

The authors acknowledge the funding and support provided by: Ministry of Science, Technology, Innovation and Communications, Ministry of health and CNPq, as well as the entire team of the Project “Urban climate and dengue in Brazilian cities: risks and scenarios in the face of global climate change”.

Literature

Barata R., 2009. *Como e porque as desigualdades sociais fazem mal à saúde?*. Brazil, Editora Fiocruz, 120p.

Barreto M., Teixeira M., 2008. Dengue no Brasil: situação epidemiológica e contribuição para uma agenda de pesquisa. *Estudos avançados*, (64).

Brandão A., 1996. *O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro*. Brazil, FFLCH/USP, 363p.

Earthdata. URL : https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/ (Accessed on 17 Feb. 2018).

Katzschner L., Mulder J., 2008. Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. *Journal of Environmental Management*, (87).

Maricato E., 2000. Urbanismo na periferia do mundo globalizado: metrópoles brasileiras. *Pespec. São Paulo*, (14).

Monteiro C., Mendonça, F., 2003. *Clima urbano. Brazil: Contexto*, 192p.

MS. Brazilian Ministry of Health. Programa Nacional de Controle da Dengue. URL : http: / / portal.cheers.gov.br / portal/health (Accessed on 10 June 2019).

WHO. World Health Organization. 2019. Negleted tropical diseases. URL: https://www.who.int/neglected_diseases/en/ (Accessed on 21 March 2019).

Ribeiro H., Pasquero C., Coelho M., 2016. Clima urbano e saúde: uma revisão sistematizada da literatura recente. *Estudos avançados*, (86).

Santos M., 1993. A urbanização brasileira. Brazil, HUCITEC, 176p.

SMS. Secretaria Municipal de Saúde. Casos de dengue por bairros e períodos. URL: http://www.rio.rj.gov.br/web/sms/exibeconteudo?id=2815389 (Accessed on 1 April 2019).

VDI - Verein Deutscher Ingenieure, 1997. Environmental Meteorology, Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions. Germany: Verein Deutscher Ingenieure, 77p.

"TIERCE FORET": GREENING A PARKING LOT

PARISON S.[1], CHAUMONT M.[1], KOUNKOU-ARNAUD R.[3], LONG F.[3], BERNIK A.[4], DA SILVA M.[4], HENDEL M.[1,5]

1 Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, Paris, France (martin.hendel@univ-paris-diderot.fr)
2 Paris City Hall, Paris, France
3 Météo-France, Direction des Services Météorologiques, Saint-Mandé, France
4 Fieldwork Architecture, Paris, France
5 Université Gustave Eiffel, ESIEE Paris, département SEN, Noisy-le-Grand, France

Summary: *A parking lot in the city of Aubervilliers (Paris metropolitan area) is under conversion from an asphalt-concrete paved area to an open green space with permeable pavement as an urban heat island countermeasure. In this paper, we present preliminary results of the impact of the site's partial conversion on pedestrian heat stress, with fixed and mobile measurement campaigns. Significant improvements of pedestrian heat stress are reported, following the creation of shade from trees resulting in reductions in air temperature and mean radiant temperature.*

Key words: *urban heat island countermeasure; permeable concrete; urban greening*

Résumé : ***"Tierce Foret" : végétalisation d'un parking.*** *Un espace extérieur privatif situé à Aubervilliers (93) est en cours de transformation d'un parking recouvert d'enrobé bitumineux vers un revêtement en béton perméable avec plantations dense d'arbres. Le présent article s'intéressera à la présentation de résultats préliminaires portant sur l'évaluation de l'impact rafraîchissant, notamment sur le stress thermique d'un piéton, grâce à des mesures fixes et mobiles. Des effets bénéfiques pour le stress thermique sont observés suite notamment à la création d'ombrage par les nouveaux arbres se traduisant par une réduction de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement.*

Mots clé : *rafraîchissement urbain ; béton perméable ; végétalisation*

Introduction

Urban greening is among the best-known countermeasures to the urban heat island (UHI) phenomenon (Akbari, Pomerantz, and Taha 2001). Parks in particular have been the focus of many studies, but many studies only conduct measurements after park construction (Bowler *et al*. 2010). However, identifying sites sufficiently ahead of time to prepare a measurement campaign before and after park construction can be difficult.

In the Paris Metropolitan Area, a site in the municipality of Aubervilliers is under study for conversion into an urban green area. The zone under study is currently used as a parking lot for the occupants of a home for young workers. It currently offers no urban amenities for pedestrians and inhabitants and its dark-colored asphalt concrete strongly absorbs solar radiation. The conversion will create a green open space with new functionality for pedestrians and inhabitants, including several trees and permeable concrete paving.

This site and its construction work schedule offer an opportunity to study the site before and after greening. Microclimatic measurements are under way to determine the site's microclimatic characteristics before and after site conversion.

This paper presents results following the partial conversion of the site, i.e. after trees are planted, most of the asphalt concrete is removed and a pervious concrete pavement is laid underneath the case measurement station.

1. Materials and Methods

1.1. Site Description

The site chosen for the study is a parking lot of about 1,200 m² for the occupants of a home for young workers in the municipality of Aubervilliers, located in the Parisian northern periphery. The site is located in a heterogeneous urban area. The site's vicinity can be classified as LCZ 4 (open high rise), but adjacent areas vary from LCZ 2, B or D (resp. dense mid-rise, scattered trees and low plants). It is currently surrounded by tall buildings and offers no amenities for pedestrians, such as benches, shade or footpaths. The ground is made of a worn out dark-coloured impervious asphalt with an albedo of 0.13. Furthermore, the site offers little vegetation apart from peripheral flowerbeds and sparsely-planted trees. A photograph of the parking lot in its initial state (Fig.1a) is provided in Figure 1.

Figure 1. Photograph of the site. a) before conversion; b) after partial conversion in 2019; c) site map and weather station positions.

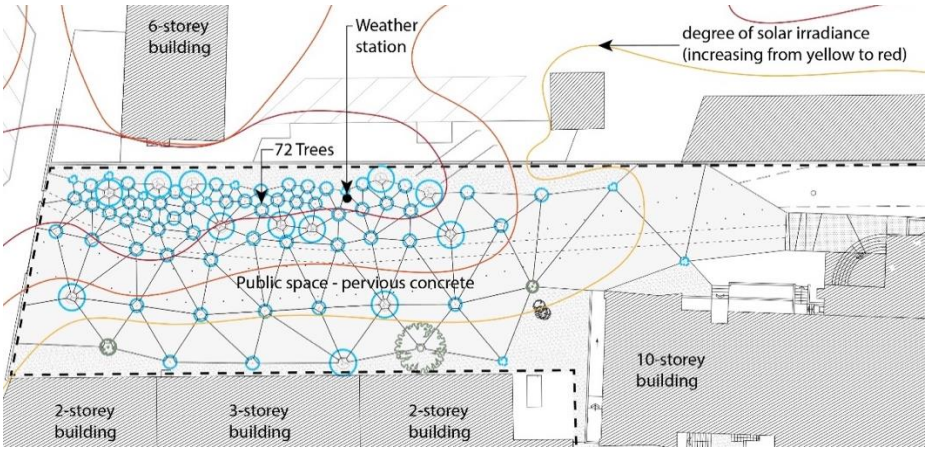


Figure 2. Project plan

Considering those characteristics, the site is a good candidate for conversion to an open green area as an urban cooling measure. The projected conversion completely rethinks this area. It will create a friendly pedestrian space for local inhabitants, no longer accessible to vehicles. As illustrated in figure 2, trees are planted with an increased density in the sunniest areas will create a "tertiary forest", and the asphalt concrete pavement will be replaced entirely with light-colored permeable concrete in order to retain rainwater in the sub-layers, thus allowing the trees to grow properly and the soil to be fertile.

The microclimatic impact of the project is evaluated by conducting measurements before and after transformation. The site and its construction schedule offer a unique opportunity to monitor the site sufficiently ahead of time. Microclimatic measurements are conducted with two weather stations installed by Météo-France. The case station is placed in the parking lot in an area where trees will be planted, while the control station is located on the rooftop approximately 30 m above the parking lot, outside of the project's area of influence.

Trees were planted and most of the asphalt concrete was removed after partial conversion in time for measurements during summer 2019. In addition, only the area below the case station is paved with pervious concrete (see Fig.1b), the rest of the soil remained bare.

1.2. Instrumentation

The weather stations monitor several microclimatic parameters at screen height, including those relevant to pedestrian heat stress: air temperature, relative humidity, black globe temperature, wind speed and long and shortwave upward and downward radiation fluxes, as well as a rain gauge near the control (rooftop) station. In addition, mobile measurements were conducted with a mobile weather station. The position of the stations is indicated in Figure 1.c and a photograph is shown in Figure 3.

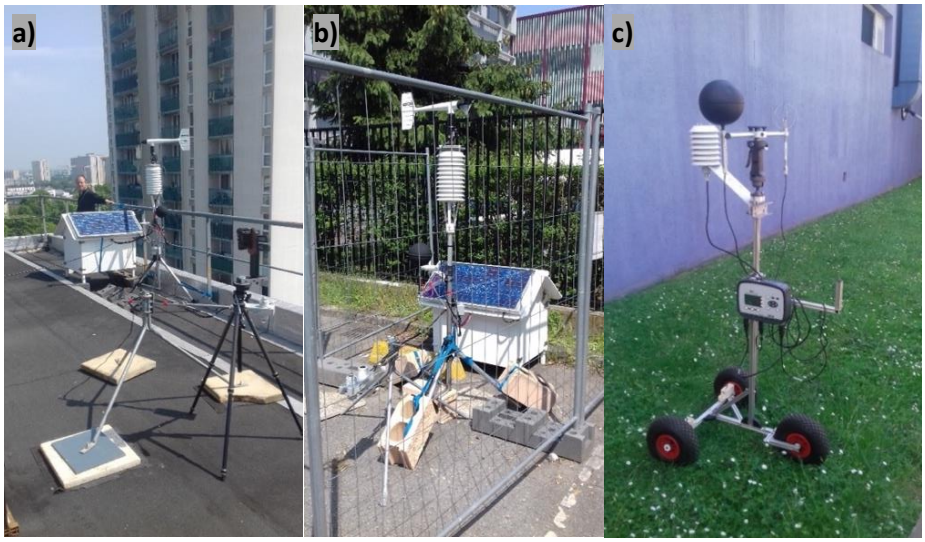


Figure 3. Rooftop (a) and parking lot (b) fixed and mobile (c) weather stations (before conversion).

1.3. Data analysis

The cooling impact created by the site's transformation is evaluated using the protocol described by Parison *et al*. (2020), based on the BACI method combined with the Lowry approach (Lowry 1977). Succinctly, the interstation difference between the case (parking lot) and control (rooftop) stations is monitored before (reference period) and after (countermeasure period) conversion on days presenting radiative conditions (clear skies and wind speed < 3 m/s) with daily minimum and maximum temperatures exceeding 16° and 25°C, respectively.

By comparing the interstation profiles, preexisting differences between stations are filtered out. By comparing the interstation profile during the reference ΔM_{ref} (before) and the countermeasure $\Delta M_{counter}$ (after) periods, the impact of the conversion I can be isolated. The procedure is summarized in equation (1), noting M as the measured meteorological parameter:

$$\Delta M_{counter} - \Delta M_{ref} = \left(M_{case,counter} - M_{ctrl,counter}\right) - \left(M_{case,ref} - M_{ctrl,ref}\right) = I \quad (1)$$

Results are tested for statistical significance.

2. Results and discussions

2.1. Fixed Measurements

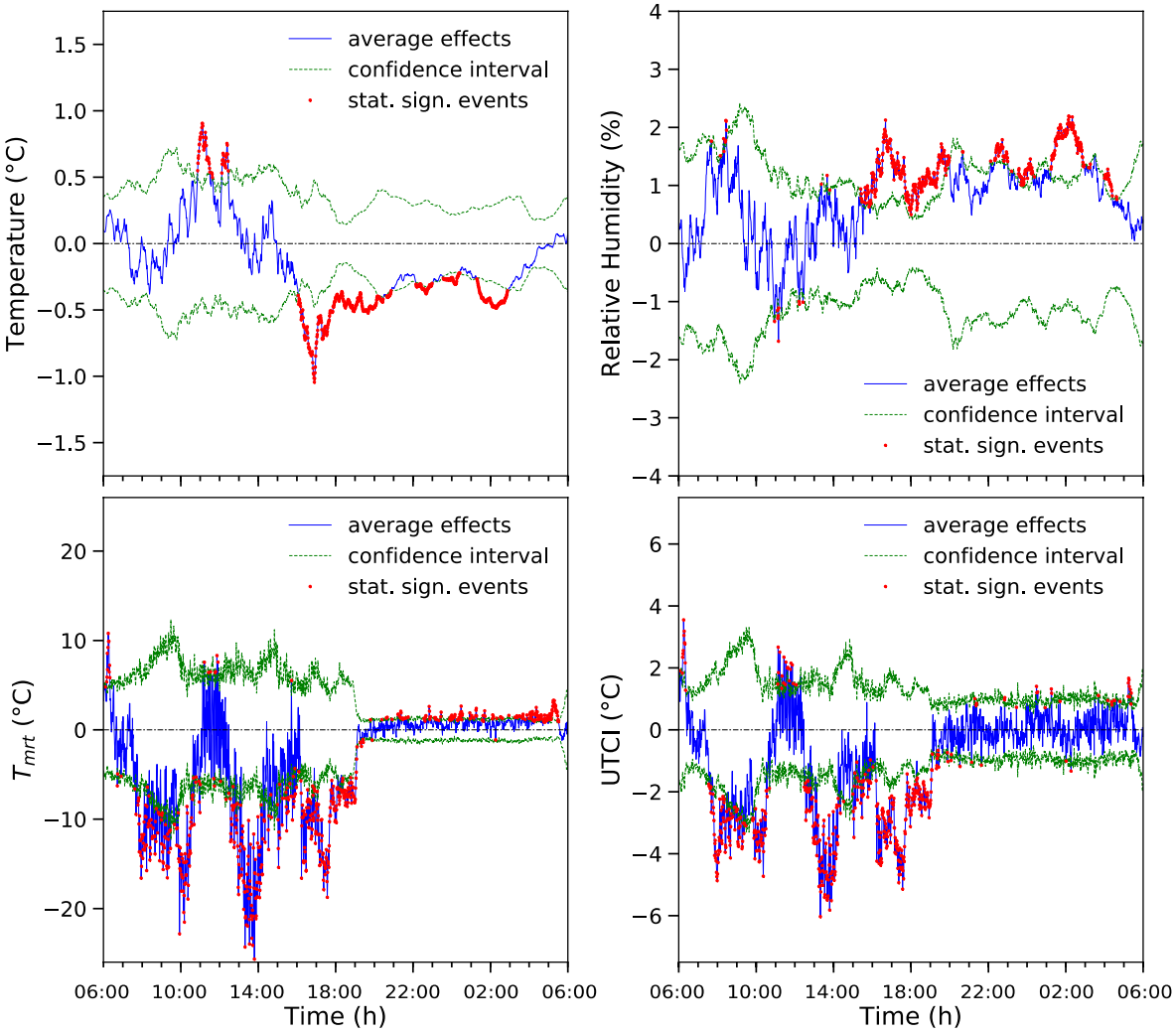


Figure 4. Microclimatic impacts of the site's partial renovation. Assessment based on 18 observation days before and 16 after conversion.

Figure 4 illustrates the microclimatic impacts of the site's partial transformation following the removal of the (partial) asphalt concrete pavement and the planting of trees. The impacts on air temperature, relative humidity and mean radiant temperature (MRT) are reported as well as their combined impact on the Universal Thermal Climate Index (UTCI). Maximum and mean effects are summarized in Table 1.

Table 1. Maximum and mean microclimatic effects

	Air temperature	*Relative humidity*	*MRT*	*UTCI*
Max	-1.0°C	+2.2%	-25.7°C	-6.0°C
Mean	-0.3°C	+1.3%	-7.5°C	-2.5°C
Time of max effect	4:54 pm	11:09 am	1:47 pm	1:18 pm

As can be seen, the microclimatic impacts of the site's partial transformation are quite significant, with three peak cooling effects visible with UTCI, the maximum effect reaching -6.0°C. These are principally attributable to morning and afternoon shade, causing a max reduction in MRT of 25.7°C. Air temperature is reduced up to 1.0°C at the end of the afternoon, while it is briefly increased by 0.9°C around noon. Finally, only minor increases in relative humidity of up to +2.2% are observed during the evening and night. In addition, the observed change is statistically significant for all parameters at least 35% of the day.

Looking at the details, it is clear from the observations that the shade provided by the trees planted in the immediate vicinity of the weather station has a very significant impact in the morning from 8-11 am, 1-3:30 pm and from 5-6 pm on MRT and UTCI. However, conditions seem to have marginally worsened around noon, perhaps due to the reduced thermal inertia of the unsealed soil. In addition, unsealing the soils around the station appears to have increased relative humidity, although climatic differences between 2018 and 2019 also contribute to this. It should be noted that the increase in RH does not have a significant detrimental impact on pedestrian heat stress given how dry conditions are to start with.

2.2. Mobile Measurements

Prior to site transformation, mobile measurements were conducted in June 2018 to estimate the microclimatic spatial distribution before conversion. These were performed on a typical summer day, i.e. with low wind speeds (<3m/s), clear sky and minimum and maximum daily air temperatures respectively greater than 16° and 25°C. These weather conditions match for days of Pasquill Stability Class A or A-B (Pasquill 1961). From these measurements, the Universal Thermal Climate Index (UTCI) equivalent temperature was calculated at several points (Fig.5)

Figure 5. Thermal stress indicator (UTCI) on site before conversion measured on eight different locations on June the 26th of 2018, from 1 pm to 3 pm (local time)

As can be seen, strong microclimatic variations are observed between shaded and insolated areas. All measurements performed under trees or building shading exhibit no thermal stress.

On the other hand, measurements conducted under direct insolation (indicated with a red dot) show a high level of thermal stress, exceeding 35°C equivalent temperature.

A new mobile measurement campaign will be conducted during summer 2020 to assess the change obtained with the complete transformation.

Conclusion

The partial conversion of a parking lot into a green space with 72 trees and pervious concrete pavement was studied as an UHI countermeasure in the Paris metropolitan area. The site was monitored with fixed and mobile weather stations in order to determine the impact of the conversion on the site's microclimate. The impacts of partial conversion, following the removal of most of the asphalt concrete and the plantation of 72 trees were assessed.

A significant improvement of pedestrian heat stress is observed thanks to the shading provided by the trees with reductions of MRT and UTCI of up to 27.5°C and 8.1°C, respectively. Air temperature is also positively affected with a maximum reduction of up to 1.4°C. Finally, unsealing the soil led to an increase in relative humidity by up to 5%.

In addition, a preliminary mobile measurement campaign was conducted to investigate the spatial distribution of heat stress before conversion at eight different locations. Results show that no thermal stress is observed in the shade and high heat stress in the sun.

Mobile measurements will be conducted during summer 2020 after site conversion is completed, with the new pervious pavement in place over the entire site.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial and in-kind contributions of Alteralia, the French Environment & Energy Management Agency, the Paris Climate Agency and LafargeHolcim to this project.

Literature

Akbari H. Pomerantz M., & Taha H., 2001. Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas. *Solar Energy* 70 (3): 295–310. Doi: https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X.

Bowler E.D., Buyung-Ali L., Knight T.M., & Pullin A.S., 2010. Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning* 97 (3): 147–55. Doi: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.

Lowry W.P., 1977. Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology*. Doi: https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2.

Parison S., Hendel M., & Royon L., 2020. An Updated Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques. *Urban Climate*, (under review).

Pasquill F., 1961. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *The Meteorological Magazine* 90 (1063): 33–49.

EVOLUTION OF ECOLOGICAL VITICULTURE POTENTIAL IN ROMANIA DURING 1961-2013 PERIOD

PATRICHE C.V.[1], IRIMIA L.M.[2]

1 Académie Roumaine, Filiale d'Iasi, Collectif de Géographie, Iasi, Roumanie (pvcristi@yahoo.com)
2 Université Agronomique d'Iasi, Iasi, Roumanie

Summary: *Ecological viticulture potential of Romania was evaluated starting from the methodology proposed by Irimia et al. (2014). We used as input data a 25 x 25 m digital elevation model, the ROCADA climate database (Dumitrescu et Birsan, 2015) for the 1961-2013 period and the soil map of Romania at scale 1 :200000. The ecological viticulture potential was determined for 2 periods: the reference climate period (1961-1990) and the more recent period (1991-2013) affected by climate warming. The results showed that the region suitable for viticulture had been expanded in Romania, the potential for white wines had migrated at higher altitudes and the ecological potential for red wines advanced from South to North and from lower to higher altitudes.*

Key words: *ecological viticulture potential; relief suitability; soil suitability; climate suitability; Romania*

Résumé : ***Evolution du potentiel de la viticulture écologique en Roumanie au cours de la période 1961-2013.*** *Le potentiel viticole de la Roumanie a été évalué à partir de la méthodologie propose par Irimia et al. (2014). On a utilisé comme donnés d'entrés le modèle numérique du terrain à 25x25 m de résolution, la base de donné climatique ROCADA (Dumitrescu et Birsan, 2015) pour le période 1961-2013 et la carte de sols de Roumanie à l'échelle 1 :200.000. Le potentiel viticole écologique du territoire a été évalué pour 2 périodes : le période climatique de référence (1961-1990) et le période plus récente (1991-2013) affecté par le réchauffement climatique. Les résultats montrent la zone favorable pour la viticulture s'est agrandie en Roumanie, le potentiel pour des vins blancs a monté en altitude et le potentiel écologique pour les vins rouges a avancé de Sud au Nord et a aussi monté en altitude.*

Mots clés : *potentiel viticole écologique ; potentiel du relief ; potentiel du sol ; potentiel du climat ; Roumanie*

Introduction

The recent climate change have affected and continues to affect the vineyards throughout the World. The factors influencing the viticultural potential, especially the temperature and temperature related factors, have changed both quantitatively and qualitatively. In Romania, such changes have been documented in the last decade (Irimia *et al.*, 2018).

Our study attempts to investigate the ecological potential for viticulture in Romania by applying a complex methodology which was previously validated through various studies (Irimia *et al.*, 2015; Sirnik *et al.*, 2019). We take into account the entire country, not just the existing viticultural areas, because we are interested to see the spatial extent of the ecological viticultural potential. We also point out how the ecological potential has changed as an effect of climate warming. This information is very important because it allows us to locate new areas suitable for viticulture, to explain the qualitative changes in the wine production sector and to provide a basis for technological adaptation of wine producers to climate change.

1. Materials and methods

1.1. Study region

Romania is one of the main wine countries in the world. Romanian viticulture is old, traditional, represented by 37 wine-growing regions totaling about 190,000 ha of vine plantations. It is grown mainly international well-known *Vitis vinifera* L. cultivars, but in each wine-growing region one or two more local *V. vinifera* cultivars are cultivated. In the context of climate change, Romania viticulture modifies in a positive way, with appearance of new areas suitable for grapevine growing and diversification of local wine type production.

1.2. Input environmental data

The input data for relief suitability was the 25x25 m digital elevation model (DEM) extracted from EUDEM model (European Environment Agency), on the basis of which terrain slope and aspect were computed. For soil suitability, the input data was extracted via SoilGrids v0.5.3 platform (https://soilgrids.org/) for the Romanian territory at a spatial resolution of about 797 x 797 m. We extracted clay, humus and gravel contents for the upper soil layers (5 cm, 15cm and 30 cm) and computed the average contents. Then, we resampled the spatial data to a resolution of 100 x 100 m using ordinary kriging interpolations. The climate data was retrieved from ROCADA database (Dumitrescu et Birsan, 2015). This GIS database stores climate information in 10 x 10 km spaced grid points. We extracted the average monthly values of air temperature, precipitations, sunshine duration for the two time periods (1961-1990 and 1991-2013) and downscaled them at a resolution of 100 x 100 m using the regression-kriging approach and altitude as predictor, in the case of temperature and sunshine duration, and the ordinary kriging interpolation for precipitation data. The potential global radiation and the potential sunshine duration were derived in SAGA-GIS software on the basis of DEM. By computing the actual / potential sunshine duration ratio, we were able to derive the actual global radiation.

1.3. Methodology

The methodology we used for the evaluation of ecological viticulture potential was proposed by Irimia *et al.* (2014). It is a multicriteria methodology, which considers 3 groups of factors: relief, soil and climate. The relief influence is quantified by means of 2 factors: terrain aspect and slope. The soil group comprises 3 factors: soil clay, humus and gravel contents. The climate group integrates 10 factors, of which 9 were used in the present study (the length of the growing season was not computed due to the absence of daily temperature data).

Some of the climate factor are basic parameters (mean annual temperature, mean July temperature, growing season sunshine duration and precipitations), other are derived, more complex indices (global solar radiation, sum of effective temperatures, actual heliothermal index, bioclimatic index). Each factor was classified into 4 or 3 classes, according to the methodology, expressed by 10, 8, 5 and 0 (unsuitable for grape growing) ranking points.

For each group of factors, an average value was computed, resulting the relief, soil and climate suitability for grape growing. The final suitability map was achieved by averaging these groups of factors. The relief and soil suitability were considered constant during 1961-2013 period, while the climate suitability was considered variable and therefore analyzed for 2 periods of time (1961-1990 and 1991-2013).

This methodology was applied and validated in numerous previous studies, conduced both in Romania (Irimia *et al.*, 2015) and in other European countries (Sirnik *et al.*, 2019). The results proved its validity at least within the temperate continental climate zone.

2. Results and discussions

The *relief* of Romania is mostly suited for white wine varieties, the 5, 6 and 7 ranking points being assigned for 70 % of the country (Tab.1). Most of this area corresponds to plains, which have a ranking point of 5 (Fig.1, left). The potential for red wines, from the relief point of view, is present on 30% of the country (the ranking points 8, 9 and 10) and corresponds to hilly, plateau and mountain areas. However, this potential is downgraded by the restrictive climate of mountain zones.

Table 1. Percentages of suitability ranking points for the Romanian territory.

Ranking point	*Relief*	*Soil*	*Climate 1961-1990*	*Climate 1991-2013*	*Ecological potential 1961-1990*	*Ecological potential 1991-2013*
0	-	1.4	45.7	34.8	47.1	36.2
5	37.8	0.0	3.6	2.3	0.5	0.1
6	18.0	33.7	4.2	6.1	8.60	5.6
7	14.2	34.8	10.2	5.9	34.8	40.7
8	8.1	29.0	6.9	9.2	8.3	15.5
9	16.3	0.6	20.4	11.0	0.6	1.8
10	5.6	0.6	8.9	30.8	0.0005	0.0048

The *soils* of Romania are mostly suitable for white wine varieties, the ranking points of 6 and 7 cumulating 68.5% of the country (Fig.1, right). Also about one third (29%) of the territory is suitable for red table wines. Though the potential for quality red wines form the soils viewpoint may seem low, because the 9 and 10 ranking points cumulate only 1.2%, this share corresponds to an area of about 284000 ha.

The *climate* suitability for vine growing has significantly changes between the two periods of time, mainly because of the climate warming. The restrictive areas for vine growing have diminished from 45.7% (1961-1990) to 34.8% (1991-2013). The suitability for white wine varieties, derived from the cumulated shares of 5, 6 and 7 ranking points, has decreased from 18% (1961-1990) to 14.3% (1991-2013). The potential for quality red wines (ranking point 10) has significantly increase, from 8.9% to 30.8% between the two periods. The decrease of the share of ranking point 9 is the effect of the increase of the area associated with ranking point 10, which expanded and replaced the most of the area associated with the rank 9 (Fig.2). As a general feature, climate suitability for white wines has migrated towards North and to higher altitudes, being replaced by climate suitability for red wines at lower altitudes. This finding is in agreement with previous results (Irimia *et al.*, 2018).

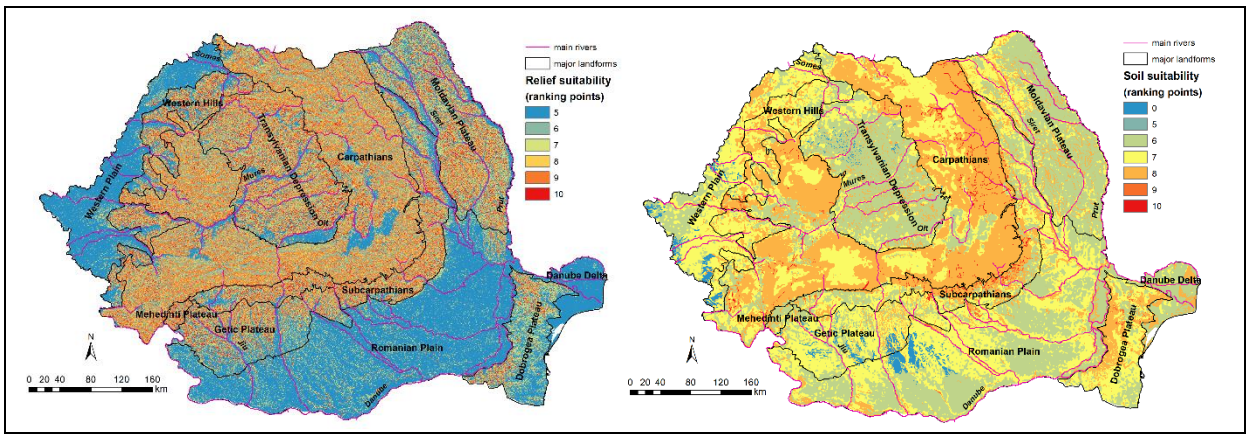


Figure 1. Relief (left) and soil (right) suitability for vine in Romania

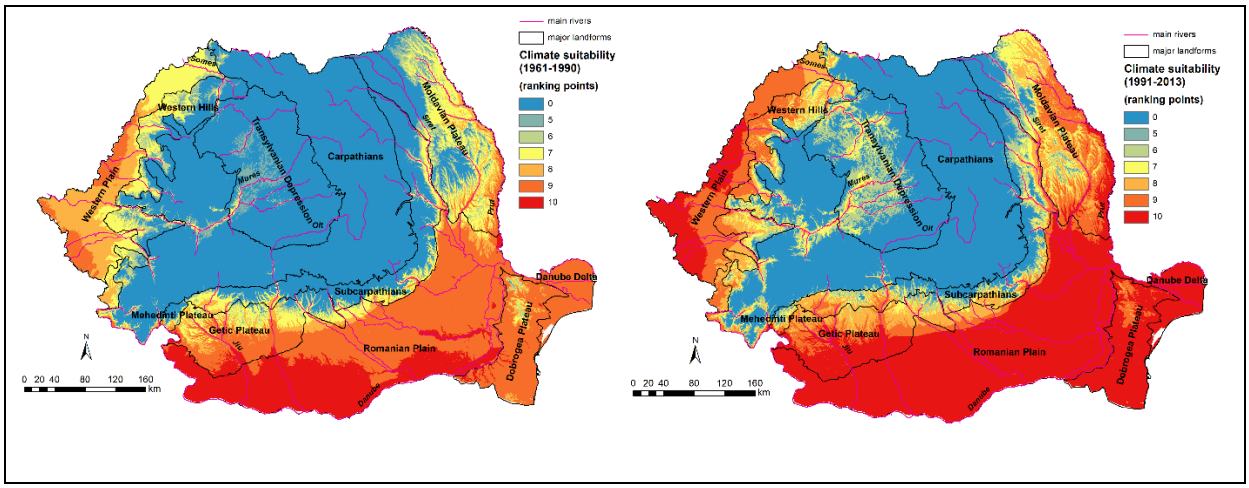


Figure 2. Climate suitability for vine during 1961-1990 period (left) and 1991-2013 (right)

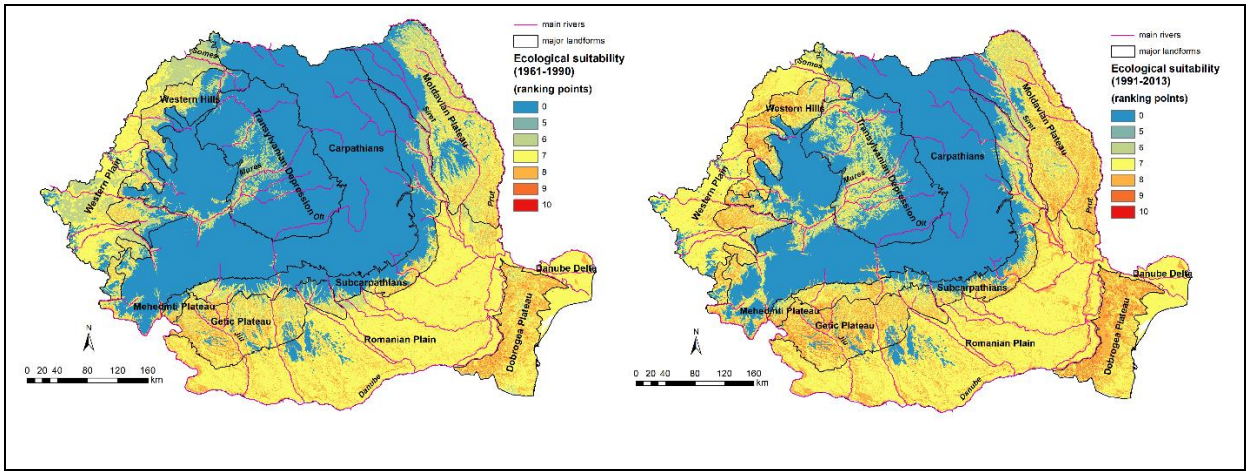


Figure 3. Ecological suitability for vine during 1961-1990 period (left) and 1991-2013 (right)

The *ecological potential* for viticulture in Romania, as it results from the integration of the relief, soil and climate suitability, has changed in the last decades due to climate warming (Fig.3). The restrictive areas for vine growing have decreased from 47.1% (1961-1990) to 36.2% (1991-2013), mainly by the migration of the restrictive limit at higher altitudes. The potential for white wine varieties remains quite the same, the cumulated shares of ranking points 5, 6 and 7 being 43.9% in 1961-1990 and 46.4%in 1991-2013. However, it is to be noted that these areas have migrated to higher altitudes and also expanded in the Transylvanian Depression. The potential for red wine varieties (ranking points 8, 9 and 10) has increased from 8.9 % (1961-1990) to 17.3% (1991-2013) and that of quality red wines from 0.6 to 1.8%, which represents an area of about 427000 ha. Figure 3 shows that the potential for red wines has expanded towards North and at higher altitudes in the Moldavian Plateau, Western Hills, Getic Plateau and Dobrogea Plateau.

Conclusions

Our research shows that, due to climate change and especially climate warming, the ecological potential for viticulture in Romania has changed significantly during the last decades. The restrictive limit for vine has migrated to higher altitudes and terrains previously unsuitable for viticulture have become suitable for white wine varieties. On the other hand, at lower altitudes, the climate has become suitable for red wine production. This explains why several vineyards, traditionally focused on white wine varieties, have recently introduced with success red wine varieties.

Literature

Dumitrescu A. & Bîrsan M.V., 2015. ROCADA: a gridded daily climatic dataset over Romania (1961–2013) for nine meteorological variables. *Natural Hazards*, 78(2): 1045–1063.

European Environment Agency, European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.1. URL: http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1/view

Florea N., *et al*., 1963-1993. Harta Solurilor României, scara 1:200,000 (Soil Map of Romania, scale 1:200,000). Geological Institute/IGFCOT, Bucharest, 50 sheets.

Sirnik I., Quénol H., Jiménez-Bello M.A., Manzano J., Irimia L.M., Patriche C.V. & Žust A., 2019. Viticultural potential assessment and its spatial delineation analysis in Goriška Brda viticultural region (Slovenia). 21th GiESCO International meeting, June, 23-28, 2019, Thessaloniki, Greece.

Irimia L.M., Patriche C.V. & Roșca B., 2018. Climate change impact on climate suitability for wine production in Romania. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(1-2),1–14.

Irimia L.M., Patriche C.V., Bucur G.M., Quénol H. & Cotea V.V, 2015. Spatial Distribution of Grapes Sugar Content and its Correlations with Climate Characteristics and Climate Suitability in the Huși (Romania) Wine Growing Region. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*, 43(1), 250-258.

Irimia L.M., Patriche C.V. & Quénol H., 2014. Analysis of viticultural potential and delineation of homogeneous viticultural zones in a temperate climate region of Romania. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 48, 145-167.

DYVALOCCA : UN PROJET POUR L'ETUDE DES NUAGES BAS DE SAISON SECHE SUR LA FACADE ATLANTIQUE DE L'AFRIQUE CENTRALE ET DE LEUR IMPACT BIOCLIMATIQUE SUR LES FORÊTS SEMPERVIRENTES

PHILIPPON N.[1], FINK A.[2], ADLER B.[2], BIGOT S.[1], CAMBERLIN P.[3], CASTEL T.[3], KNIPPERTZ F.[2], KOHLER M.[2], MARISCAL A.[1], MALOBA MAKANGA J.D.[4], MOREL B.[5], MORON V.[6], PANTE G.[2], PELLARIN T.[1], PERGAUD J.[3], SAMBA G.[7], WIESER A.[2]

1 CNRS, IRD, UGA, GINP, Institut des Géosciences de l'Environnement IGE, UMR 5001, Grenoble, France (nathalie.philippon@univ-grenoble-alpes.fr)
2 KIT – IMK , Garmisch-Partenkirchen, Germany
3 CNRS, UB, EPHE, Centre de Recherches de Climatologie BGS, UMR 6282, Dijon, France
4 Université Omar Bongo, LANASPET, Libreville, Gabon
5 UR – LE2P, EA4079, Saint Denis, La Réunion
6 AMU, CNRS, IRD, Collège de France, INRA– CEREGE, UMR 7330, Aix en Provence, France
7 Université Marien Ngouabi – CREE, Brazzaville, République du Congo

Résumé : *Les nuages bas sont des composantes clé du climat mais sont rarement bien représentés dans les modèles météorologiques et climatiques. Il a été montré récemment qu'une importante couverture nuageuse basse se développe durant la saison sèche (juin-septembre) sur la façade atlantique de l'Afrique Centrale, des plaines littorales du Gabon et du Congo-Brazzaville aux plateaux intérieurs. Cette saison sèche nuageuse est unique sous les tropiques et explique probablement la présence les forêts sempervirentes les plus denses d'Afrique Centrale car l'évapotranspiration est faible. Le projet DYVALOCCA est financé sur 2020-2022 par les agences de recherche française et allemande (ANR et DFG). Il conduira une campagne de mesures, collectera données in-situ existantes et estimations satellitaires afin d'établir des analyses diagnostiques et de modélisation de la dynamique et la variabilité diurne à interannuelle de ces nuages bas. Ceci devrait aider à comprendre la vulnérabilité passée, présente et future des forêts denses sempervirentes d'Afrique Centrale.*

Mots clés : *Afrique Centrale ; nuages bas ; processus ; variabilité ; disponibilité en eau et lumière.*

Summary: ***Dyvalocca: a project to study dry seasonlow clouds on the Atlantic side of Central Africa and their bioclimatic impact on evergreen forests.*** *Low-level clouds are key components of the climate but are not well represented in weather and climate models. Recently it has been shown that an extensive low-level cloud cover develops during the June-September main dry season in western equatorial Africa, from the coastal plains of Gabon and Congo-Brazzaville to the inland plateaus downstream of the low-mountain crests. Such a cloudy main dry season is unique in the moist Tropics and is likely to explain the presence of the densest and evergreen forests of Central Africa as evapotranspiration is low and the quality of light is high. The ANR-DFG funded "DYVALOCCA" project will conduct from 2020 to 2022 a field campaign, raise existing in-situ and utilize satellite data for use in diagnostic and modeling analyses to advance our incomplete comprehension of the dynamics and diurnal to interannual variability of these low-level clouds. This may help to understand past, present and future vulnerability of western equatorial Africa dense evergreen forests.*

Key words: *Central Africa; low clouds; processes; variability; water and light availability.*

1. Positionnement

La façade Atlantique de l'Afrique Centrale, c'est à dire le sud du Cameroun, la Guinée Equatoriale, le Gabon et la République du Congo (6°S-3°N, 8-18°E), abrite les forêts les plus denses et sempervirentes d'Afrique Centrale (Fayolle *et al.* 2014). Compte tenu que la saison sèche est également la plus longue (4 mois) et la plus sèche (<1mm/j) à l'échelle de l'Afrique Centrale, ceci n'est possible qu'en raison de la présence d'une importante couverture nuageuse basse (Dommo *et al.* 2018) qui maintient des conditions fraîches, humides et un rayonnement solaire incident faible mais aussi principalement diffus (Philippon *et al.* 2019) favorable à la photosynthèse. Ces nuages bas se développent courant mai et perdurent jusqu'en septembre. De la côte Atlantique à 15°E, leur fréquence moyenne sur la saison dépasse 40% et atteint 70% sur la façade au vent des Monts de Cristal et du Massif du Chaillu (Fig.1).

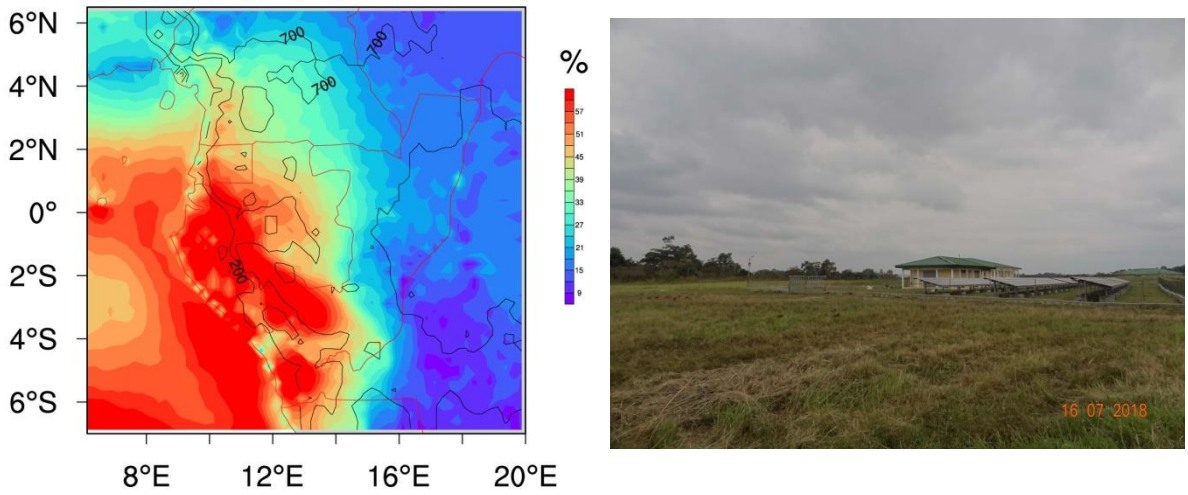


Figure 1. Gauche : fréquence moyenne des nuages bas en juin-septembre entre 8 et 17LT (2009-2014, données de classification nuageuse du NoWCasting and Short rAnge Forecasting). Droite : couverture nuageuse basse au parc de la Lékédi le 16/07/2018 à 13LT.

Les études paléoclimatiques suggèrent une importante instabilité de ces forêts. Durant la dernière crise forestière, 2500BP, les forêts sempervirentes d'Afrique Centrale ont survécu dans trois refuges dont un refuge littoral et submontagnard sur la façade Atlantique (Maley *et al.* 2017). Cependant, les raisons de cette crise forestière – climatique (ex variabilité liée aux événements Niño pacifique et Atlantique) ou anthropique (déforestation liée à l'expansion Bantu Garcin *et al.* 2018, Bayon *et al.* 2019) – sont à présent discutées.

Le climat actuel de la façade Atlantique de l'Afrique Centale reste l'un des plus sous-étudié à l'échelle globale. Les observations in-situ sont rares (Bigot *et al.* 2016, Nicholson *et al.* 2018) et le focus des recherches est principalement mis sur les saisons des pluies. Ni les processus météorologiques et climatiques contrôlant le développement et la variabilité des nuages bas, ni leur impact sur la disponibilité en eau et en lumière pour les forêts n'ont été suffisamment documentés. Cependant, toute réduction de cette couverture nuageuse en raison du changement climatique pourrait représenter un point de bascule majeur pour les forêts, potentiellement plus important que la déforestation dans cette région du monde (Mayaux *et al.* 2013). Ceci impacterait très négativement les services écosystémiques rendus par ces forêts, notamment la source d'humidité qu'elles représentent à l'échelle régionale pour les régions semi-arides voisines (Spracklen *et al.* 2012) et le puits de carbone qu'elles représentent à l'échelle globale (Pan *et al.* 2011).

2. Objectifs

Il y a donc un besoin urgent de comprendre les raisons de la présence de ces nuages bas, leur variabilité et leurs effets bioclimatiques dans l'actuel pour fournir une évaluation robuste de leur devenir sous l'effet du changement climatique, et comprendre la stabilité passée et future des forêts. Ceci constitue les objectifs principaux du projet « DYnamics, VAriability and bioclimatic effects of LOw Clouds in western Central Africa » (DYVALOCCA), co-financé sur 2020-2022 par l'ANR et la DFG.

Pour répondre à ces objectifs un consortium composé (i) de partenaires français (l'Institut des Géosciences de l'Environnement, le Centre de Recherches de Climatologie - CRC), allemands (l'Institut de Météorologie et Climat – IMK – de l'Institut Technologique de Karlsruhe) et gabonais (le Département de Géographie de l'Université Omar Bongo, l'Agence pour la Sécurité de la navigation aérienne en Afrique et Madagascar – ASECNA, le Service National de la Météorologie) comprenant météorologues et climatologues tropicalistes,

modélisateurs du climat, et (ii) d'experts en télédétection des nuages et en fonctionnement des forêts tropicales, a été créé.

2.1. Identification des processus météorologiques expliquant la formation et la dissipation des nuages bas à l'échelle diurne

L'étude des processus météorologiques expliquant la formation et la dissipation des nuages bas à l'échelle diurne sera menée à partir de l'analyse de données in-situ historiques (fournies par l'ASECNA et le Service National de la Météorologie), d'une campagne de terrain en juillet-août 2021, et de modélisation atmosphérique haute résolution à partir des modèles régionaux ICON et Méso-NH respectivement implémentés à l'IMK et au CRC.

Les analyses seront menées sur deux transects est-ouest (Fig.2, gauche) afin de déterminer dans quelle mesure les processus de formation et dissipation des nuages sont différents entre plaines côtières, versants au vent des monts de Cristal et Du Chaillu et plateaux intérieurs (Fig.2, droite).

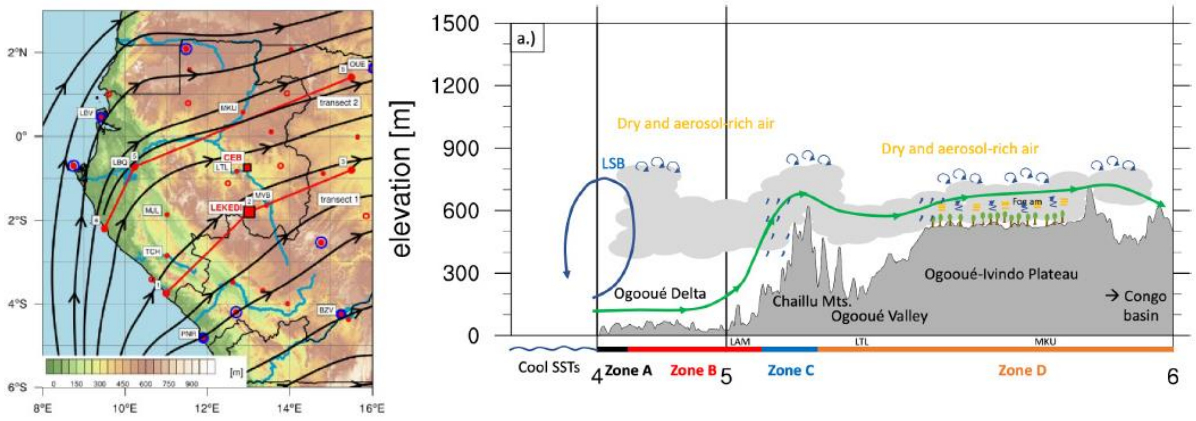


Figure 2. Gauche : hydrographie et topographie de la façade Atlantique de l'Afrique Centrale, vent à 925hPa en juin-septembre (lignes de flux noires) et transects retenus (en rouge). Les points rouges et rouges et bleus représentent les stations météorologiques et synoptiques disponibles. Droite : coupe topographique du transect nord (transect 2). LSB pour Land-Sea Breeze.

2.2. Caractérisation de la variabilité intra-saisonnière à interannuelle de la couverture nuageuse basse et des forçages océano-atmosphériques locaux et régionaux en jeu

La caractérisation de la variabilité intra-saisonnière et interannuelle des nuages bas (mise en place, fréquence, retrait, extension spatiale) sera menée à partir de l'analyse de données in-situ historiques, d'estimations satellites et des réanalyses ERA-5. Des approches en types de temps et ondes équatoriales seront utilisées pour comprendre les forçages atmosphériques impliqués dans la variabilité intra-saisonnière de la couverture nuageuse (ex : modulation du flux de mousson, du flux d'est de moyenne troposphère... Fig.3). L'impact des températures de surface de la mer locales et régionales sur la saisonnalité et la variabilité interannuelle sera étudié en couplant diagnostics statistiques et expériences de sensibilité avec le modèle Méso-NH.

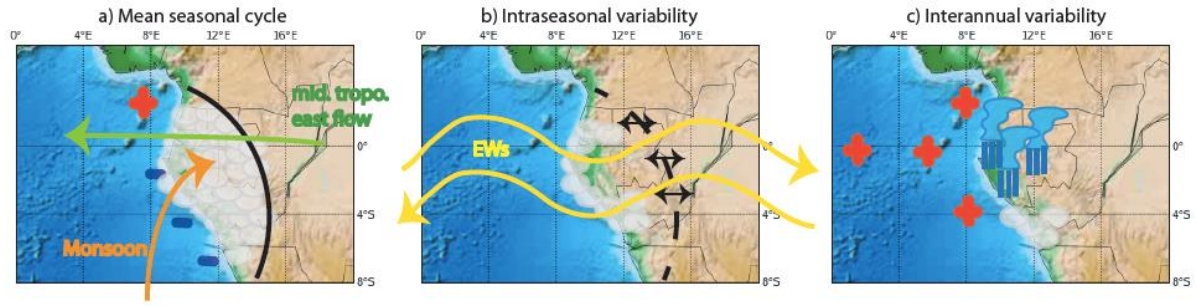


Figure 3. Composantes du système climatique régional potentiellement pressenties pour moduler la couverture nuageuse basse à l'échelle a) saisonnière (flux de mousson et de moyenne troposphère), b) intra-saisonnière (ondes équatoriales) et c) interannuelle (anomalies de température dans l'Atlantique équatorial et tropical sud-est). Les croix rouges et les moins bleus représentent des températures de surface de la mer chaudes et froides

2.3. Evaluation des effets bioclimatiques : modulation de la disponibilité en lumière et de la demande en eau.

Enfin, l'impact des nuages bas sur la disponibilité en eau et lumière des forêts sera exploré sur la base (i) de mesures in-situ (Tab.1) spécifiquement acquises par une station météorologique implantée dès mars 2020 sur la concession forestière CEB Precious Woods à Bambidie (Fig.2, gauche) et (ii) de simulations avec un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs (Jacquart et Choisnel 1995).

Tableau 1. Instrumentation implémentée sur station météorologique pour le suivi de l'évolution de la disponibilité en eau et en lumière pour les forêts au Gabon.

Variable mesurée	*Capteur implémenté*
Rayonnement solaire net	Radiomètre net CNR4 Kipp&Zonen
Rayonnement solaire entrant global et diffus	Pyranomètre SPN1 Delta-T
Rayonnement solaire photosynthétiquement actif (PAR)	Quantum CS310 Apogée
Humidité du sol	Sondes à 5, 20, 50 et 100 cm
Précipitations	Pluviomètre RM Young
Température & Humidité Relative	CS125 Campbell
Pression de l'air	Baromètre SETRA
Vent à 2m (direction et vitesse)	Anémomètre Sonic Gill 2D

Les mesures in-situ permettront de dresser le bilan radiatif sous la couverture nuageuse, d'estimer la quantité et la qualité de la lumière reçue par les forêts et d'estimer l'évapotranspiration potentielle. Elles pourront être comparées à des mesures similaires acquises au nord du Congo où la saison sèche est lumineuse. Les simulations hydrologiques alimentées

avec les données in-situ permettront d'estimer l'effet de compensation ou d'amplification de l'évapotranspiration *vs* la pluie sur le déficit hydrique.

3. Conclusion

Au terme de DYVALOCCA, nous devrions avoir montré :

- La qualité des estimations de la nébulosité et du rayonnement solaire pour le Gabon / sud de la République du Congo lors de la grande saison sèche,
- La spécificité des processus qui y régissent la formation et dissipation de la couverture nuageuse basse par rapport au sud de l'Afrique de l'Ouest,
- La variabilité et prévisibilité de la couverture nuageuse basse,
- La capacité des modèles climatiques à la simuler,
- La spécificité des contraintes en lumière et en eau pendant la saison sèche nuageuse et comment sont-elles modulées lorsque la couverture nuageuse se dissipe,

L'ensemble de ces éléments nous permettra d'apporter des éléments clés pour répondre à la question : anticipons-nous une menace majeure pour les forêts sempervirentes au cours des prochaines décennies au Gabon et dans le sud de la République du Congo en raison du changement climatique ?

Bibliographie

Bayon G., *et al.*, 2019. The roles of climate and human land-use in the late Holocene rainforest crisis of Central Africa. *Earth Planetary Science Letters,* 505, 30–41.

Bigot S., *et al.*, 2016. Etat actuel des réseaux de mesures éco-climatiques en Afrique Centrale. 29ème Colloque de l'AIC, eds Camberlin P, Richard Y (Dijon), 101–106.

Dommo A., Philippon N., Seze G., Vondou D., Eastman R., 2018. The June – September Low Cloud Cover in Western Central Africa: Mean Spatial Distribution and Diurnal Evolution, and Associated Atmospheric Dynamics. *Journal of Climate,* 31, 9585–9603.

Fayolle A., *et al.*, 2014. Patterns of tree species composition across tropical African forests. *Journal of Biogeography,* 41, 1–12.

Garcin Y., *et al.*, 2018. Early anthropogenic impact on Western Central African rainforests 2,600 y ago. *Proceedings of the National Academy of Science,* 115, 3261–3266.

Jacquart C., Choisnel E., 1995. Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs. *La Météorologie,* 9, 29–44.

Maley J., *et al.*, 2017. Late Holocene forest contraction and fragmentation in central Africa. *Quat Res* 89, 1–17.

Mayaux P., *et al.*, 2013. State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010. *Philosophical Transactions of the Royal Society: B Biological Science,* 368, 1–9.

Nicholson S.E., Dezfuli A.K., Zhou L., 2018. New Rainfall Datasets for the Congo Basin and Surrounding Regions. *Journal of Hydrometeorology,* 19, 1379–1396.

Pan Y., *et al.*, 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science,* 333, 988–993.

Philippon N., *et al.*, 2019. The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. The light-deficient climates of western Central African evergreen forests. *Environmental Research Letters,* 14, 034007.

Spracklen D.V., *et al.*, 2012. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature,* 489, 282–285.

ROLE DE LA VEGETATION ET DE LA GEOMETRIE URBAINE DANS LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN : CAS DE LA VILLE DE STRASBOURG

PHILIPPS N.[1], KASTENDEUCH P.[1], MONTAUBAN O.[2], NAJJAR G.[1]

1 Laboratoire ICube, équipe TRIO, Université de Strasbourg UMR 7357, Strasbourg, France (nathalia.philipps@etu.unistra.fr)
2 Laboratoire ICube, équipe TRIO, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg, France (olivier.montauban@insa-strasbourg.fr)

Résumé : *Bien que traduisant une différence de température entre ville et campagne, l'îlot de chaleur urbain n'en reste pas moins un phénomène à l'hétérogénéité marquée au sein même du milieu urbain. Il existe en effet non seulement une variabilité temporelle journalière, saisonnière et dépendante des conditions météorologiques, mais également une distribution spatiale liée aux caractéristiques des multiples surfaces urbaines. Ces paramètres spatiaux relèvent aussi bien de la morphologie urbaine que de l'occupation du sol. L'objectif de cette étude est de fournir une analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain strasbourgeois exposant à travers elle le rôle de ces différents paramètres. Son originalité réside dans le fait que la spatialisation du phénomène s'appuie en partie sur une classification LCZ de Strasbourg. Les résultats issus des premières analyses statistiques, ainsi que la cartographie, soulignent l'effet de mitigation de la végétation, ainsi que l'exacerbation de l'îlot de chaleur urbain dans les LCZ les plus minéralisées et à la densité de bâti importante.*

Mots clés : *îlot de chaleur urbain ; LCZ ; végétation ; géométrie urbaine ; ΔTur*

Summary: ***The role of vegetation and urban geometry in the spatio-temporal variability of the urban heat island: the case of Strasbourg city.*** *Although expressing a temperature difference between the city and its rural surroundings, the urban heat island remains a very heterogeneous phenomenon even within the urban area itself. There is indeed not only a daily temporal variability, but also a spatial distribution which is related to the numerous urban surfaces characteristics. These spatial parameters concern both urban morphology and land use/land cover. The aim of this study is to provide a spatial and temporal analysis of urban heat island in Strasbourg city which highlights the role of these different parameters. The originality of this paper is that the urban heat island spatialization depends partly on a LCZ classification of Strasbourg city. The results of the first statistical analysis and the cartography highlight the mitigation effect of vegetation, as well as the aggravation of the urban heat island effect in the most mineralized and built up LCZ.*

Key words: *urban heat island; LCZ; vegetation; urban geometry; ΔTur*

Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique global, il est fort probable que les vagues de chaleur seront amenées à être plus fréquentes, plus longues et plus intenses. Associé à ces canicules, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) tend à exacerber l'effet de stress thermique engendré, entraînant des conséquences sanitaires particulièrement néfastes pour les citadins (Arnfield *et al.*, 2003 ; Zhao *et al.*, 2018). Diverses stratégies de mitigation de l'ICU sont actuellement mises en place par les villes dans le cadre de politiques d'adaptation au changement climatique. La plupart sont centrées sur l'introduction de végétation, dont les effets d'atténuation ont déjà fait l'objet de nombreuses publications (Spronken-Smith and Oke, 1998 ; Bowler *et al.*, 2010). Or les facteurs liés à la géométrie urbaine jouent également un rôle crucial dans l'établissement d'un ICU (Andreou, 2014), rendant ces paramètres indissociables d'une politique de mitigation efficace. Face à l'hétérogénéité du milieu urbain, il apparaît alors essentiel de mieux cerner l'influence de ces différentes variables sur le comportement de l'ICU. Cette étude se propose de fournir une analyse statistique de la variabilité de l'ICU strasbourgeois, portant aussi bien sur sa dynamique temporelle que sa distribution spatiale. Elle se base en partie sur une classification LCZ de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), afin d'obtenir un aperçu de l'intensité du phénomène au sein d'un type de zone urbaine donné et de mettre en évidence le rôle de plusieurs variables géométriques et d'occupation du sol.

S'appuyant sur les paramètres sous-jacents des LCZ et les travaux de Unger (2006), une nouvelle méthodologie de cartographie de l'ICU conclut l'étude.

1. Données et Méthodes

1.1. Campagne de mesures in situ

Une campagne de mesures a été menée entre 2013 et 2016 par l'équipe TRIO du laboratoire ICube, dans le cadre d'un projet de recherche visant à comprendre et modéliser la réponse de la zone urbaine strasbourgeoise aux conditions climatiques générales imposées (Najjar *et al.*, 2015). Cette campagne s'appuie sur un réseau d'une trentaine de stations déployées sur l'ensemble de l'EMS, certaines d'entre elles appartenant, outre à ICube, à ATMO Grand Est et à Météo-France.

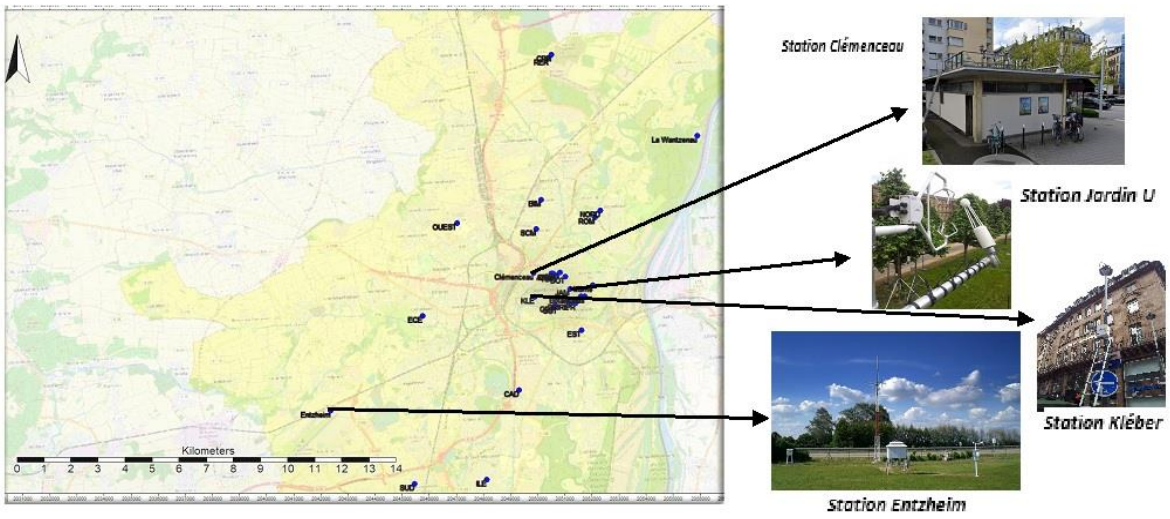


Figure 1. Carte du réseau de stations ayant servi à l'étude (Sources des données : réseau ICube, réseau ATMO Grand Est et réseau Météo-France. Sources des photos : Google Map, Colin J pour ICube, Strasbourg)

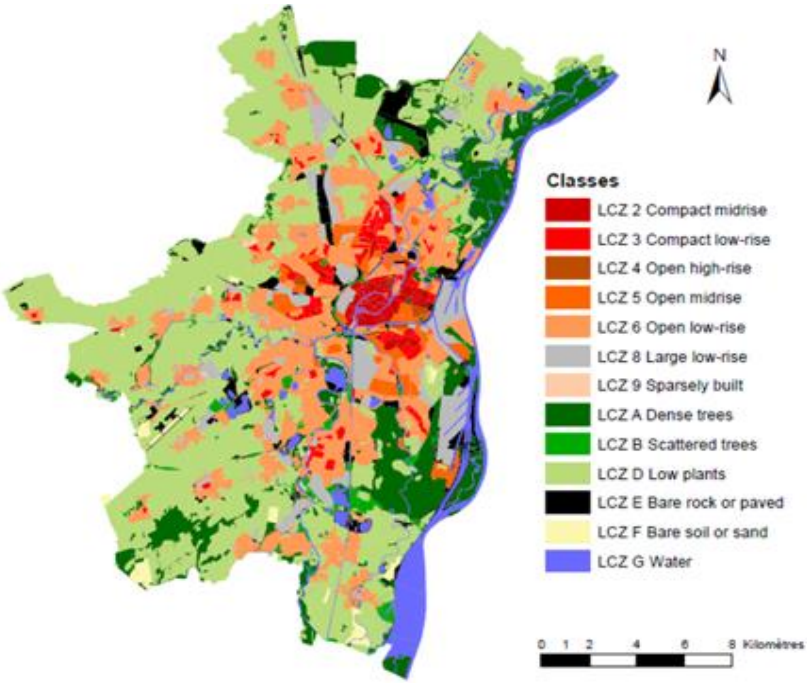
Couvrant un ensemble de zones aux caractéristiques géométriques et d'occupation du sol variées, la totalité des stations enregistrent la température de l'air et l'humidité relative. En outre, certaines incorporent la vitesse et la direction du vent, ainsi que la fraction d'insolation et les précipitations. La période couverte par les mesures variant nettement d'une station à l'autre, il a été choisi pour cette étude d'utiliser des journées issues de l'été et l'automne 2015, ces deux saisons permettant d'incorporer un maximum de stations (17 stations urbaines et la station rurale d'Entzheim).

1.2. Spatialisation de l'ICU

L'établissement d'une cartographie de l'ICU permettant une bonne représentativité du phénomène repose sur l'isolement des journées propices à son installation. Celles-ci présentent une fraction d'insolation d'au moins 80%, ainsi qu'une vitesse moyenne de vent inférieure ou égale à 3 m/s et une absence de précipitations. Au nombre de 21 pour la période considérée et l'ensemble des stations, ces journées idéales sont obtenues via les données de la station rurale d'Entzheim. La température horaire de cette dernière est soustraite à celle de la station urbaine considérée afin d'obtenir l'intensité de l'ICU (ΔTur). L'intensité maximale moyenne de l'ICU (ΔTur max moyen) sur les 21 jours est calculée pour chaque station.

Outil visant à la standardisation des zones urbaines, les Local Climate Zones (LCZ) (Stewart & Oke, 2012) permettent ici la spatialisation de l'ICU. Celle-ci est basée sur la mise en place

d'une régression linéaire multiple (MLR) entre le ΔTur max moyen et les paramètres LCZ (Fig.2b) établis par la classification LCZ de l'EMS (Fig.2a) issue des travaux de Montauban (2019).



Paramètres originels de Stewart et Oke (2012)	Paramètres retenus dans la classification LCZ de l'EMS
Sky View Factor (SVF)	Sky View Factor (SVF)
Aspect ratio	/
Building Surface Fraction (BSF)	Building Surface Fraction (BSF)
Impervious Surface Fraction (ISF)	Impervious Surface Fraction (ISF)
Pervious Surface Fraction (PSF)	Pervious Surface Fraction (PSF)
Height of roughness elements	Height of roughness elements
Surface albedo	Surface albedo
Terrain roughness class	/
Surface admittance	/
Anthropogenic heat output	/
	Vegetation Surface Fraction (VgSF)

Figure 2. a) Cartographie LCZ de l'ensemble de l'EMS (Montauban O., 2019) ; b) Paramètres employés pour la classification LCZ de l'EMS comparés à ceux définis par Stewart et Oke (2012).

Afin d'obtenir un $\Delta T_{ur\ max}$ moyen en tout point de l'EMS, plusieurs équations de MLR sont calculées avec le logiciel SAGA GIS à l'aide des valeurs des paramètres LCZ de chaque station. Leur qualité variant fortement en fonction des paramètres introduits en prédicteurs, seule l'équation au coefficient de détermination le plus élevé ($R^2 = 0.71$) a été retenue. Le $\Delta T_{ur\ max}$ moyen calculé pour cette étude dépend ainsi uniquement du BSF (fraction de surface bâtie), de l'ISF (fraction de surface imperméable) et du VgSF (fraction de surface végétale). Il est alors possible d'en calculer une valeur théorique pour chaque polygone LCZ de l'EMS en appliquant l'équation de régression. Un lissage des résultats obtenus est effectué via une moyenne mobile afin d'éviter les transitions trop abruptes entre deux LCZ voisines.

2. Résultats

2.1. Variabilité temporelle de l'ICU strasbourgeois

Concernant la station Kléber, la variabilité saisonnière moyenne de l'ICU (Fig.3a) s'illustre notamment par des valeurs nocturnes plus intenses durant les journées estivales et printanières, ainsi que par une absence totale d'îlot de fraîcheur urbain (IFU) diurne en hiver pouvant s'expliquer par l'émission accrue de chaleur anthropique due au chauffage. Néanmoins, le comportement thermique de l'ICU y conserve une certaine homogénéité inter-saisonnière. Celle-ci ne se retrouve pas pour des stations davantage végétalisées comme le jardin botanique.

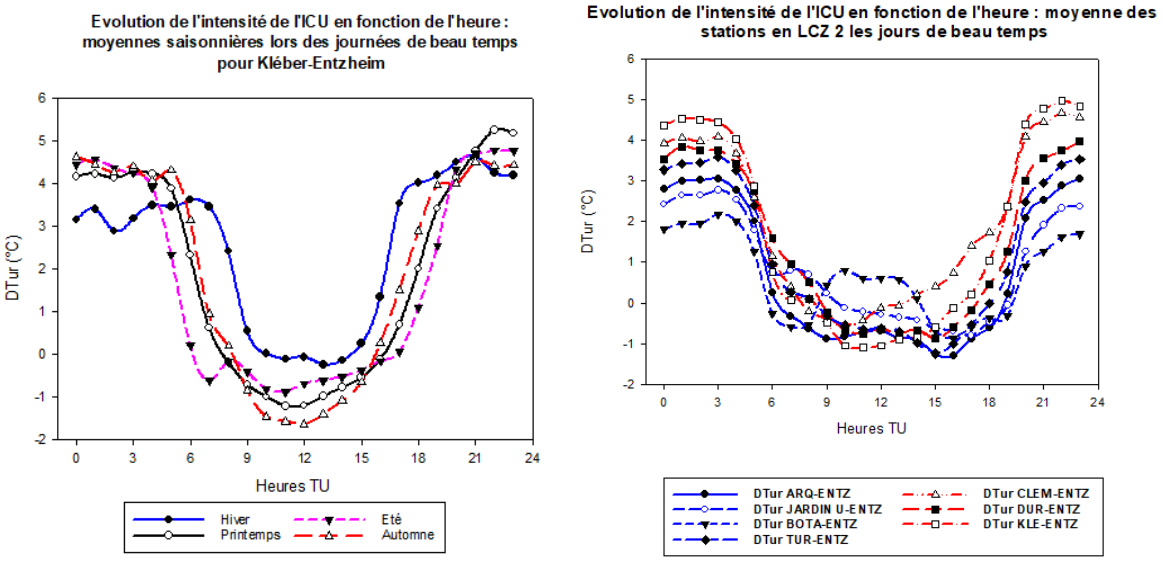


Figure 3. a) Moyennes saisonnières de l'ICU lors des journées de beau temps au niveau de la station Kléber sur la période 2013-2016. b) Moyennes de l'ICU les jours de beau temps au niveau des stations situées au sein de LCZ 2.

L'influence de la végétation sur la variabilité temporelle de l'ICU apparaît très distinctement lors d'une comparaison de stations étant toutes situées au sein d'une LCZ 2 (Fig.3b). Ce type de LCZ est propice à un ICU important du fait de leur configuration géométrique particulière. Or les quatre stations les plus végétalisées (VgSF ≥ 29%, en bleu) présentent non seulement des valeurs nocturnes d'ICU beaucoup plus faibles que celles l'étant moins (en rouge), mais aussi des changements au niveau de l'apparition et de la durée du phénomène d'IFU.

2.2. Mise en évidence par les LCZ du rôle de la végétation et de la géométrie urbaine

Les moyennes du $\Delta T_{ur\ max}$ journalier (Fig.4a) soulignent sans surprise la tendance des LCZ les plus minéralisées et au bâti dense (types 2 et 3) à présenter les valeurs les plus élevées. Afin de mettre en évidence l'effet de mitigation de la végétation sur l'ICU, les quatre stations LCZ 2 les plus végétalisées ont été séparées de celles au profil davantage minéral. Les premières, à proximité ou au profil se rapprochant d'un parc urbain, ont ainsi un $\Delta T_{ur\ max}$ journalier moyen de près de 2°C plus faible que les secondes sur la période étudiée. Ces LCZ 2 végétalisées ont un comportement thermique se rapprochant de ce fait davantage de celui de types au bâti moins dense (LCZ 6 et 8). La végétation apparaît comme étant corrélée avec une baisse de l'ICU maximum journalier (Fig.4b, R^2 = -0.43), y compris dans les LCZ les plus minéralisées.

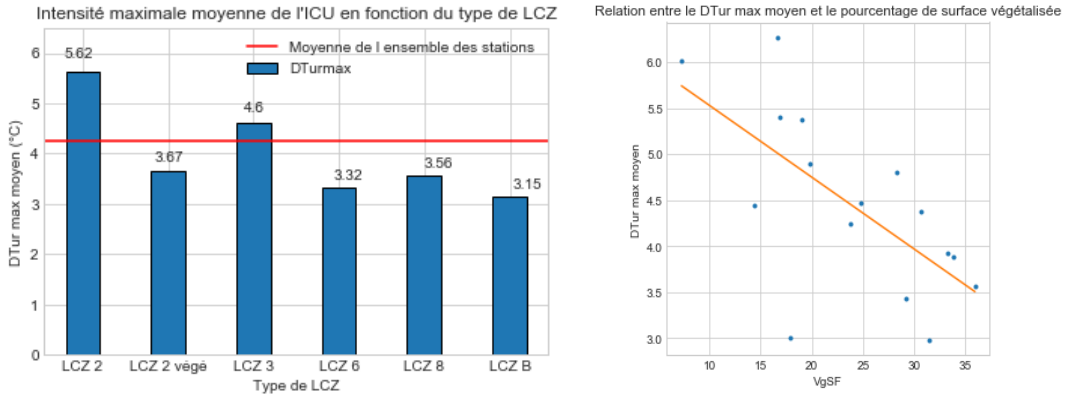


Figure 4. a) ΔTur max moyen journalier en fonction du type de LCZ. b) Corrélation entre ΔTur max moyen et pourcentage de surface végétalisée (VgSF) pour les stations urbaines.

Le rôle de la géométrie urbaine dans la variabilité du $\Delta T_{ur\ max}$ journalier moyen apparaît aussi bien à travers la densité de bâti (différence de comportement thermique entre LCZ 2 et 3 plus compactes et LCZ 6 et 8 plus « ouvertes ») que via la hauteur moyenne des bâtiments (différence entre LCZ 2 à l'effet de canyon urbain plus prononcé que les LCZ 3).

2.3. Cartographie de l'ICU

Obtenue via la méthode décrite précédemment, la cartographie de l'ICU moyen maximum journalier dépend entièrement de la qualité de la MLR et des valeurs prises par les paramètres LCZ sur l'ensemble du territoire. Les résultats permettent une distinction aisée des comportements thermiques de certaines zones urbaines types comme le centre-ville. Or chaque polygone étant doté d'une unique valeur de $\Delta T_{ur\ max}$ moyen, beaucoup de transitions très abruptes (Fig.5b) et très peu réalistes (pouvant aller jusqu'à 8°C de différence) au niveau des limites entre deux LCZ subsistent. Le lissage par moyenne mobile (Fig.5a) atténue de manière notable cet effet. La pertinence de cette cartographie a été éprouvée via la comparaison du $\Delta T_{ur\ max}$ moyen mesuré d'une dix-huitième station urbaine, volontairement non-intégrée dans la MLR, avec celui prédit par la méthode. Le modèle cartographique diffère très peu de la mesure effectuée ($\Delta T_{ur\ max\ cartographie}$ = 4.14°C ; $\Delta T_{ur\ max\ mesuré}$ = 4.38).

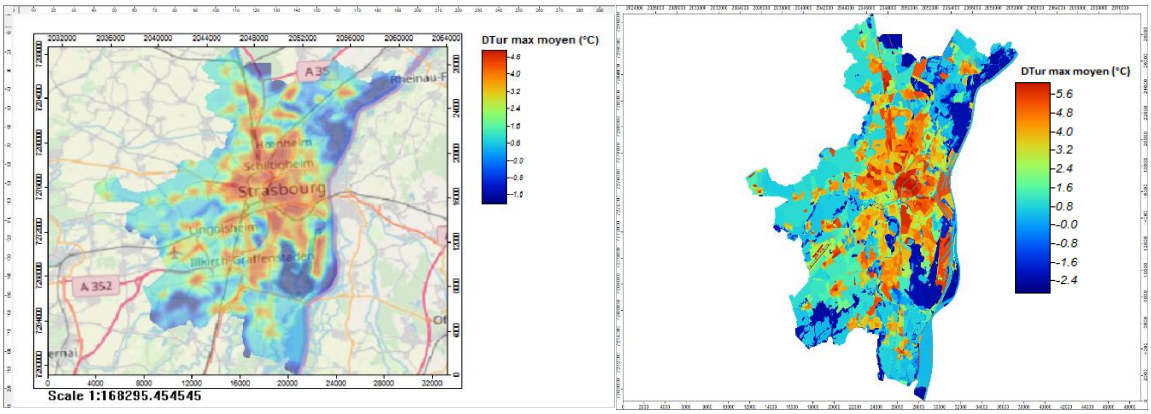


Figure 5. a) Cartographie de l'ICU moyen maximum journalier, avec lissage par moyenne mobile. b) Cartographie originelle de l'ICU moyen maximum journalier, sans lissage.

Conclusion

Cette étude a souligné le fait que les LCZ s'avèrent être un outil pertinent dans l'étude du phénomène d'ICU, tant pour l'analyse statistique que pour une cartographie à l'échelle d'un territoire métropolitain. Celle-ci, basée sur les paramètres d'une classification LCZ, peut représenter une méthode prometteuse, notamment en matière d'estimation de l'intensité du phénomène au niveau de zones non-équipées de stations de mesure. Cependant, elle nécessite de faire l'objet de plusieurs améliorations, notamment en ce qui concerne le paramétrage du lissage par moyenne mobile, et doit passer par une validation plus rigoureuse. Il serait alors possible d'étendre cette méthodologie à d'autres variables climatiques, voire aux indices de confort.

Bibliographie

Andreou E., 2014. The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, 63, 587-596.

Arnfield J. A., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23 (1), 1-26.

Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., & Pullin A. S., 2010. Urban greenings to cool towns and cities a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97 (3), 147-155.

Montauban O., 2019. *Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des Local Climate Zones des quartiers de Strasbourg*. PFE, INSA Strasbourg.

Najjar G., Colin J., Kastendeuch P., Ngao J., Saudreau M., Landes T., Améglio T., Luhahe R., Guillemin S., Schreiner G., Kleinpeter J., Nerry F., 2015. A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of Strasbourg, France. 9th International Conference on Urban Climate, ICUC9, Toulouse, France, 6p.

Spronken-Smith R. A., & Oke T. R., 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), 2085-2104.

Stewart I. D., & Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

Unger J., 2006. Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Climate Research*, 30 (3), 215-226.

Zhao L., Oppenheimer M., Qing Z., Baldwin J. W., Ebi K. L, Bou-Zeid E., Guan K., & Liu X., 2018. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13 (3).

RECONSTITUTION DENDROCHRONOLOGIQUE DES AVALANCHES DE NEIGE ET CONDITIONS SYNOPTIQUES ASSOCIÉES A L'EPISODE AVALANCHEUX MAJEUR DE L'HIVER 2005 DANS LES MONTS MARAMUREŞ (CARPATES ORIENTALES ROUMAINES)

POP O.T.[1], HOLOBÂCĂ I.H.[1], RĂCHITĂ I.G.[1], DECAULNE A.[2], HOTEA M.[1], HORVÁTH C.[1]

1 Laboratoire de Dendrochronologie, Faculté de Géographie, Université Babeş-Bolyai, Cluj-Napoca, Roumanie (olimpiu.pop@ubbcluj.ro)
2 Laboratoire LETG UMR-6554 CNRS, Université de Nantes, Nantes, France

Résumé : *Les avalanches de neige représentent un aléa majeur sur les versants pentus des Monts Maramureş (Carpates Orientales Roumaines), mais reste très peu connu dans ces montagnes. En l'absence des sources documentaires d'information sur l'activité avalancheuse dans le passé, on peut recourir à des sources indirectes d'information, comme par exemple les cernes des arbres. Dans cette étude nous nous proposons de reconstituer l'historique des avalanches de neige majeures à l'aide des méthodes dendrochronologiques et d'analyser les conditions synoptiques qui ont favorisé l'occurrence de l'évènement majeur de l'hiver 2005. Cette approche basée sur les analyses dendrochronologiques couplées aux analyses des scenarios synoptiques associés aux évènements majeurs retrouve son utilité pour les futures études visant à mieux déceler le rôle des facteurs météorologiques influençant le régime des avalanches de neige dans les Carpates Orientales.*

Mots clés : *avalanches de neige ; dendrochronologie ; conditions synoptiques ; Monts Maramureş*

Summary: ***Dendrochronological reconstruction of snow avalanches and synoptic conditions for the 2005 extreme event in Maramureş Mountains (Eastern Carpathians, Romania).*** *Snow avalanches represent a major hazard on the steep slopes of Maramureş Mountains (Eastern Carpathians, Romania) yet it is largely unknown in this area. Giving the lack of documented events, the past snow avalanche activity may be reconstructed from indirect sources of information, as for example the tree rings. In this study we attempt to reconstruct snow avalanche history by dendrochronological methods and to analyze the synoptic weather conditions for the 2005 extreme event. This approach based on dendrochronological analysis coupled with synoptic analyses of the extreme events proved to be useful in deciphering the role of weather conditions on snow avalanches regime in Eastern Carpathians.*

Key words: *snow avalanches; dendrochronology; synoptic weather conditions; Maramureş Mountains*

Introduction

Les avalanches de neige se manifestent partout dans les milieux montagneux là où se réunissent les facteurs climatiques, topographiques et conditions favorables à l'accumulation de la couche de neige, de la déstabilisation et le déplacement rapide de la neige sur les versants. Les Carpates Orientales Roumaines n'y font pas exception, ce phénomène étant présent aussi dans les Monts Maramureş. En l'absence des sources documentaires et d'enregistrements météorologiques, l'activité avalancheuse reste inconnue dans les Monts Maramureş. Afin de connaître la distribution spatiale et temporelle de l'activité avalancheuse du passé, dans les massifs montagneux boisés on peut recourir à l'analyse des sources d'information indirectes, comme par exemple celle des cernes des arbres. Les approches dendrogéomorphologiques ont été largement utilisées pour reconstituer l'activité spatio-temporelle des avalanches dans plusieurs montagnes des zones tempérés du monde (Dubé *et al.*, 2004 ; Butler et Sawyer, 2008 ; Corona *et al*., 2010 ; Casteller *et al.*, 2007 ; Decaulne *et al*., 2012, 2014). Malgré l'avancement évident enregistré sur le plan de l'application des méthodes dendrochronologiques dans divers milieux montagneux du monde, jusqu'à présent ces approches restent peu utilisées dans les Carpates Roumaines où seulement quelques études de ce type ont été récemment conduites (Voiculescu et Onaca, 2014 ; Pop *et al.*, 2016, 2017). Ainsi, dans la présente étude nous nous proposons principalement de reconstituer l'historique des avalanches de neige majeures dans

les Monts Maramureş à l'aide des analyses dendrochronologiques. À partir des évènements majeurs reconstitués grâce à la dendrochronologie, dont l'évènement connu du 2005, nous analysons secondairement les conditions synoptiques qui ont favorisé durant l'hiver 2005, la manifestation des avalanches de neige majeures à l'échelle régionale dans les Carpates Orientales.

1. Données et Méthodes

1.1. Zone d'étude

Les Monts Maramures font partie des Carpates Orientales et sont localisés dans le nord de la Roumanie, tout près de la frontière avec l'Ukraine (Fig.1a). L'altitude maximale est de 1936 m au Pop Ivan et les versants pentus de ces montagnes (Fig.1b) favorisent une activité avalancheuse présente jusqu'à < 1000 m d'altitude. Une forêt mixte feuillus-conifères composée principalement de hêtres (*Fagus sylvatica*), épicéas (*Picea abies* (L.) Karst.) et sapin (*Abies alba* Mill.) couvre les versants. A l'intérieur du Parc Naturel des Monts Maramureş, la zone d'étude fait partie d'une réserve naturelle bénéficiant d'un régime de protection stricte de la forêt. Seulement les activités touristiques (randonnées) et le pastoralisme sont permis à l'intérieur de ce site protégé.

a) b)

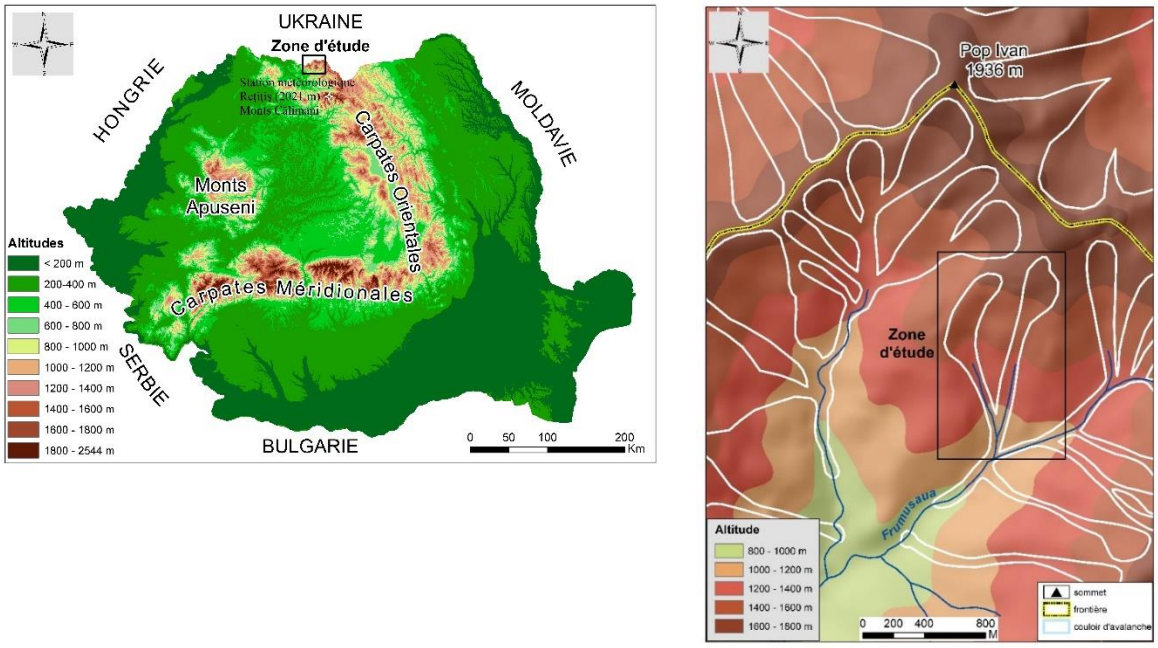


Figure 1. a) Localisation de la zone d'étude et b) du couloir d'avalanches choisi pour les investigations dendrochronologiques

1.2. Analyses dendrochronologiques

Les méthodes dendrochronologiques appliquées à l'étude des avalanches de neige se basent sur l'analyse des anomalies de croissance conservées dans les cernes des arbres et qui s'y sont formées en réponse à l'impact mécanique exercé par les avalanches de neige sur les arbres. La position spatiale des arbres perturbés et l'année de l'évènement enregistrée dans la structure anatomique des cernes servent pour reconstituer au pas de temps annuel, l'extension spatiale et la fréquence des évènements avalancheux sur la période 1960-2017. Un couloir d'avalanche localisé à l'intérieur de la réserve naturelle, loin de toute intervention anthropique qui pourrait perturber les arbres et fausser les résultats de l'analyse a été choisi (Fig.2).

Le long de ce couloir d'avalanche, des arbres vivants montrant à l'extérieur des signes évidents de perturbations causées par les avalanches de neige ont été repérés, leur position spatiale étant déterminée en utilisant un GPS portable. Des échantillons (carottes et rondelles) ont été prélevés sur 52 arbres, dont 20 hêtres (*Fagus sylvatica*), 18 épicéas (*Picea abies* (L.) Karst.) et 14 sapins (*Abies alba* Mill.). Pour compléter, des arbres localisés à l'extérieur du couloir et n'ayant pas subi des perturbations causées par les avalanches de neige ont été échantillonnés (15 arbres pour chacune des 3 espèces mentionnées), afin de construire la courbe de référence locale spécifique pour chaque espèce.

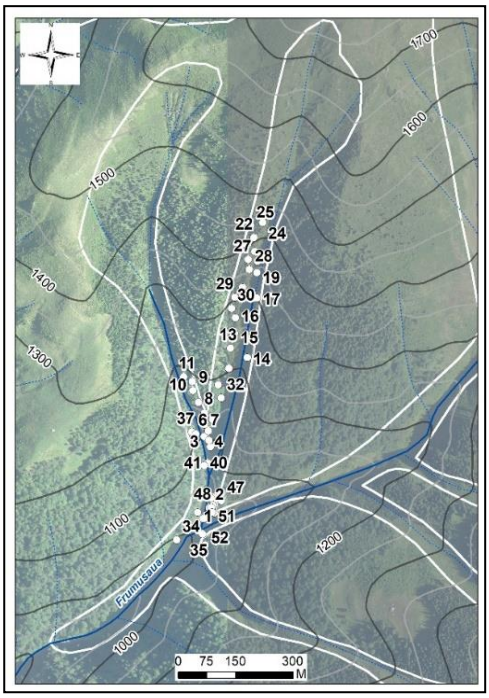


Figure 2. Localisation des arbres échantillonnés à l'intérieur du couloir d'avalanches

En laboratoire, après le séchage et ponçage des échantillons, le comptage et les mesures de la largeur des cernes a été réalisé à l'aide du système LINTAB 5 composé d'une table de mesures et du microscope Leica DMS 1000 connectés à l'ordinateur avec le logiciel TSAP Win Scientific (RINNTECH, 2020). Les séries de croissance de chacun des arbres perturbés ont été ensuite comparés avec les courbes de référence, afin de corriger les cernes manquants, ainsi que d'exclure d'autres anomalies possibles causées par les conditions climatiques, attaques d'insectes, etc. dans les cernes des arbres perturbés. Les anomalies de croissance formées à l'intérieur des cernes en réponse aux perturbations mécaniques produites par les avalanches de neige ont été identifiées et ont servi pour reconstituer des années-évènements majeurs. Ces anomalies de croissance, telles que détaillées dans Astrade *et al*. (2012) incluent les cicatrices d'impact, les rangées de canaux résinifères traumatiques et le bois de compression dans le cas des conifères, ainsi que le début des séries de cernes anormalement étroits. Un indice de l'activité avalancheuse (*Avalanche Activity Index - AAI*) a été calculé pour chacun des année-évènement reconstitué, prenant en compte le nombre d'arbres perturbés avec des réponses anatomiques liées à l'activité des avalanches de neige dans une année particulière et le nombre d'arbres échantillonnés vivant cette année, selon la formule proposée par Shroder (1978) :

$$AAI = (\Sigma in= 1Rt / \Sigma in= 1At) \times 100\%$$

où (R) représente le nombre d'arbres avec des anomalies de croissance dans le cerne d'une année spécifique ; (t) est l'année-évènement ; et (A) indique le nombre total des arbres vivant dans l'année (t). Un seuil d'AAI supérieur ou égal à 10% et un nombre minimum de 3 arbres perturbés pour une année spécifique ont été pris en considération pour reconstituer les années-évènements. Le seuil minimum de 10% pour l'AAI est considéré représentatif pour reconstituer les évènements dans un couloir d'avalanche d'après Dubé *et al*. (2004) et Reardon *et al*. (2008).

1.3. Analyse des conditions météorologiques lors de l'épisode avalancheux de 2005

A l'échelle régionale, l'analyse des conditions synoptiques pour les avalanches de neige au cours de l'hiver 2005 a été restreinte à la période allant du 10 au 20 mars, étant donné la plus grande fréquence des avalanches de neige sur cette période comme documenté dans les

Carpates Méridionales (Pop *et al.* 2017). Pour l'analyse synoptique nous avons utilisé les cartes de géopotentiel disponibles sur le site wetterzentrale.de. Les séries journalières de températures et précipitation enregistrées à la station météorologique Reţiţiş (localisée à une altitude de 2021 m sur la crête des Monts Călimani située à quelques dizaines de kilomètre de distance au SE des Monts Maramureş) ont été utilisées pour analyser le rôle des conditions météorologiques au niveau local.

2. Résultats

2.1. Reconstitution des événements avalanche

Au moins 12 évènements avalanche de neige ont pu être ainsi reconstitués sur la période 1960-2017 comme l'indique la chronologie des évènements reconstitués à l'aide de l'analyse dendrochronologique la figure 3 (nombre d'années avec un AAI supérieur à 10%). D'autres événements probables pendant ou antérieurs à cette période ont été identifiés dans les cernes des arbres, mais à cause d'un nombre réduit d'arbres perturbés (< 3 arbres) ou d'un AAI<10%, ces évènements n'ont pas été inclus dans la chronologie reconstituée. Sur ces 12 évènements, 10 se sont produits pendant la période 1990-2017 et seulement 2 avant1990.

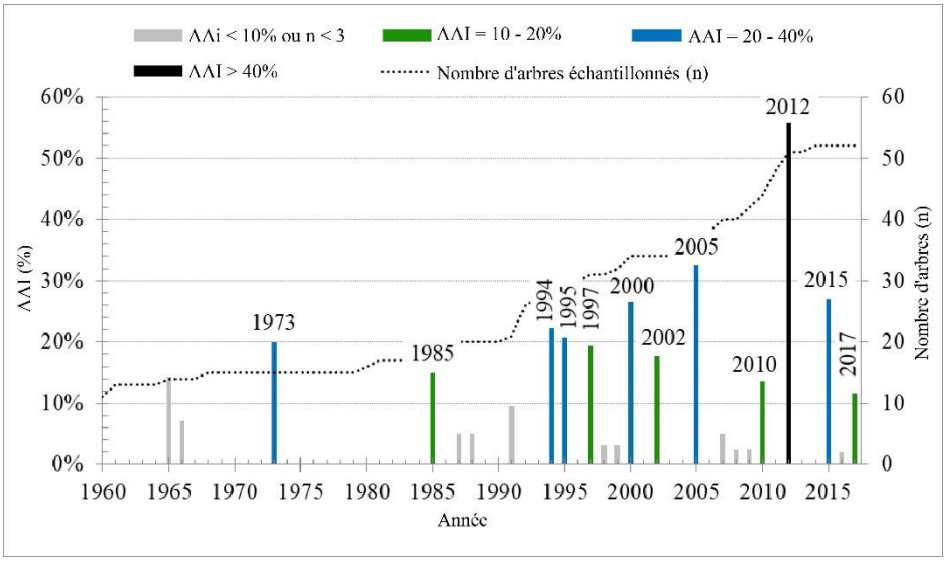
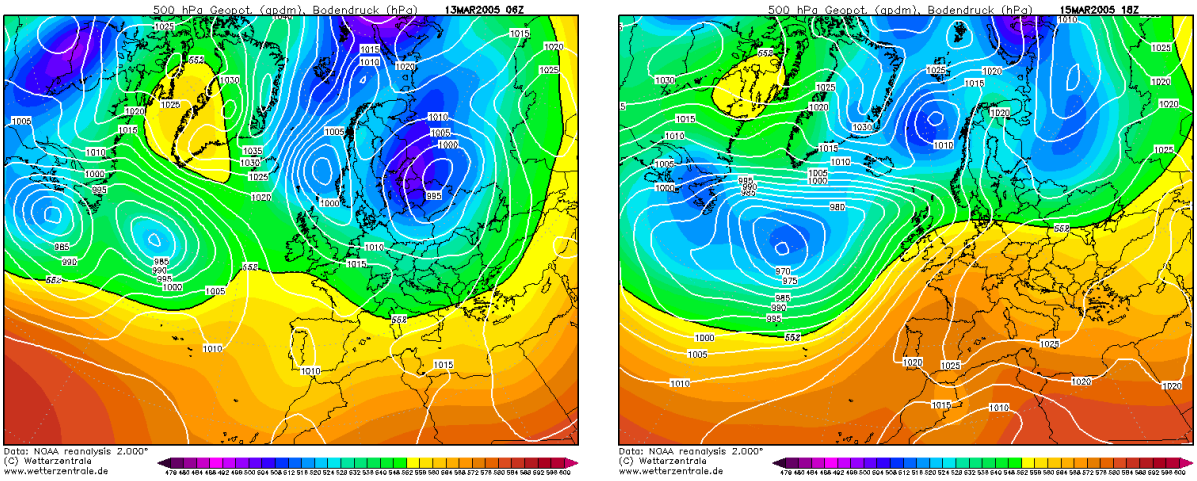


Figure 3. Reconstitution des évènements avalanche de neige sur la période 1960-2017

2.2. Conditions météorologiques associées à l'avalanche de 2005

Un événement majeur d'avalanche de grande amplitude a été documenté pour le 15 mars 2005 dans les Carpates Méridionales (Pop *et al.*, 2017). Les avalanches de neige semblent avoir été favorisées par des conditions météorologiques caractérisées par des alternances soudaines entre des épisodes journaliers froids et chauds, précédés de précipitations relativement élevées qui ont probablement affecté la microstructure de la neige en haute altitude. Dans notre cas, une circulation méridienne engendrée par un talweg d'altitude en direction de la Péninsule Balkanique (Fig.4a) a importé d'importantes chutes de neige sur la région. Une circulation plus zonale avec de l'air polaire maritime plus chaud et humide provenant de l'Atlantique Nord lui a succédé (Fig.4b), entrainant une augmentation de 11,3°C dans la troposphère moyenne (environ 5000 m) passant de -33°C le 11 mars 2005 à -22°C le 17 mars 2005 (données fournies par Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado, http://www.esrl.noaa.gov/psd/).



a) b)

Figure 4. Géopotentiel (500hPa) et la pression atmosphérique du a) 13 et b) 15 mars 2005. Source www.wetterzentrale.de

La variabilité des conditions météorologiques (de températures et de précipitations) durant le mois de mars 2005 est présentée en Figure 5. Une augmentation rapide de la température (24° C) passant de -23,8 °C le 11 à -4,3°C le 17 mars pour les températures minimales et de -17,8 °C le 11 à 0°C le 17 mars pour les températures maximales) après d'importantes chutes de neige (15 mm) les 12 et 13 mars sont associés au changement rapide de la circulation atmosphérique en altitude (Fig.4) et semble avoir favorisé l'occurrence de l'évènement majeur en mars 2005 dans les Monts Maramureş.

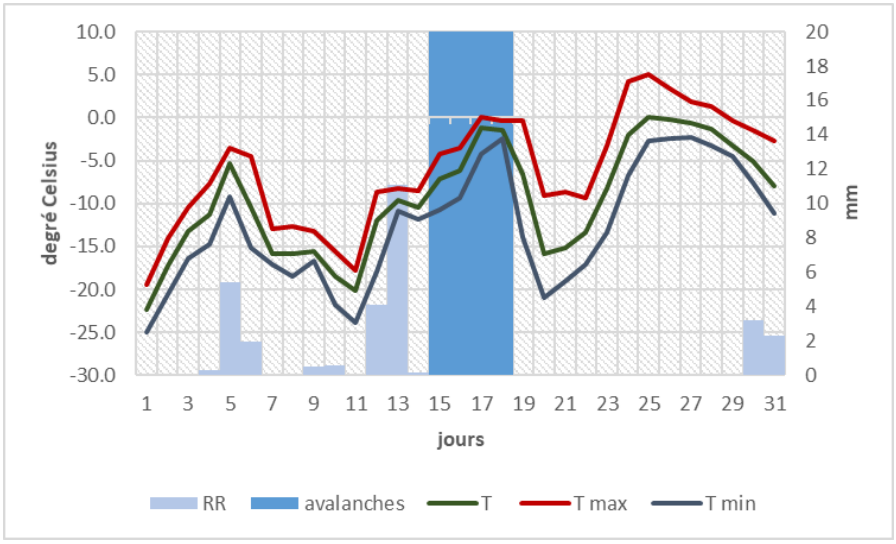


Figure 5. Températures moyenne (T), minimale (Tmin) et maximale (Tmax) et précipitations (RR) au mois de mars 2005 à la station météorologique Reţiţiş (2021 m) – et repérage (en bleu) de la période d'occurrence des avalanches majeures.

Conclusion

Dans cette étude, à l'aide de la dendrochronologie nous avons reconstitué l'activité des avalanches de neige dans les Monts Maramures (Carpates Orientales, Roumanie) pour la période 1960-2017. Au moins 12 évènements majeurs considérés certains ont été ainsi reconstitués. Mais cette chronologie n'inclut qu'un nombre minimum d'évènements reconstitués, étant donné certaines limites d'application des méthodes dendrochronologiques.

L'analyse des conditions météorologiques qui ont précédé la manifestation de l'avalanche majeure du 15 mars 2005 a permis d'identifier des alternances soudaines dans la circulation atmosphérique en altitude au-dessus des Balkans générant localement dans les Monts Maramureş des précipitations neigeuses élevées, suivies d'une augmentation rapide de la température. Ce fort écart thermique enregistré sur une courte période après de fortes précipitations semblerait avoir joué un rôle favorable au déclenchement des avalanches.

Cette approche basée sur les reconstitutions dendrochronologiques couplées à l'analyse de l'enchaînement des conditions synoptiques et associées aux évènements majeurs d'avalanche dégage de l'intérêt pour de futures études visant à mieux déceler le rôle de différents facteurs météorologiques intervenant dans le déclenchement des avalanches de neige.

Remerciements

Ce travail contribue au projet de recherche « ACTIVNEIGE - Activité des avalanches de neige dans les Carpates Orientales Roumaines et Ukrainiennes » financé conjointement par l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) et le Ministère pour la Recherche et l'Innovation de Roumanie (MRI) à travers l'Institut Roumain de Physique Atomique (IFA) Bucharest.

Bibliographie

Astrade L., Stoffel M., Corona C., Lopez-Saez J., 2010. L'utilisation des cernes de croissance des arbres pour l'étude des événements et des changements morphologiques : intérêts, méthodes et apports des recherches alpines à la dendrogéomorphologie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 18 (3), 39-60.

Butler D.R., Sawyer C.F., 2008. Dendrogeomorphology and high-magnitude snow-avalanches: a review and case study. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 8, 303-309.

Casteller A., Stockli V., Villalba R., Mayer A.C., 2007. An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 39, 218-228.

Corona C., Rovéra G., Lopez-Saez J., Stoffel M., Perfettini P., 2010. Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Jean Jeanne avalanche talus, Massif de l'Oisans, France. *Catena*, 83, 107-118.

Decaulne A, Eggertsson Ó, Sæmundsson Þ., 2012. A first dendrogeomorphologic approach of snow avalanche magnitude-frequency in Northern Iceland. *Geomorphology*, 167/168, 35-44.

Decaulne A, Eggertsson Ó, Laute K, Beylich A, 2014. A 100-year extreme snow avalanche record based on tree-ring research in upper Bødalen, inner Nordfjord, western Norway. *Geomorphology*, 218, 3-15.

Dubé S., Filion, L., Hétu B., 2004. Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36, 555-564.

Pop O.T., Gavrilă I.G., Roşian G., Meseşan F., Decaulne A., Holobâcă I.H., Anghel T., 2016. A century-long snow avalanche chronology reconstructed from tree-rings in Parâng Mountains (Southern Carpathians, Romania). *Quaternary International*, 415, 430-440.

Pop O.T., Munteanu A., Meseşan F., Gavrilă I.-G., Timofte C., Holobâcă I.H., 2017. Tree-ring-based reconstruction of high-magnitude snow avalanches in Piatra Craiului Mountains (Southern Carpathians, Romania), *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100 (2), 99-115.

Reardon B.A., Pederson G.T., Caruso C.J., Fagre D.B., 2008. Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic and Alpine Research,* 40, 148–160.

RINNTECH, 20120. Technology for tree and wood analysis.URL: http://www.rinntech.de

Voiculescu M., Onaca A., 2014. Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using dendrogeomorphological approach in Bucegi Mountains, Romanian Carpathians. *Cold Regions Science and Technology*, 104/105, 63-75.

Shroder J.F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass-movement, table Cliff Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9, 168-185.

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THERMAL CONDITIONS FOR GROWING VINEYARDS IN STRUMA VALLEY

POPOV H.

Department of Climatology, Hydrology and Geomorphology, Sofia University St. Kliment Ohridski, Sofia, Bulgaria (hpopov@gea.uni-sofia.bg)

Summary: *Thermal conditions are a major factor in classifying agro-climatic conditions and choosing to cultivate varieties of crops on a given territory. In this research are used the average temperature for the warm half-year (April-October), periods with a temperature> 10 ºC and thermal sums> 10 ºC during the growing season. The chronological changes of this indicator for the last 67 years, as well as the possibilities for cultivation of different wine varieties characteristic of well-known wine-growing regions. Research from these areas on the thermal requirements of known varieties of vines was used to characterize the conditions of the Struma Valley. The results show that with temperature rises, the conditions for growing warmer varieties also appear in more northern areas with a colder climate for which the vineyard is not a typical crop.*

Key words: *climate; thermal conditions; growing period; vineyards; Struma Valley*

Résumé : *Influence du changement climatique sur les conditions thermiques pour la culture de la vigne dans la Vallée de Struma.* *La température de l'air est un facteur majeur pour la classification des conditions agro-climatiques et le choix des variétés de cépage sur un territoire donné. Dans cette recherche, plusieurs indicateurs thermiques ont été calculés : la température moyenne durant la saison végétative (avril-octobre), les périodes avec une température >10 ºC et les sommes thermiques >10 ºC durant la saison végétative. L'analyse de l'évolution de cet indicateur en lien avec les possibilités de culture de différents cépages a été réalisée sur les 67 dernières années. Le lien entre ces indicateurs thermiques et les différents types de cépage a été réalisée pour le secteur de la vallée de Struma en Bulgarie. Les résultats ont montré que l'augmentation des indices thermiques sont favorables pour la culture de la vigne notamment dans les secteurs septentrionaux qui jusqu'à maintenant n'était pas une région traditionnelle pour la culture de la vigne.*

Mots clés : *climat ; conditions thermiques ; période de croissance ; vignobles ; vallée de Struma*

Introduction

Changing the temperature of the air in the ground layer of the atmosphere and other climatic characteristics in different regions of the world is one of the most developed topics after the second half of the XX century. In recent decades, they have focused on climate change in the world and in different regions, and in particular on the possible consequences of these changes. The main objective of the research is the adaptation of natural and socio-economic systems to these climate changes. One of the practical areas in climatology is research on the relationship between climate variability and crop productivity. Viticulture is one of the key agricultural sectors developed in countries with subtropical and temperate climates.

The Struma Valley is located meridionally, in the central part of the Balkan Peninsula, in Southeastern Europe. It is surrounded by the highest mountains of the Peninsula. In the Struma Valley are located a large part of the agricultural territories of the largest region in Bulgaria (Fig.1). Many of these lands are used for growing vineyards, with an increase in their area over the last 10 years. The southern parts of the study area are affected by the climatic influence of the Mediterranean. This allows the cultivation of middle and late vine varieties. Some of these varieties are grown only in this part of the country and are not known in the world markets – Kerazuda, Muscat Sandanski (white wine varieties), Shiroka Melnishka, Rubin, Ranna Melnishka-Melnik 55 (red). In the northern parts, the climate is continental. Here are grown middle-early varieties that are better known, such as Chardonnay and Sauvignon Blanc (EAVW 2019, MAFF2015).

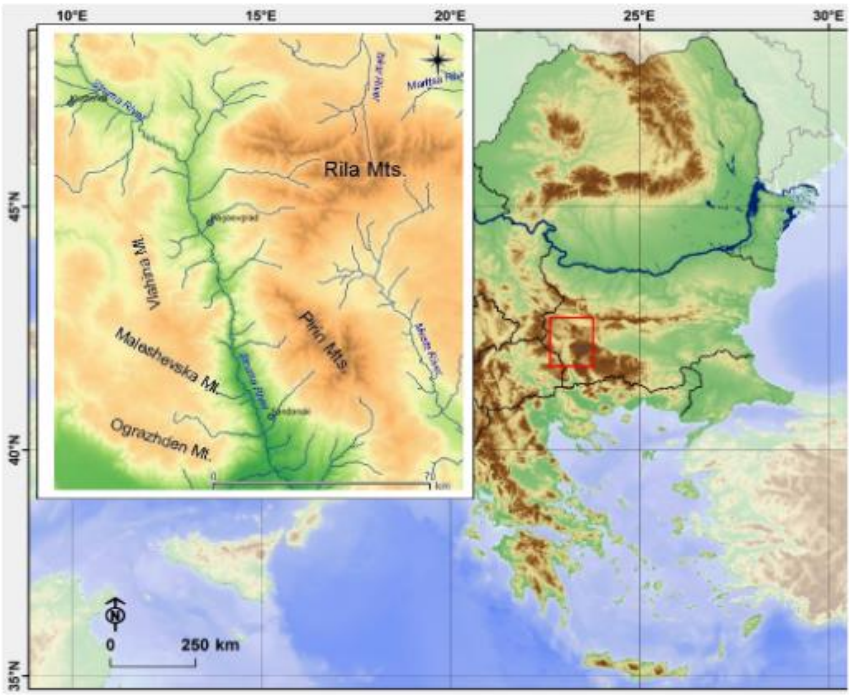


Figure 1. Map of study area

1. Data and Methods

In this research are used monthly temperatures from meteorological stations positioned in Struma Valley. From these data are calculated average temperatures about growing season period for different vineyards varieties, which is from April to October for North Hemisphere (Fig.2) (Jones 2006). These data are used also to calculate continuation of the growing season period (with temperature above 10 ºC) which is main indicator in agroclimatology. Medium early varieties are need between 155 and 175 days with average temperatures above 10 ºC and temperatures sum for this period 3600 ºC (Hershkovich 1960). Monthly temperatures are used to calculate temperatures sum for growing season. Earlier studies have been used to investigate the thermal conditions necessary for the development of viticulture (Georgiev 2005, Kiryakov *et al*. 1971). Van Leeuwen *et al*. (2013) in their study revealed, these indices calculated mainly on the basis of temperature change may be inaccurate. This should be checked for each individual region, and the data from the indices compared to those from the actual measurements

Table 1. Cumulative temperature sums from the stage of vegetation beginning to the physiological maturity for different groups vineyards (Source: Kiriakov *et al*., 1971)

Group varieties	temperature sum
Very early variety	2100-2500
Early variety	2500-2900
Medium early variety	2900-3300
Late ripening variety	3300-3700
Very late ripening variety	Over 3700

Table 2. Bonitation index scale with climate component, based on cumulative temperature sums over 10 ºC for early, mid-early and moderately late groups of vineyards (Source: Georgiev, 2005)

temperature sum	Early variety	Mid-early variety	Moderately late variety
Over 3700	1	1	1
3500-3700	1	1	0.9
3300-3500	1	0.7	0.5
3100-3300	1	0.4	0.2
2900-3100	0.9	0.2	0
2700-2900	0.7	0	0

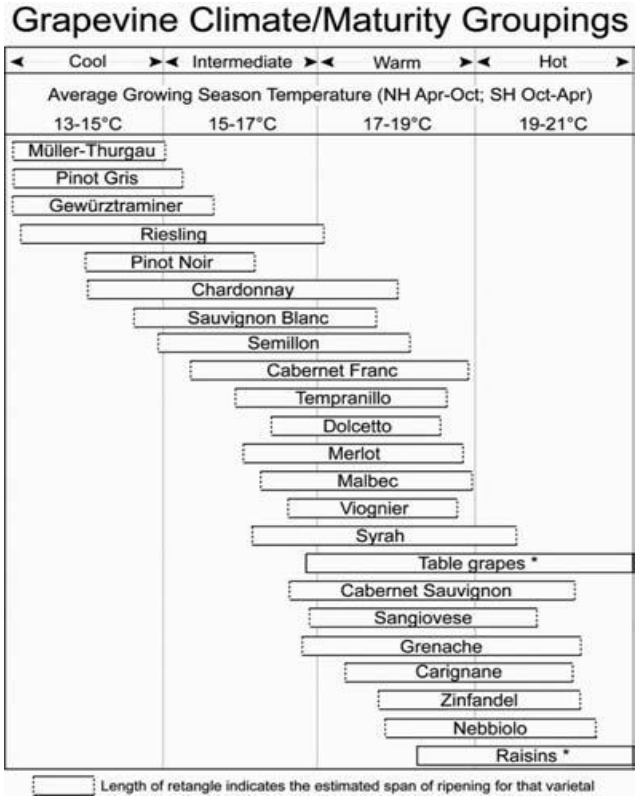


Figure 2. Climate-maturity groupings based on relationships between phenological requirements and growing season average temperatures for high to premium quality wine production in the world's benchmark regions for many of the world's most common cultivars. The dashed line at the end of the bars indicates that some adjustments may occur as more data become available, but changes of more than ±0.2 – 0.5°C are highly unlikely. (Source: Jones, G.V., 2006)

2. Results

Used indicators produce results that have a common tendency. The minimum and maximum values in the graphs are slightly different.

The tendency is average growing season temperatures to increase. This increasing temperature lead to longer growing period with larger temperatures sums. The south part of study area, near Sandanski is with growing season average temperature between 19 and 22 ºC. This part of the valley is in "hot" climate area with good conditions for cultivation of moderately late and late varieties - Cabernet Sauvignon, Sangiovese, Grenache, Nebbiolo. These conditions also are good for some unfamous for the world local varieties – Rubin, Shiroka Melnishka, Ranna Melnishka, Kerazuda, Muscat Sandanski. The northern part of study area near

Kyustendil field, according to the average temperature indicator for the period April-October, the climate is change from "intermediate" to "warm" and is suitable for growing early and mid-early varieties of vineyards – Gewurztraminer, Pino Noir, Chardonnay, Sauvignon Blanc. According to this indicator the worst conditions for viticulture yields are in the middle 70's. The best conditions are on 1994, 2001 and 2012 (Fig.3).

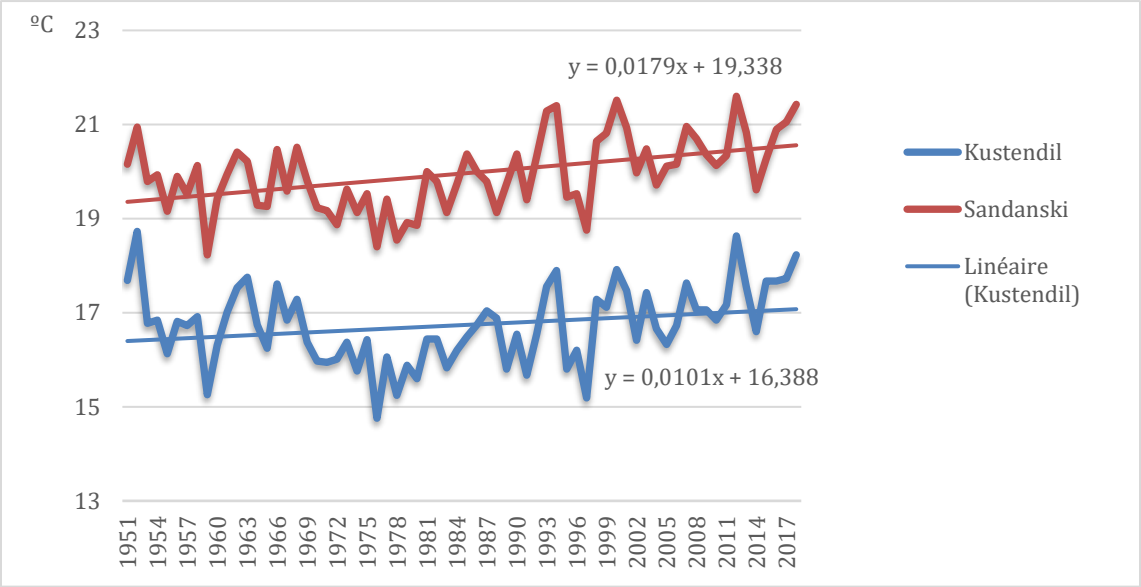


Figure 3. Changes in average temperature (°C) for the warm half-year (April-October)

Continuation of growing season (with temperature at least 10 ºC) is between at least 180 for northern part and 210 days for southern part of study area. For the last 20 years (after 1999) growing season become longer with at least 187 days in Kyustendil field and 220 days in Sandanski field. This continuation of growing period is enough for most of the viticulture varieties. According to this indicator the worst conditions for viticulture yields are on 1997 when summer was cool. The best conditions are on 1992, 2002 and 2016 (Fig.4).

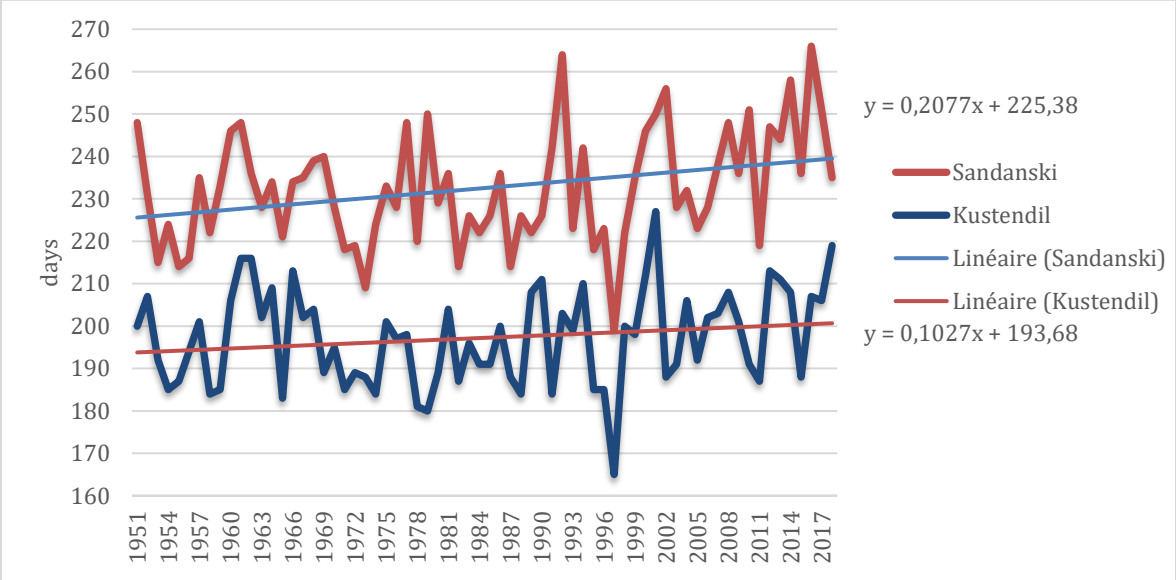


Figure 4. Changes of duration of a period (in days) with an air temperature above 10 ºC in Struma valley

Temperatures sums are between 3000ºC for northern part in Kyustendil field and 4000 ºC in Sandanski field. For the last 20 years (after 1999) temperature sums are increase between 3200 ºC ºC for northern part and 4400 ºC southern part of study area. For the last 10 years (after

2009) in northern part temperatures sums continue to increase till at least 3400 ºC. This means that even Moderately late varieties, like Merlot and Cabernet franc could produce a good harvest in that north situated area. According to this indicator the worst conditions for viticulture yields are on 1997, but in the middle 70's there are close values. The best conditions are on 1994, 2001, 2012 and 2017 (Fig.5).

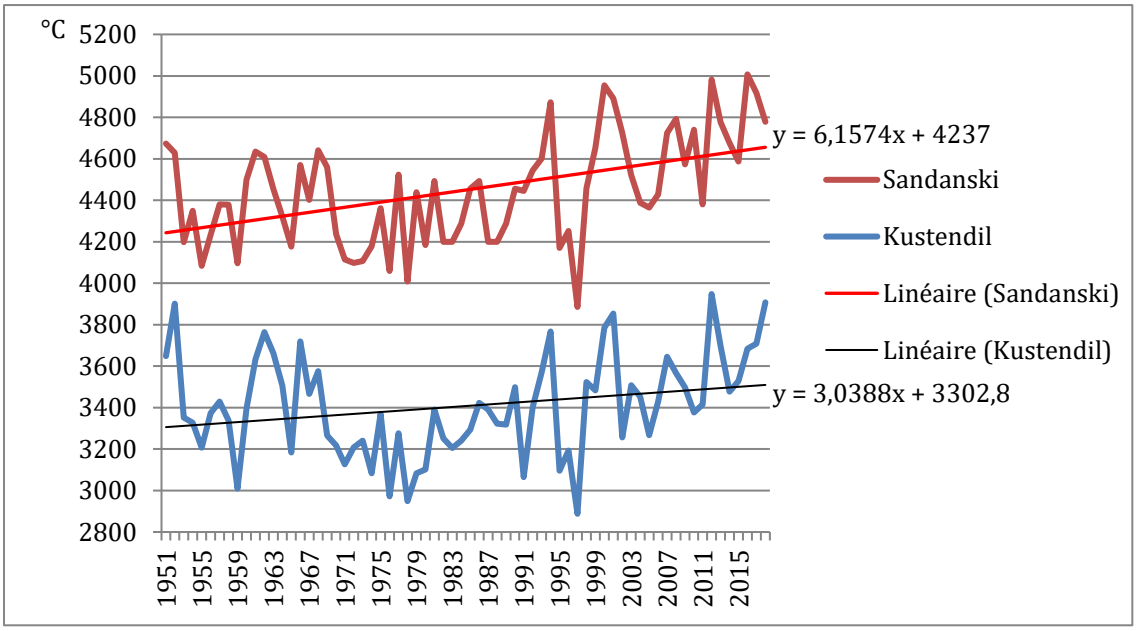


Figure 5. Changes in temperature sums (°C) raised for air temperature above 10 ºC (active vegetation period)

Conclusions and Discussion

The Results show that with temperature rises, the conditions for growing medium early and late varieties also appear in more northern areas with a colder climate for which the vineyard is not a typical crop. the grape yield in that north region of the study area is not secured for every year. The conditions in the area of the Struma Valley, northern than Kresna, are very suitable for cultivating Chardonnay and Sauvignon Blanc. Chardonnay arches in the area are planted on the land of the village of Smochevo. The north part of study area near Kyustendil field, according to the average temperature indicator for the period April-October, the climate is change and improve from "intermediate" up to "warm" and is suitable for growing early and mid-early varieties of vineyards. Continuation of growing season is enough long for mid-early varieties (Hershkovich 1960). The condition in southern part of the area allowed to be cultivated late and very late varieties like Shiroka Melnishka. This variety is not resistant against cold and need temperature sums above 4000 ºC. This is a reason in these areas to be developed some hybrid varieties which growing well and have good productivity. Variety Rubin is hybrid between Nebbiolo and Syrah. Ranna Melnishka is another variety which is hybrid between Shiroka melnishka and Valdiguie. Another hybrid called Muscat Sandanski include Shiroka Melnishka, Cabernet Sauvignon and Tamyanka (more famous like Muscat de Frontignan, Muskat blanc a petits grains, Muskat roze a petits grains (France), Muscato di Canelli (Italy), Tamaioasa (Romania). All these varieties are cultivating in the south part of Struma valley in Sandanski field and usually produce good yield.

Thermal indices which use month temperature are very useful, but don't reveal the whole specter of conditions needed to growing vineyards and produce good yield. If include daily values, indices which include precipitation and extreme events could be possible to reveal the whole complex of conditions needed for growing vineyards. Further research in study area are towards to reveal that conditions. To applicate in practice our results we established contact

with some local producers and made agreements to install automatic weather stations in their vineyards.

Literature

Executive agency on vine and wine in Bulgaria (EAVW), 2019. URL: http://www.eavw.com/updocs/0620011578307380_klasifikaciya%20sortive%202019.pdf

Georgiev B., 2005. Applied soil science. Sofia. (in Bulgarian)

Herskovich E., 1960. Agroclimatic zoning of the vine, *Regionalization of viticulture in Bulgaria*. Tp. ACH, III.

Jones G.V., Reid R. & Vilks A., 2012. Climate, Grapes and Wine: Structure and Suitability in a Variable and Changing Climate pp.109–133. *The Geography of Wine: Regions, Terroir and Techniques*. Ed: Dougherty, P. Springer Press, p.255.

Jones G.V. & Webb L.B., 2010. Climate change, viticulture and wine: challenges and opportunities, *Journal of Wine Research*, Vol. 21, No. 2, 103–106.

Jones G.V., 2007. Climate Change and the global wine industry. *Proceedings from the 13th Australian Wine Industry Technical Conference*, Adelaide, Australia.

Jones G.V., 2006. Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine and Terroir – The Geoscience Perspective*, Macqueen, R.W. and Meinert, L. D. Eds.: Geoscience Canada Reprint Series Number 9, Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland, p.247.

Jones G.V., White M.A., Cooper O.R. & Storchmann K., 2005. Climate change and global wine quality, *Climatic Change*, Vol. 73, No. 3, 319–343.

Kiryakov K., Todorov T., Draganov D., 1971. *Agricultural Meteorology and Climatology*, ed. Hristo Danov, Plovdiv, (in Bulgarian).

Ministry of agriculture, food and forestry (MAFF). 2015. Vineyards Basic Survey – Bulgaria. URL: httpswww.mzh.government.bg/media/filer_public/2018/02/22/ra318-publicationvineyard2015.pdf

Van Leeuwen C., *et al*., 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(33), E3051-E3052.

VULNERABILITE DES MANGROVES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS DEUX VILLES COTIERES DE L'OUEST DE MADAGASCAR

RANAIVOJAONA S.B.[1,2], TSIAVAHANANAHARY T.J.[1], RANARIJAONA H.L.T.[1]

1 Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement, Université de Mahajanga, Mahajanga Madagascar (ranaivojaona.sariaka@gmail.com)
2 Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels, Université de Mahajanga, Mahajanga, Madagascar

Résumé : *A Madagascar comme ailleurs, les zones côtières à mangroves sont touchées par les effets du changement climatique. La présente étude donne un aperçu sur la situation écologique des mangroves des villes de Mahajanga et Morondava, face à ce fléau, tout en présentant les impacts constatés. Les méthodes sont essentiellement basées sur des analyses climatiques, écologiques et sociales. Le dérèglement climatique influence les conditions environnementales des mangroves, notamment la dégradation du substrat. L'analyse climatique de 1991 à 2016 montre une baisse des précipitations, ce qui entraîne la salinisation, amplifiant la mortalité des palétuviers. Par ailleurs, de fortes pluies occasionnées par les perturbations cycloniques rendent les palétuviers ainsi que la population vulnérables aux inondations. Les projections climatiques de 2020 à 2099 du scénario RCP4.5 reflètent une tendance à la hausse des températures tandis qu'une tendance à la baisse est simulée pour les précipitations.*

Mots clés : *Mangroves ; Mahajanga et Morondava ; écologie ; changement climatique ; projection climatique*

Summary: ***Mangroves vulnerability to climate change in two coastal cities in western Madagascar.*** *In Madagascar as elsewhere, coastal mangroves areas are affected by the effects of climate change. This study provides an overview of the ecological situation of mangroves in Mahajanga and Morondava cities to climate change, by presenting the observed impacts. The methods are essentially based on climatic, ecological and social analyzes. Climate change influences the environmental conditions of mangroves, especially the substrate's degradation. Climate analysis from 1991 to 2016 shows a drop in precipitation which leads to salinization increasing the mortality of mangrove wood. Otherwise, heavy rains caused by cyclonic disturbance affect mangroves and population to floods. Climate projection from 2020 to 2099 of the scenario RCP4.5 reflect an upward trend of temperature towards a drop to precipitation.*

Key words: *Mangroves; Mahajanga and Morondava; ecology; climate change; climate projection*

Introduction

Madagascar possède la plus importante surface de mangroves dans l'Océan Indien occidental, avec une superficie estimée à 213 000 hectares (Spalding *et al.*, 2010 ; Jones *et al.*, 2016). La mangrove, une formation forestière caractéristique des zones de balancement des marées, fournit d'innombrables biens et services, entre autres, la protection des littoraux et la séquestration de carbone. Néanmoins, la disparition alarmante des mangroves a été signalée. La croissance urbaine et l'expansion des infrastructures se traduisent par l'extension des villes dans les zones humides, notamment les mangroves. Ces dernières sont ainsi confondues au paysage urbain. En outre, ces écosystèmes ne sont pas épargnés par les effets du changement climatique. L'inondation prolongée due à l'augmentation du niveau de la mer, la fréquence des aléas climatiques comme les cyclones constituent une menace non négligeable. Les mangroves de Madagascar se trouvant majoritairement sur la côte occidentale, les mangroves des villes de Mahajanga et de Morondava sont étudiées. L'objet de l'étude est de déterminer la situation écologique de ces mangroves face au changement climatique.

1. Méthodologie

1.1. Sites d'étude

Le premier site cible la ville de Mahajanga, située sur la côte Nord-ouest de Madagascar, au bord de l'estuaire de Betsiboka. Cette ville qui appartient à la Région Boeny, est limitée au

Nord et à l'Est par le District de Mahajanga II, à l'Ouest par le Canal de Mozambique et au Sud par la Baie de Bombetoka. Localisée entre 15°41' de latitude Sud et 46°20' de longitude Est, Mahajanga est composée de 26 quartiers et s'étend sur une superficie de 57 km^2 (Fig.1). La ville de Morondava, située au centre Ouest de Madagascar, constitue le second site qui se trouve entre 20°18' de latitude Sud et 44°16' de longitude Est. Cette ville côtière comprend 17 quartiers, est fondée sur un cordon lagunaire du fleuve du même nom et s'étend sur une superficie de 46,221 km^2 (Fig.1).

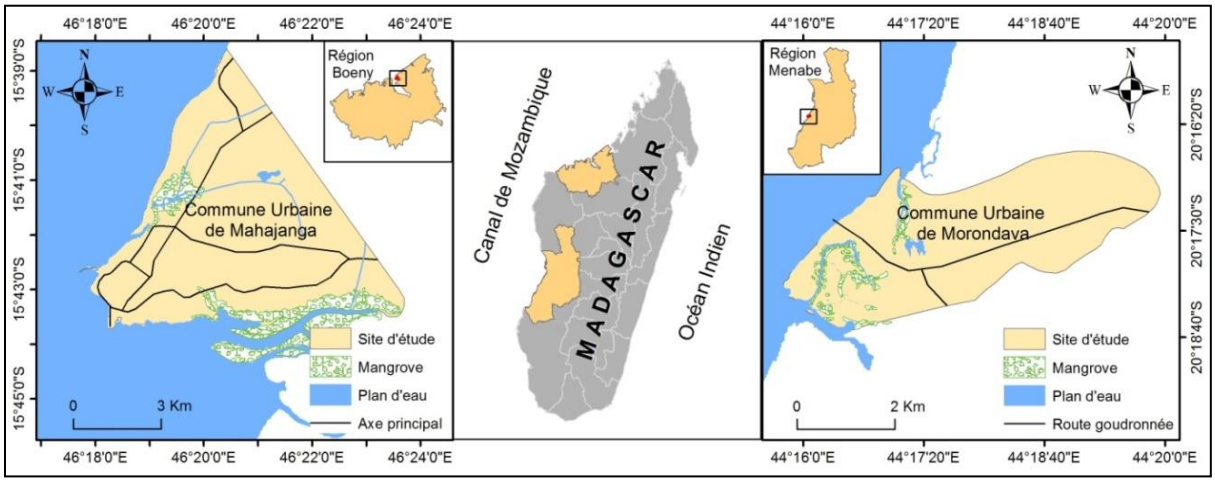


Figure 1. Localisation géographique des villes de Mahajanga et Morondava

1.2. Données et Méthodes

L'analyse de vulnérabilité des mangroves des villes côtières de l'ouest de Madagascar s'appuie sur trois composantes dont l'exposition, la sensibilité et la résilience (Acclimate, 2011). Les différents paramètres qui constituent ces composantes sont évalués afin de déterminer les principales sources et l'intensité des risques climatiques (Fig.2).

Parmi les paramètres climatiques, sont analysés la température de l'air atmosphérique, la pluviométrie, les vents et cyclones. Une analyse climatique (température et précipitation) sur une période de référence 1991 - 2016 ainsi que des projections climatiques selon le scénario RCP4.5 (Representative Concentration Pathway) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution Climatique (GIEC) sont présentées afin d'illustrer les tendances climatiques de 2020 à 2099. Le scénario RCP4.5 correspond à la stabilisation du forçage radiatif d'ici 2100. Ces données de projections climatiques proviennent du site WBG-CCKP (World Bank Group – Climate Change Knowledge Portal ; http://sdwebx.worldbank.org/climateportal). Les précipitations et les températures moyennes mensuelles sont considérées afin de présenter les variations observées. Un site régional en ligne, qui couvre le Sud-ouest de l'Océan Indien, est utilisé pour les données sur les perturbations cycloniques (http://www.firinga.com). Ces dernières sont combinées avec les données du site national dont la Direction Générale de la Météorologie (DGM ; http://www.meteomadagascar.mg).

Quant aux paramètres écologiques, une étude de végétation est réalisée dans les sites d'étude. Chaque individu est inventorié considérant l'espèce, l'état phénologique, le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et la hauteur maximale. Ces données de base permettent, par la suite, de déterminer l'abondance relative des espèces, la structure démographique et le taux de régénération. Cette étude prend en considération le rapport entre les paramètres climatiques (température de l'air et précipitation) et les paramètres physico-chimiques du substrat et de l'eau de mer (température et salinité) dans les relevés réalisés. La vulnérabilité de la population par rapport au changement climatique est également soulevée.

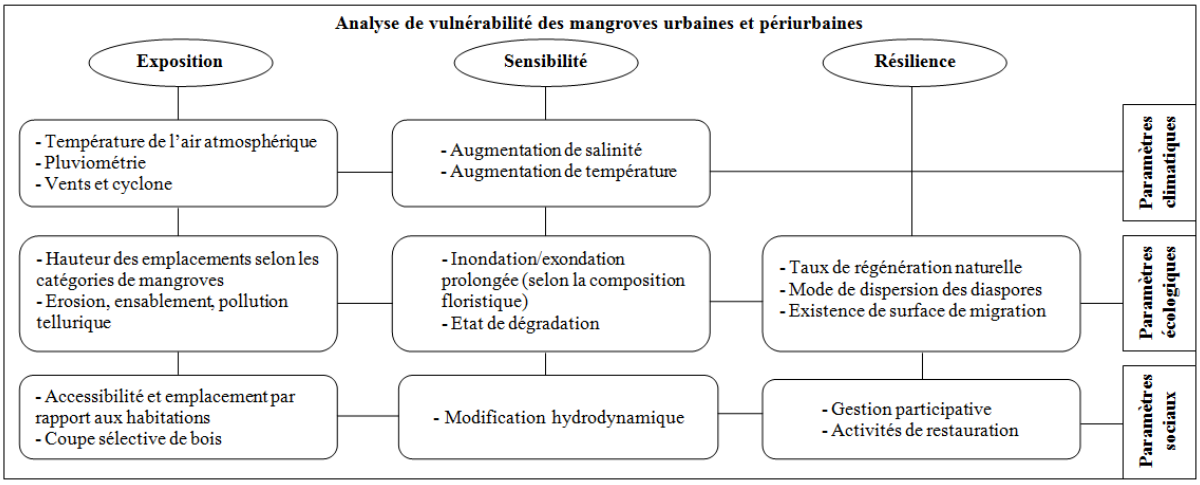


Figure 2. Organigramme de détermination du degré de vulnérabilité des mangroves au changement climatique (adapté selon Acclimate, 2011 et WWF, 2013)

2. Résultats et Discussion

2.1. Analyse climatique : réalités et projections

Le climat à Madagascar se caractérise par deux saisons dont la saison sèche d'avril à octobre, et la saison pluvieuse de novembre à avril. Pour l'analyse des données climatiques (précipitation et température), les moyennes mensuelles enregistrées de 1991 à 2016 sur le site du CIP (Climate Interface Portal ; http://cip.csag.uct.ac.za) sont considérées (Fig.3).

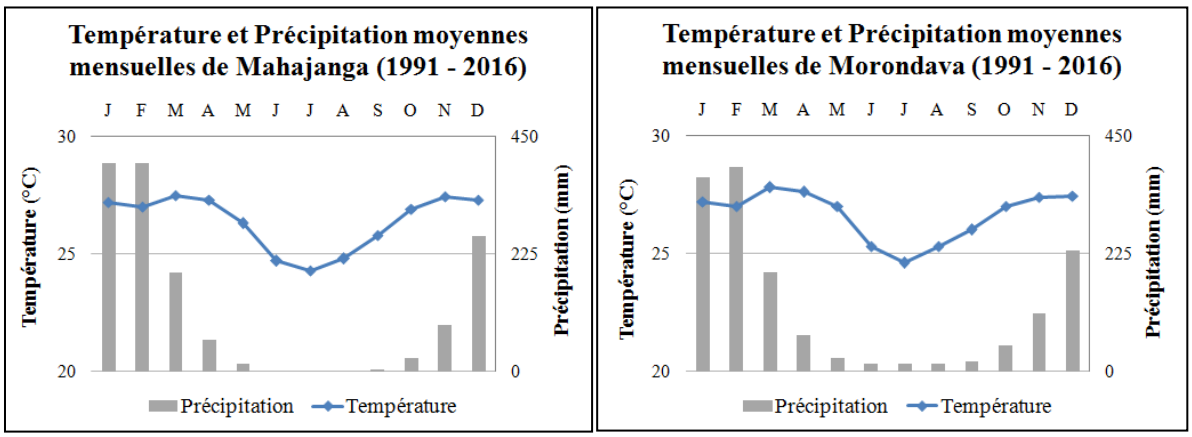


Figure 3. Températures et précipitations moyennes mensuelles des sites d'étude (CIP, 2020)

Dans les sites d'étude, un dérèglement est remarqué car la saison des pluies débute tardivement, en décembre voire en début janvier, et devient de plus en plus courte ayant tendance à se terminer en début mars.

Les résultats des simulations climatiques de 2020 à 2099 (Fig.4) montrent la variation de température et de précipitation dans les deux sites. Mahajanga verra une variation de - 10mm à + 6mm de précipitation dont une baisse de - 10mm (décembre), - 7mm (novembre) et - 5mm (janvier et octobre), et une augmentation de + 3mm (mars) et + 6mm (avril) vers la fin de la saison pluvieuse. A Morondava, la projection illustre une variation de - 10mm à + 3mm de précipitation, avec une baisse de précipitation de - 10mm (janvier), - 8mm (octobre-novembre) et - 2mm (décembre), tandis qu'une augmentation de + 3mm est projetée pour le mois de février (Fig.4).

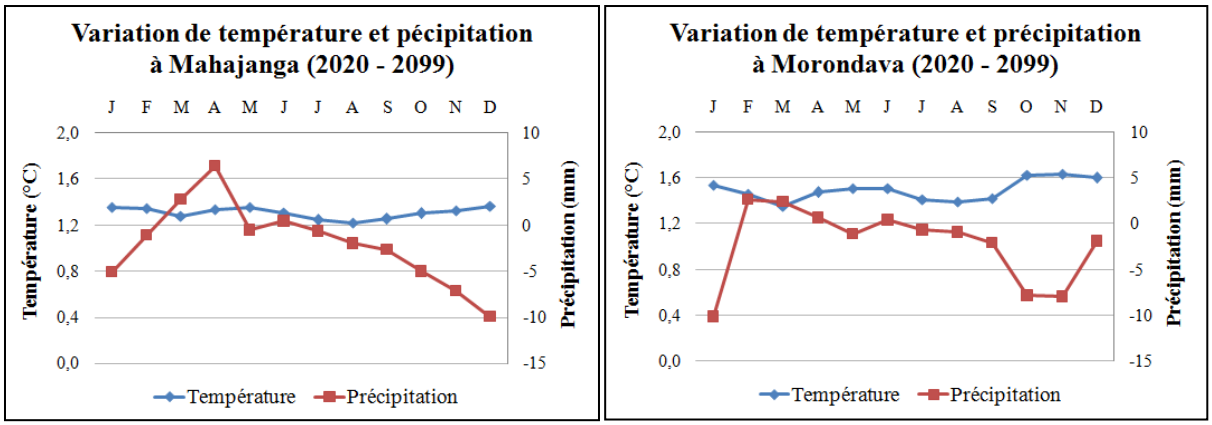


Figure 4. Variation de température et précipitation dans les sites d'études (WBG-CCKP, 2020)

Quant à la température, il y aura une hausse de + 1,2°C à + 1,4°C pour Mahajanga. Dans le cas de Morondava, une hausse de température est également simulée allant de + 1,4°C à + 1,6°C (Fig.4).

Pour la fréquence des cyclones, 24 perturbations cycloniques sont enregistrées entre 1975 et 2019 à Mahajanga (MEDD, 2019). Entre 1969 et 2015, 22 perturbations cycloniques ont touché Morondava (MEDD, 2017). Par ailleurs, le passage de ces perturbations occasionne des pluies diluviennes entrainant d'alarmantes inondations, souvent aggravées par une marée montante. Ce qui a été le cas lors du passage de la dépression tropicale Eketsang faisant ravage sur les infrastructures hôtelières le long de la plage de Morondava. En outre, la tempête tropicale Diane a provoqué des inondations généralisées sur l'Ouest de l'île (Tab.1).

Tableau 1. Cyclones récents engendrant des inondations dans les sites d'étude (DGM, 2020 ; Firinga, 2020)

Date	Zone touchée	Nom	Type	Vitesse des vents	Bilan
24/01/2020	Côte Ouest	Diane	Tempête tropicale	102 km/h	31 décès, 107000 sinistrés (bilan général)
9/12/2019	Côte Ouest	Belna	Cyclone tropical	180 km/h	172 sinistrés dans 59 ménages (Mahajanga)
24/01/2019	Côte Ouest	Eketsang	Dépression tropicale	75 km/h	Destruction de 3 infrastructures hôtelières et 1347 sinistrés (Morondava)

Néanmoins, les précipitations dans les Hautes Terres Centrales influencent davantage sur l'inondation dans la ville de Morondava. Les affluents venant des Hautes Terres se déversent dans le fleuve Morondava, qui se divise, par la suite, en deux bras dont l'un situé au Nord de la ville telle une embouchure et l'autre un fleuve dénommé Kabatomena aboutissant dans le Canal de Mozambique. En outre, l'augmentation du niveau de la mer constitue le plus grand risque pour les mangroves. Les côtes sont menacées par l'érosion et la submersion. Une vitesse moyenne de recul des côtes de 2 à 3 m par an est enregistrée pour Mahajanga, Région Boeny (MEDD, 2019). Depuis 1951, la ville de Morondava voit un recul des côtes de 200 à 400 m, soit environ 6 m par an (MEDD, 2017).

2.2. Ecologie et impact du changement climatique sur les conditions environnementales

Six espèces de palétuviers sont présentes dans les sites d'étude dont *Avicennia marina* (Avicenniaceae), *Bruguiera gymnorhiza*, *Ceriops tagal*, *Rhizophora mucronata* (Rhizophoraceae), *Lumnitzera racemosa* (Combretaceae) et *Sonneratia alba* (Sonneratiaceae). Les mangroves de Mahajanga sont dégradées et rabougries, celles de Morondava sont

également rabougries mais clairsemées ; toutes les deux dominées par *Avicennia marina*. Les mangroves les plus vulnérables se caractérisent par un peuplement fortement perturbé et à faible taux de régénération. La mangrove limitrophe de la ville de Mahajanga possède des surfaces de migration vers la mer par l'apport en sédiments, depuis le fleuve Betsiboka en amont. Il en est de même pour Morondava, l'influence des marées et du fleuve du même nom remodèlent les rivages par l'alternance d'envasement et de dévasement. Toutefois, la sédimentation entraîne l'assèchement, notamment en arrière mangrove, résultant de l'élévation du niveau du sol.

Par rapport aux paramètres physico-chimiques, l'influence du changement climatique se fait remarquer. Concernant les sols de mangrove, des températures de plus de 30°C sont enregistrées, avec des valeurs maximales de 33,7°C et 34°C respectivement à Mahajanga et Morondava. Quant à l'eau de surface, une température maximale de 33,9°C est notée pour Mahajanga et une valeur maximale de 34,8°C à Morondava.

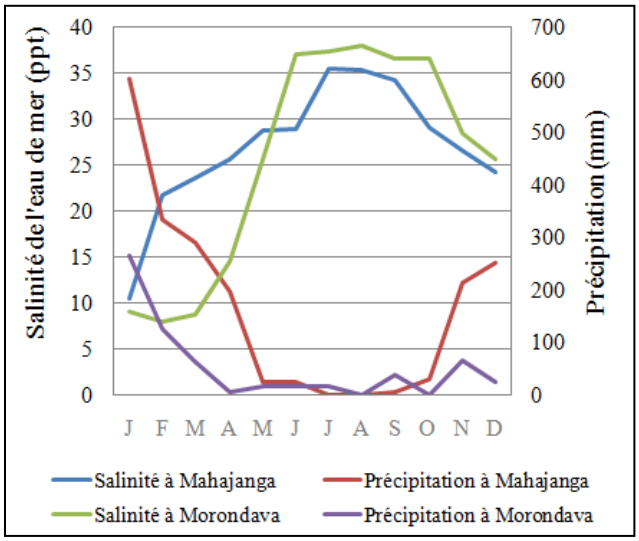


Figure 5. Corrélation entre la salinité de l'eau de mer et la précipitation dans les sites d'étude (2019)

En saison pluvieuse, la salinité de l'eau de mer de Mahajanga varie de 10,50 ppt (part per thousand) à 26,60 ppt selon la distance aux affluents. En saison sèche, le taux moyen de salinité est de 35,50 ppt. Dans le cas de Morondava, les valeurs oscillent entre 2,26 ppt et 15,13 ppt pour la salinité de l'eau de mer en saison pluvieuse. Tandis qu'en saison sèche, une valeur moyenne de 38,0 ppt est enregistrée. Selon la figure 5, la salinité de l'eau de mer est inversement proportionnelle à la précipitation, sauf celle de Morondava influencée par les affluents des Hautes Terres pendant la saison pluvieuse.

2.3. Etude sociale

Selon les études menées sur les mangroves de Mahajanga et Morondava, le remblayage, l'extraction de sol et les coupes illicites de bois de mangroves constituent les principales pressions et menaces pour ces écosystèmes. Toutefois, ces mangroves sont restaurées par des organisations environnementales, en collaboration avec le Ministère de tutelle et les autochtones. L'espèce *Rhizophora mucronata* est choisie pour Mahajanga du fait de sa tolérance à la zone submergée, formée par l'apport en sédiments ; et l'espèce *Avicennia marina* pour Morondava, avantagée par sa résilience.

2.4. Vulnérabilité et impacts constatés sur les mangroves

L'évaluation de l'exposition, de la sensibilité et de la résilience des catégories de mangroves a permis de soulever celles à forte vulnérabilité. A Mahajanga, la mangrove dégradée à

Rhizophoraceae présente une forte vulnérabilité. Quant à Morondava, la mangrove clairsemée à *Rhizophora mucronata* et *Bruguiera gymnorhiza* est fortement vulnérable alors que celle prédominée par *Avicennia marina* s'avère plus résiliente.

Par ailleurs, l'augmentation de température de l'air et de salinité de l'eau de mer résultant de la baisse de précipitations, influencent la composition floristique et la physionomie de mangrove ainsi que la phénologie des espèces. Selon les observations de terrain, la forte salinisation entraîne la dégradation du substrat. Suite aux relevés écologiques réalisés de 2017 à 2020, une augmentation du taux de mortalité est remarquée avec 15,83 % pour la mangrove dégradée à *Avicennia marina* de Mahajanga. A Morondava, un taux de mortalité de 23,85 % est enregistré en 2020 pour *Bruguiera gymnorhiza* qui est l'espèce le plus sensible à l'augmentation de la salinité. Par ailleurs, l'ensablement provoque le rabougrissement du *Rhizophora mucronata* et la mortalité sur pied des individus de 12,60 %. Bien que l'espèce *Rhizophora mucronata* soit moins sensible à la salinité, les effets de l'ensablement la fragilisent. La structure démographique des mangroves urbaines et périurbaines est perturbée en partie à cause de la dégradation du substrat. Des sols compacts sont observés en zone proche de la terre ferme de la mangrove limitrophe de Mahajanga. Ce qui conduit non seulement au rabougrissement des individus adultes mais empêche davantage l'installation des plantules.

Conclusion

Le présent travail a permis de présenter les effets constatés du changement climatique sur les mangroves urbaines et périurbaines de Mahajanga et Morondava. L'analyse climatique de 1991 à 2016 indique que la saison pluvieuse s'est écourtée. Mais les pluies sont plus violentes et les perturbations cycloniques plus fréquentes, entraînant de graves inondations. Les fortes pluies impactent davantage par l'accentuation des érosions en amont qui se traduit par un fort envasement dans les mangroves en aval. La variation de température, selon le scénario RCP4.5, annonce un climat futur (2020-2099) plus chaud par rapport à la période de référence (1991-2016) ; alors qu'avec le climat actuel, le changement du rythme de floraison et de fructification est constaté dû en partie à l'élévation de température. Ce changement impacterait davantage leur régénération naturelle. Outre, la tendance à la baisse de précipitation, à partir de 2020, accentuerait la salinisation et présente une réelle menace pour la survie des palétuviers.

Bibliographie

Acclimate, 2011. *Etude de la vulnérabilité au changement climatique : Evaluation qualitative.* Rapport National Madagascar. COI, FFEM, Région Réunion. 83p.

Jones T.G., Glass S., Gandhi L., Ravaoarinorotsihoarana A., Carro L., Benson H., Rakoto Ratsimba C., Giri D., Randriamanantena & Cripps G. 2016. Madagascar's Mangroves: Quantifying Nation-Wide and Ecosystem Specific Dynamics, and Detailed Contemporary Mapping of District Ecosystems. *Remote Sensing* 8: 106.

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2019. Vulnérabilité et risques climatiques : Informations récentes pour le TBER Boeny. Résumé du Tableau de Bord Environnemental de la Région Boeny, Madagascar, DREDD Boeny. 91p.

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2017. Résumé du Tableau de Bord Environnemental de la Région Menabe, Madagascar, DREDD Menabe. 72p.

Spalding M., Kainuma M & Collins, L. 2010. Atlas mondial des mangroves. OIBT-ISME, 285p.

WWF, 2013. Analyse de vulnérabilité au changement climatique des écosystèmes de mangroves et des écosystèmes associés de l'Aire Marine Protégée de Nosy Hara. 58p.

IMPACTS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE SUR LES PRATIQUES AGRICOLES DANS LA RÉGION AMORON'I MANIA, MADAGASCAR

RANDRIAMIFIDISON R.F.A.[1], TSIAVAHANANAHARY T.J.[2], ANDRIAMIFIDY M.A.[1], ANDRIAMAMPIHANTONA F.[3], REJO-FIENENA F.[1]

1 Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Ambositra, Madagascar (rindrarandriamifidison@yahoo.fr)
2 Faculté des Sciences de Technologie et Environnement, Université de Mahajanga, Mahajanga, Madagascar
3 Ecole Doctorale ENS Toliara, Laboratoire de Recherche Interdisciplinaire sur la société, Dynamique des populations et Environnement, Toliara, Madagascar

Résumé : *Cette recherche se focalise sur la Région Amoron'i Mania, Madagascar. Elle consiste à identifier des stratégies qui permettront de s'adapter aux phénomènes de variabilités climatiques, pour maîtriser le rendement agricole, pérenniser l'activité et assurer le développement durable. Pour cette étude, le rendement agricole concerne la riziculture irriguée, étant donné que c'est la principale spéculation. Les données climatiques utilisées sont issues des données archivées de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar, combiné avec les données historiques de climat du Climate Interface Portal (CIP). Pour l'évaluation de la situation des pratiques agricoles, la MARP (Méthode Accélérée de Recherche Participative) a été adoptée, en complément avec les données monographiques et de l'INSTAT (Institut National de la Statistique).*

Mots clés : *variabilité climatique ; impacts ; Amoron'i Mania ; agriculture*

Summary: ***Impacts of climate variability on agricultural practices in the Amoron'i Mania region, Madagascar.*** *This research focuses on the Amoron'i Mania Region, Madagascar. It consists in identifying strategies that will enable adaptation to climatic variability phenomena in order to control agricultural yield, sustain the activity and ensure sustainable development. For this study, agricultural yield concerns irrigated rice cultivation, since it is the main speculation. The climate data used are taken from archived data from the General Directorate of Meteorology of Madagascar, combined with historical climate data from the Climate Interface Portal (CIP). For the assessment of the situation of agricultural practices, the MARP (Accelerated Method of Participatory Research) has been adopted, in addition to monographic and INSTAT (National Institute of Statistics) data.*

Key words: *climate variability; impacts; Amoron'i Mania; agriculture*

Introduction

La littérature rapporte que 80% de la population pauvre de Madagascar travaille dans l'agriculture. Par conséquent, l'accroissement de la productivité agricole sera la solution clé pour l'augmentation des revenus de cette partie de la population et pour préserver la base des ressources naturelles (Minten *et al*, 2003), ce qui est aussi à la base du développement soutenable et durable. Toutefois, cette productivité varie en fonction de plusieurs paramètres : qualité des intrants agricoles, techniques de production, mais surtout les paramètres climatiques : précipitation, température. Ces paramètres climatiques peuvent être à l'origine de la sécheresse comme la crue, les deux étant non favorable pour l'agriculture.

Pour la Région Amoron'i Mania, sur la partie centrale de Madagascar, 85-90% des pluies annuelles se produisent entre Octobre et Avril de l'année suivante ((Randriamifidison, 2019), qui s'avère être une saison chaude et humide, considérée généralement dans le choix de calendriers culturaux par les agriculteurs. Amoron'i Mania dispose de 270 000 ha de superficie cultivable mais seulement 44,12% sont cultivées. La variabilité climatique décrit par Sankara, 2010, Al Hamndou D., Requier-Desjardins, 2008 comme la variation naturelle intra et inter annuelle du climat peuvent induire des modifications en fréquence et intensité des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses, inondations). Les précipitations mensuelles ne suivent plus leur cours normal au cours d'une année mais aussi d'une année à l'autre. Cette variabilité affecte les activités agricoles depuis la préparation de la terre jusqu'au récolte. Il serait primordial dans ce sens de pouvoir s'adapter à ces phénomènes de variabilité climatiques, pour maîtriser le rendement, pérenniser l'activité et assurer le développement durable.

1. Données et Méthodes

1.1. Présentation de la Région Amoron'i Mania

La Région Amoron'i Mania fait partie de l'ex-Province de Fianarantsoa. Du point de vue géographique, elle est située entre 45°7' et 47°7' de longitude Est et entre 19°8' et 21°0' de latitude Sud (Fig.1). Elle est constituée de 4 districts : Ambositra (Chef Lieu de la Région), Fandriana, Manandriana et Ambatofinandrahana (Fig.1). Le climat de la Région Amoron'i Mania est caractérisé par une saison sèche et fraîche *(ririnina*) et par une saison chaude et humide (*fahavaratra*), d'octobre à avril.

La Région Amoron'i Mania, ayant une vocation agricole de par ses caractéristiques édapho-climatiques assez favorable, regorgent un large type de produits agricoles : vivrière, maraîchère, industrielle. Parmi les spéculations principales, le riz qui constitue l'aliment de base de la population, rurale et urbaine.

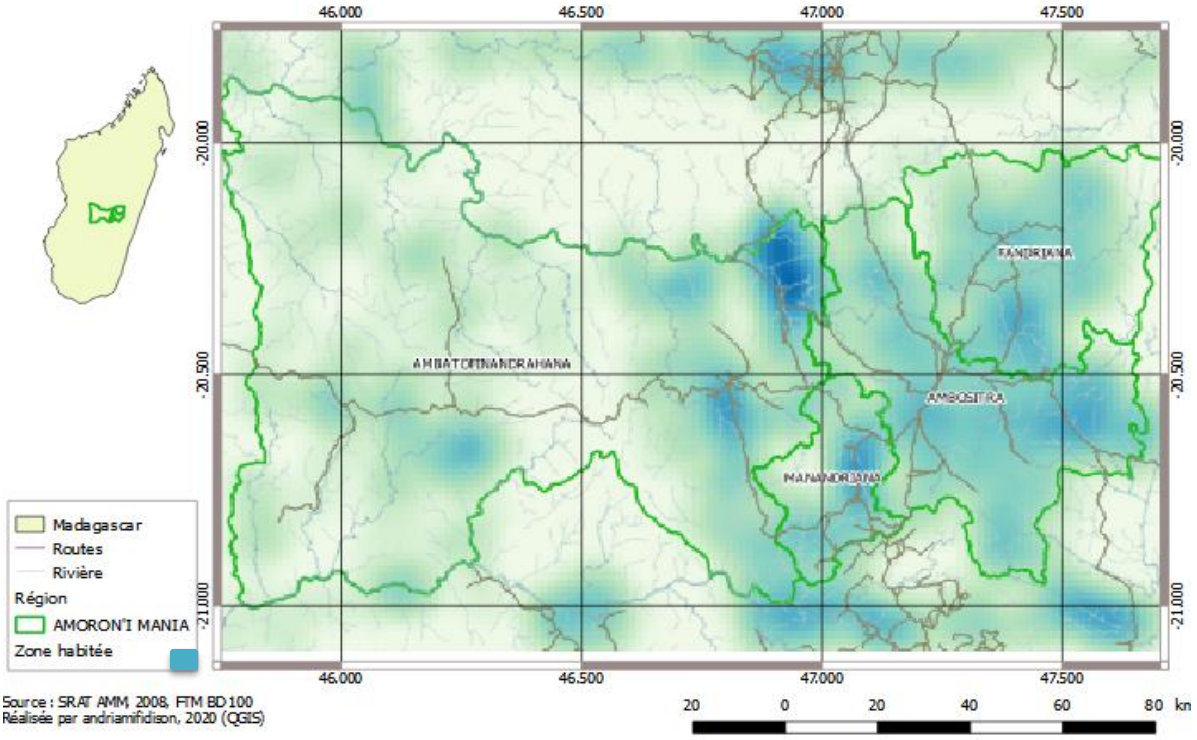


Figure 1. Carte de la Région Amoron'i Mania (Randriamifidison, 2020)

1.2. Méthodes

Les données climatiques utilisées sont issues des données archivées de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar sur une période décennale, combiné avec les données historiques de climat du *Climate Interface Portal* (CIP) (http://cip.csag.uct.ac.za/webclient2/datasets/africa-merged-cmip5/). Pour l'évaluation de la situation des pratiques agricoles, la MARP (Méthode Accélérée de Recherche PArticipative) a été adoptée, en complément avec les données monographiques et de l'INSTAT (Institut National de la Statistique). Les données historiques et de projection utilisées dans cette étude sont issues du portail du Groupe de la Banque Mondiale (un site en ligne avec interface, le site « Climate Change Knowledge Portal – CCKP for Development Practitioners and Policy Makers » ou « portail de connaissances sur le changement climatique pour les acteurs de développement et les décideurs »), notamment pour les données historiques et les projections climatiques https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data. Pour cette étude,

les données du portail de la Banque Mondiale couvrent ainsi les périodes entre 1991-2016 et 2020 à 2039, avec une résolution spatiale d'environ 50 km et une résolution temporelle de 30 min (www.cmip.edu). (Randriamifidison, 2019). Les coordonnées des zones ciblées pour le téléchargement des données climatiques correspondantes ont été obtenues avec le site www.sunearthtools.com. Les données pour 2020 à 2039, c'est à dire les projections climatiques, font l'objet de calcul de médiane pour les 16 modèles[1] disponibles sur le site de World Bank Group.

2. Résultats

Les riziculteurs de la Région Amoron'i Mania se perdent dans le calendrier cultural étant donné la variabilité des paramètres climatiques au cours des années qui se sont succédées. Les figures suivantes montrent ces variabilités pour chaque mois au cours des années.

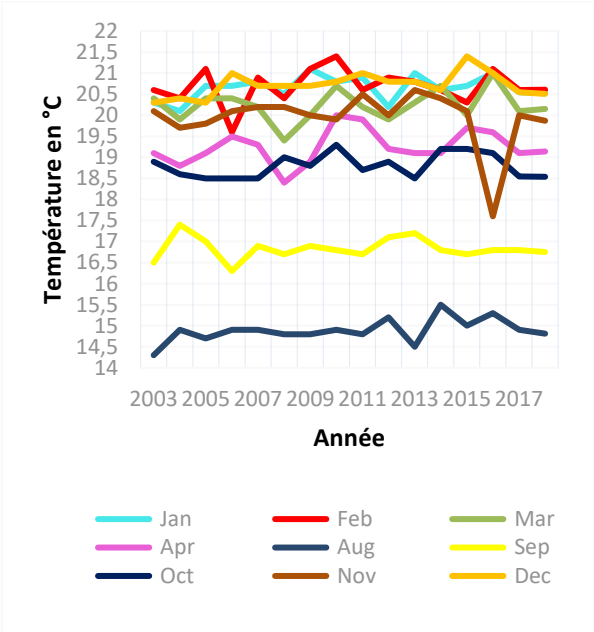


Figure 2. Evolution annuelle des températures mensuelles

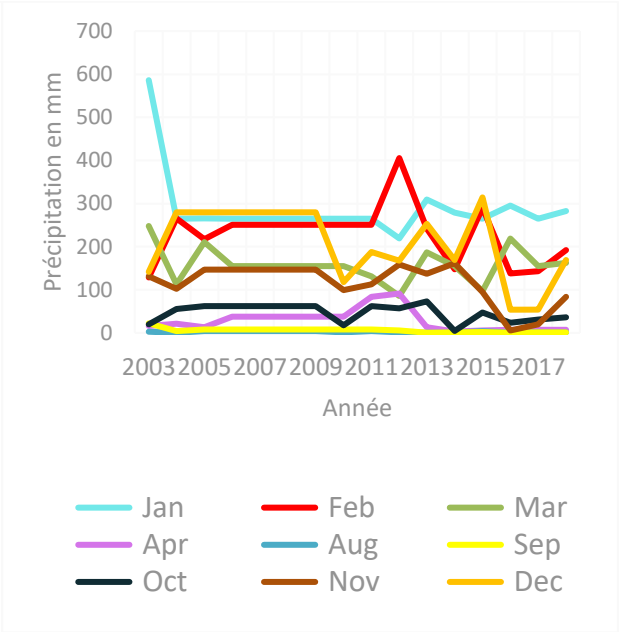


Figure 3. Evolution annuelle des précipitations mensuelles

Pour la Température, il est noté pour les années **2006, 2013, 2017,** notamment pour les mois de Août (labour), Septembre (semis), Février (prérécolte), Novembre (repiquage); de légères baisses.

Pour la précipitation, une hausse est constatée avant 2005, elle devient constante et commence à présenter une perturbation à partir de 2010, correspondant à une période post crise et suivi d'un taux d'incendie très important pour la Région Amoron'i Mania (Randriamifidison, 2020). Une baisse est constatée pour **2010, 2013-2014, 2016, 2017**

[1]16 Modèles : bcc_csm1_1 , bcc_csm1_1_m, ccsm4, cesm1_cam5, csiro_mk3_6_0, fio_esm, gfdl_cm3, gfdl_esm2m, giss_e2_h, giss_e2_r, ipsl_cm5a_mr, miroc_esm, miroc_esm_chem, miroc5, mri_cgcm3, noresm1_m ()

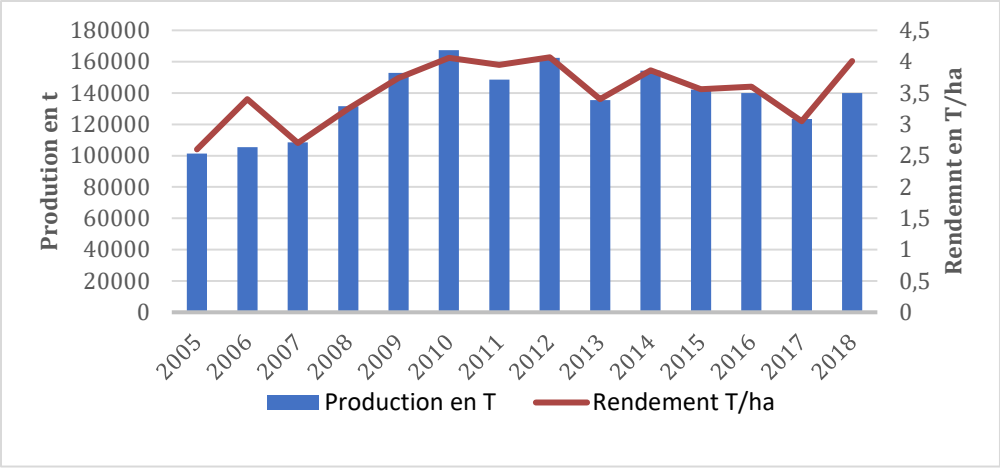


Figure 4. Rendement annuel et de la production rizicole dans la Région Amoron'i Mania , DRAEP, 2019

Faisant le lien entre ces informations climatiques (Fig.2, 3) et le rendement rizicole au cours des années (Fig.4), une variation importante de la T°(température) et/ou des P° (précipitations) entraînerait une baisse du rendement rizicole, tenant compte de la récolte de 2006, 2013 et 2017. Notons que la germination du paddy est fortement conditionnée par le niveau d'humidité et par la température.

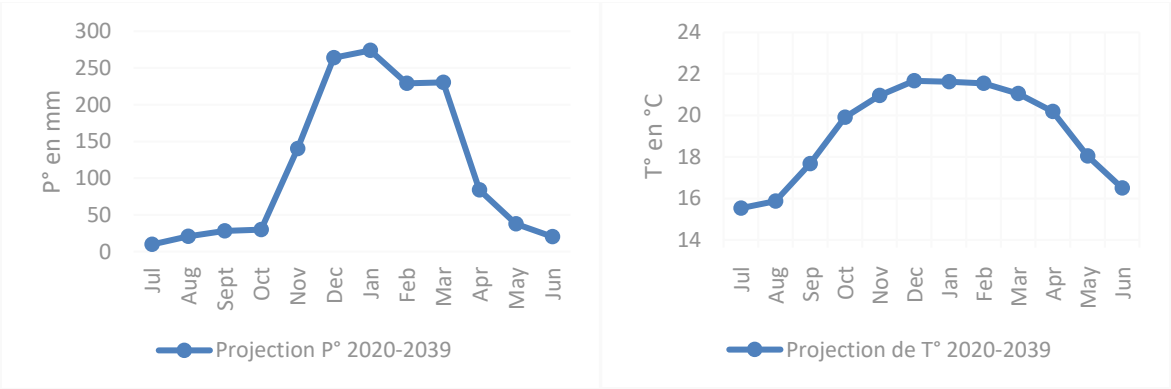


Figure 5. a) Projections de la précipitation (P°) et b) de la Température (T°) de 2020 à 2039 pour la Région Amoron'i Mania, Scenario RCP 4.5 WBG, 2020

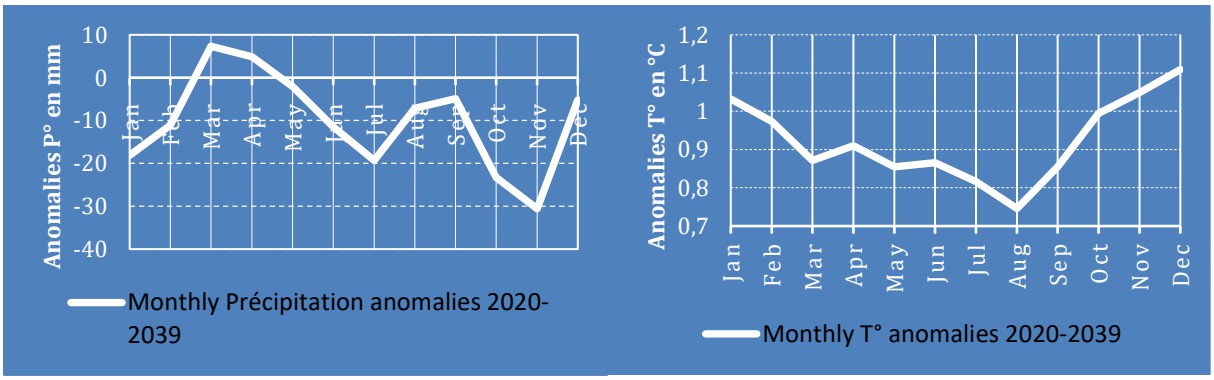


Figure 6. a) Anomalies de précipitation (P°) et b) de Température (T°) de 2020 à 2039 pour la Région Amoron'i Mania, Scenario RCP 4.5 WBG, 2020

La figure 5 montre les valeurs de projections des précipitations et de la température à l'horizon de 2020-2039. La figure 6 donne un aperçu des anomalies des précipitations et de la température pour la Région Amoron'i Mania de 2020 à 2039 par rapport aux valeurs actuelles. Ces anomalies résultent de la moyenne des 16 modèles de projections avec le Scenario RCP

4.5. En effet, une diminution des précipitations est alors prévue pour tous les mois de l'année, avec un maximum de diminution de -30 mm pour le mois de novembre, de -23 mm pour le mois d'octobre (correspondant généralement au semis du riz), et -18mm pour le mois de janvier (début de repiquage). Ces mois, considérés comme les plus arrosés de l'année, constituent les périodes les plus importantes pour la riziculture car de leur réussite dépendent les récoltes, à part les entretiens (sarclage, fertilisation de la terre). Une augmentation des précipitations est cependant constatée pour mars et avril (mois secs pour la Région). Pour la température, la projection indique une augmentation pour tous les mois. Avec un maximum pour le mois de décembre avec +1,1 °C, la plus faible anomalie serait enregistrée pour le mois d'août constituant les mois les plus froids avec juillet et juin (Fig.5). Ces informations pourraient aider les riziculteurs de la Région dans la révision du calendrier cultural.

Discussions et suggestions

D'après les estimations de 2006 du Groupe de recherche sur le développement de la Banque mondiale, les pertes agricoles causées par le réchauffement climatique dans les pays les plus pauvres pourraient atteindre entre 41 et 102 milliards de dollars par an. Trouver des solutions alternatives pour s'adapter au phénomène à défaut de l'éviter serait impératif dans un pays vulnérable comme Madagascar (Mastri, 1995). Pour notre zone d'étude, l'alizé apporte pendant la saison sèche des pluies fines sous forme de crachins et permet la formation de brume. La rosée est abondante et le brouillard est aussi très fréquent, surtout au niveau des vallées. Il existe quelques pluies efficaces durant cette saison qui réduisent considérablement le déficit hydrique. Certaines cultures tempérées ne craignant pas le froid sont donc envisageables à cette période, si elles sont irriguées (Joly, 1941). Les solutions reposent en amont sur la recherche des variétés plus robustes présentant une résistance améliorée aux paramètres climatiques extrêmes : forte humidité, forte chaleur. Dans le cas pratique, au niveau des paysans de la Région Amoron'i Mania, les stratégies devront tenir compte des réalités économiques, mais aussi des réalités environnementales. Ce qui implique (1) la maîtrise de la gestion de l'eau et du système d'irrigation (Springer-Heinze, 1991), avec l'utilisation des canaux de rétention au niveau des parcelles, l'arrosage des cultures par système de goutte à goutte ; (2) l'adaptation des calendriers culturaux en fonction de la variabilité, procéder au labour précoce (à la fin du mois de juillet ou début août) faire en sorte d'entamer le repiquage au mois de novembre. (3) Faire des rotations de cultures pour entretenir le sol et éviter que ceci soit compacté au labour, en utilisant des légumineuses telles que le Soja ou de l'arachide, cela permet d'ailleurs de fixer l'azote dans le sol par la présence de l'association symbiotique au niveau de leurs racines. (4) Conscientiser la population de la Région sur les enjeux du changement climatique, les effets, et les mesures de luttes comme la pratique de l'agroécologie qui réduit l'effet de la forte température, l'ensoleillement, le vent, et la restauration forestière passive et active. (5) Sensibiliser et rendre accessibles les informations météorologiques pour chaque site pour permettre aux paysans de prévoir, d'anticiper les variabilités ; sachant qu'à Madagascar, comme dans de nombreux pays en voie de développement, les populations n'accordent pas encore une grande importance aux informations météorologiques, d'ailleurs ils sont inaccessibles aux grands publics. Par ailleurs, aucune station météorologique n'est fonctionnelle dans la Région Amoron'i Mania, ce qui rend les données moins fiables et assez théoriques, les dernières stations étant mises en place au cours des années 1950, sans pus aucun entretien. (6) Poursuivre les efforts de reboisement pour que Madagascar redevienne une île verte, pour atténuer les effets des changements climatiques, ce qui est d'ailleurs inscrit dans la politique générale de l'État actuel. Pour le cas de la Région Amoron'i Mania, prioriser la réduction de la fragmentation pour favoriser les régénérations naturelles (7) et délaisser l'agriculture conventionnelle pour l'agriculture durable (Reveret, 1981, Roufaï, 2005).

Conclusion

Au vu de nos analyses précédentes, les variabilités climatiques constituent une grande menace pour les activités agricoles. En affectant la production agricole, les changements climatiques compromettent la sécurité alimentaire et renforcent la pauvreté déjà trop pesante pour la population. Les risques sont réels, et les agriculteurs font de leur mieux pour s'y adapter. Les résultats apportés serviront de base de décision, d'anticipation pour les acteurs de développement de la Région dans tous les domaines, autres que l'agriculture.

Les principales données ont abouti à la nécessité de modifier le calendrier cultural tenant compte essentiellement des variabilités de précipitation. Le développement de la pratique de la riziculture pluviale demeure aussi envisageable pour avoir plus de rendement et répondre aux besoins d'une population croissante. Mais aucune stratégie ne serait efficace, sans que la population tant urbaine que rurale ne soit impliquée, que le développement ne parte de la base.

Remerciements

Je tiens à apporter mes remerciements au Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique de Madagascar de m'avoir autorisée à conduire cette recherche, la Direction de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche Amoron'i Mania et le Service Régional de la Statistique, pour m'avoir fournie les données nécessaires, l'AIC qui a accepté ma participation au Colloque, et mes co-auteurs sans qui je n'aurais pas pu terminer cette démarche.

Bibliographie

Draep A.M., 2018. Unite Regional de la Statique Agricole, Monographie Régionale Amoron'i Mania

Joly F., 1941. Les climats de Madagascar. *L'information géographique*, volume 5, n°4, 76-80.

Mastri, L., 1995. Achieving a Sustainable Agricultural System in Sub-Saharan Africa

Minten B., Randrianarison J-C, Randrianarisoa L., 2003. Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar. *USAID,/Cornell University/INSTAT/FOFIFA*. 13p.

Randriamifidison R.F.A., Tsiavahananahary T.J. Rakotoarisoa D. Razanajatovo D., 2019. Analyse cartographique du feu dans la Région Amoron'i Mania : enjeux écologiques et socio-économiques. Colloque Géosciences, Académie des Sciences,.

Randriamifidison R.F.A., Tsiavahananahary T.J., Rakotoarisoa D., Andriamampihantona F., 2019. La Région Amoron'i Mania Madagascar Face Au Changement Climatique : Réalités, Adaptation, Projections Et Orientations Stratégiques Pour Un Développement Durable. 22ème Colloque de l'AIC, Thessalonique, Grèce.

Reveret J.P., 1981. « De l'agriculture conventionnelle à l'agriculture écologique, vers un nouveau paradigme », *Sociologie et sociétés*, vol. 13, n° 1, 1981, 49-62.

Roufaï M.C., 2005. L'évaluation environnementale face aux enjeux du développement agricole durable en Afrique de l'ouest. 10ème Colloque international des spécialistes francophones en évaluation des impacts, Angers, France.

Springer-Heinze A., 1991. A framework for agricultural research with a sustanability perspective

Al Hamndou D., Requier-Desjardins M., 2008. Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : s'adapter, une approche intégrée. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 8 Numéro 1 | avril 2008, mis en ligne le 07 novembre 2008

LES ZONES CLIMATIQUES LOCALES À L'ÉPREUVE DES TEMPÉRATURES DE SURFACE ET DES MESURES MOBILES : LE CAS DE LYON

RENARD F., ALONSO L.

Université Jean Moulin Lyon 3, UMR 5600 CNRS Environnement Ville Société, Lyon, France

Résumé : *La notion d'inconfort thermique est une problématique de plus en plus prégnante en raison des impacts sanitaires potentiels. Des solutions doivent être trouvées à travers les politiques d'urbanisme afin d'améliorer le confort thermique des habitants. A cet effet, les zones climatiques locales (ZCL) sont souvent utilisées. L'objectif de cette étude est de confronter ce découpage aux températures de surface (T_S) provenant des mesures de Landsat et des mesures mobiles de la température de l'air (T_A) effectuées au sein de l'agglomération de Lyon. Les ZCL sont obtenues par photo-interprétation, les T_S à l'aide du single channel algorithm et les T_A par mesures mobiles. Les T_S et T_A sont étudiés en fonction des ZCL à l'aide du test Kruskal-Wallis suivi de la procédure de comparaison multiple par paires Steel-Dwass-Critchlow-Fligner. Les résultats indiquent des différences significatives entre les ZCL pour les T_S mais aussi pour les T_A et confirment ainsi l'intérêt de leur utilisation.*

Mots clés : *zones climatiques locales ; îlot de chaleur urbain ; température de surface ; Landsat*

Summary: ***Local climatic zones using surface temperatures and mobile measurements: the case of Lyon.*** *The notion of thermal discomfort is an increasingly important issue due to the potential health impacts. Solutions must be found through urban planning policies in order to improve the thermal comfort of inhabitants. For this purpose, Local Climate Zones (LCZs) are often used. The objective of this study is to compare this classification with surface temperatures (T_S) from Landsat measurements and mobile air temperature (T_A) measurements carried out within the city of Lyon. The LCZs are obtained by photo-interpretation, the T_S using the single channel algorithm and the T_A by mobile measurements. The T_S and T_A are studied as a function of the LCZs using the Kruskal-Wallis test followed by the Steel-Dwass-Critchlow-Fligner pairwise multiple comparison procedure. The results show significant differences between the LCZs for both T_S and T_A and thus confirm the value of their use.*

Key words: *local climate zones; urban heat island; surface temperature; Landsat*

Introduction

Les évolutions climatiques actuelles ont des impacts sur la santé des populations, notamment à travers les vagues de chaleur (Fallman *et al.*, 2019 ; Alonso et Renard, 2020). Ces vagues de chaleur sont renforcées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain, défini comme la différence de température de l'air entre le milieu urbain et le milieu rural (Oke, 1982). Ce phénomène se manifeste aussi bien en journée que durant la nuit. Cette différence de température n'est pas uniforme et des gradients marqués existent dans les agglomérations. Les mégapoles comme Lyon sont les premières touchées.

Les solutions d'adaptation et d'atténuation de l'inconfort thermique passent nécessairement par une connaissance des gradients thermiques du milieu urbain. Cependant, très peu de mesures sont disponibles en centre-ville, les réseaux de mesure de Météo-France se situant le plus souvent en périphérie (Azevedo *et al.*, 2018). Les agglomérations comme Rennes (Foissard *et al.*, 2019) ou Dijon (Richard *et al.*, 2018) qui bénéficient d'un réseau dense avec plusieurs dizaines de postes de mesure fixes sont extrêmement rares. Les mesures de température de surface peuvent donner des informations très utiles mais force est de constater que les aménageurs ne se sont pas encore saisis de la potentialité de l'outil, probablement en raison de la difficulté de traitement des bandes thermiques des satellites Landsat. En effet, la donnée satellitaire *Modis* ne se prête pas réellement à l'étude de la température de surface du milieu urbain en raison de sa résolution spatiale inadaptée car kilométrique.

Les aménageurs recourent plutôt actuellement à la notion de zones climatiques locales (ZCL), telles que définies par Stewart et Oke (2012), afin de caractériser le tissu urbain d'un point de vue thermique. Les ZCL sont fondées sur des diversités de morphologie du milieu

urbain et de l'occupation du sol. Chaque classe est unique dans sa combinaison de structure de la surface (bâti, hauteur des arbres et espacement), couverture du sol (fraction perméable), composition (albedo et admittance thermique) et métabolisme (flux de chaleur anthropogénique). Ce concept propose ainsi d'utiliser une méthodologie commune pour définir les caractéristiques physiques des villes à l'intention des urbanistes, architectes et climatologues urbains. Par conséquent, cette terminologie est transférable dans toutes les zones géographiques et culturelles. Les 18 zones principales sont établies en fonction des caractéristiques de la structure de surface. Ces zones reposent sur des bases théoriques et il est conseillé de valider la cohérence thermique de cette division territoriale avant son utilisation dans des projets de développement. Cela peut être effectué par le biais d'un réseau de mesure fixe s'il existe (Foissard *et al.*, 2019 ; Richard *et al.*, 2018) ou par des mesures mobiles (Leconte *et al.*, 2016). L'objectif de cette étude est donc de comparer les ZCL de l'agglomération de Lyon (France – 1,4 millions d'habitants). Les ZCL sont confrontées aux données de température de surface (T_S) provenant des passages de *Landsat* et des mesures mobiles de la température de l'air (T_A) effectuées aux cours de multiples campagnes itinérantes à vélo. Les données Landsat exploitables de 2000 à 2019 ont été traitées. Les mesures itinérantes sur Lyon ont été effectuées lors des étés 2016 à 2018.

1. Détermination des zones climatiques locales et mesure des températures

1.1. Zones climatiques locales : photo-interprétation et classification supervisée

Les ZCL de l'agglomération lyonnaise sont obtenues par photo-interprétation d'imagerie aérienne d'une résolution de 8 cm datant de 2018[1] par des opérateurs qualifiés possédant une solide connaissance du territoire locale. Cette photo-interprétation est également confrontée au besoin aux prises de vue de *Google Maps*. De cette manière, 4922 polygones ont été obtenus sur les 491 km² de l'agglomération pour 1,4 millions d'habitants (Fig.1).

[1] Source : https://data.grandlyon.com/accueil

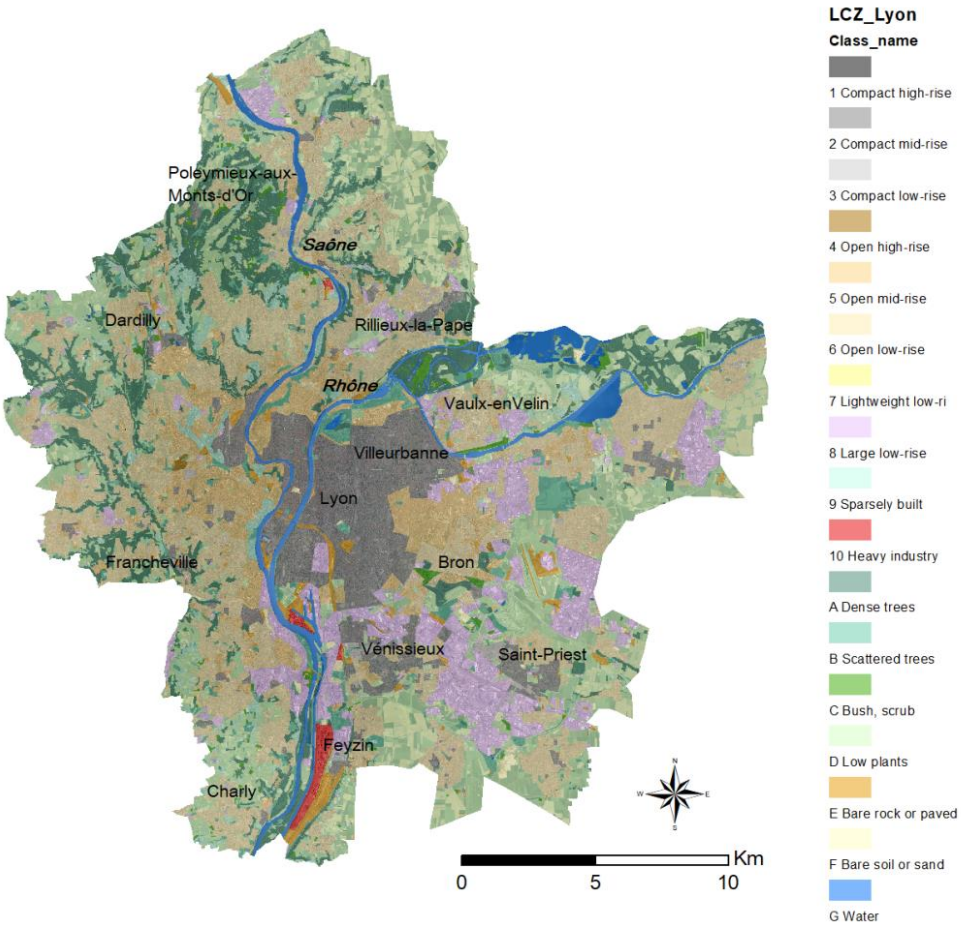


Figure 1. Zones climatiques locales de la métropole de Lyon

1.2. Température de surface

Les T_S ont été obtenues à l'aide du *single channel algorithm* (Sobrino *et al.*, 2004 ; Renard *et al.*, 2019). Toutes les images de *Landsat* présentant une couverture nuageuse inférieure à 10 % ont été traitées de 2000 à mi-2019 : 62 pour Lyon (Tab.1). De plus, seuls les pixels présentant une qualité suffisante selon la *band quality assessment* ont été conservés, c'est-à-dire les pixels qualifiés de *Low Cloud Confidence, Low Cloud Shadow Confidence, Low Snow / Ice Confidence*.

Saisons	hiver	printemps	été	automne
Nombre de passages par saisons	5	11	35	11

Tableau 1. Passages de Landsat utilisés par saisons

1.3. Température de l'air

Après avoir testé les mesures en automobile, ces dernières ont été rejetées car elles présentaient trop de biais méthodologiques et pratiques : problèmes de congestion du trafic, impossibilité de mesurer les zones piétonnes, mesures sur le réseau viaire uniquement, coût, etc. Ainsi, sur Lyon, des mesures de température de l'air à vélo à vitesse modérée (< 8 km/h) ont été effectuées. Après comparaison, elles présentaient des résultats équivalents aux mesures pédestres mais permettaient de couvrir un plus grand territoire sur un même intervalle de temps et provoquaient moins de fatigue au personnel sur le terrain.

Un enregistreur continu Log32 a été utilisé, sous un abri de radioprotection ventilé blanc. La localisation est assurée par un GPS Garmin 64s. De nombreuses campagnes de mesure ont été

réalisées sur les deux sites durant les mois d'été de 2016 à 2019, mais dans le cadre de cette étude, seules les mesures de l'après-midi sont exploitées, soit 19 campagnes de mesure sur Lyon (Tab.2).

Tableau 2. Mesures mobiles utilisées pour l'agglomération de Lyon

	Heure		**Pression barométrique (hPa)**		**Précipitation (mm)**		**Température (°C)**		**Humidité relative (%)**		**Vitesse du vent (m/s)**	
Date	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
15/07/2016	12h47	14h57	1025,9	1025,3	0	0	20,8	22,1	50	39	15	13
18/07/2016	13h41	15h40	1019,5	1018,7	0	0	31,4	33,8	36	28	5	3
16/08/2016	13h32	15h14	1013,4	1012,6	0	0	30,3	32,2	37	32	8	6
17/08/2016	14h58	16h30	1010,2	1009,4	0	0	27	30,3	57	41	5	8
23/08/2016	13h33	15h27	1023	1021,8	0	0	27,3	29,1	44	42	nc	nc
24/08/2016	15h51	17h47	1017,1	1016,2	0	0	33,2	33,6	35	33	5	5
25/08/2016	10h05	12h12	1017,3	1016,5	0	0	24,9	28,9	49	39	6	11
26/08/2016	13h30	15h14	1016,4	1015,6	0	0	30,9	33,7	40	33	6	5
29/08/2016	14h41	16h50	1020,4	1019,8	0	0	24	24,8	58	49	3	6
30/08/2016	14h42	16h50	1019,2	1017,7	0	0	26,5	28,7	49	44	11	8
31/08/2016	14h39	17h09	1018,8	1017,8	0	0	29,9	31,8	44	38	nc	3
01/08/2017	15h23	18h37	1012,2	1013	0	0	29,4	30,2	52	48	10	3
26/06/2018	12h15	13h39	1019	1018,6	0	0	25	26,6	49	39	5	8
03/07/2018	12h29	13h56	1014,1	1013,5	0	0	29,3	30,5	56	50	6	3
12/07/2018	12h25	13h10	1015,9	1015,7	0	0	25,3	26,4	43	38	8	8
19/07/2018	12h32	14h45	1014,2	1013,2	0	0	29,8	31,3	42	34	5	3
22/07/2019	12h25	16h12	1021,1	1019	0	0	31,5	35,3	38	34	6	5
31/07/2019	14h36	16h31	1018,1	1017,1	0	0	24,2	25,9	47	42	6	10
13/08/2019	15h12	16h03	1018,7	1018,5	0	0	22,2	22,2	51	51	10	10

1.4. Tests statistiques

Les données de T_S et de T_A associées à chaque échantillon de ZCL ne suivent pas une distribution normale (Shapiro et Wilk, 1965) et les variances des échantillons ne sont pas homogènes (Box, 1963) : il n'est donc pas conseillé d'utiliser une ANOVA mais de se tourner vers le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis suivi d'une procédure de comparaison multiple par paires, afin d'étudier la variabilité inter- et intra-classes. Plusieurs méthodes existent comme celles de Dunn (Dunn, 1964), Conover et Iman (Conover, 1998) ou encore de Steel-Dwass-Critchlow-Fligner (Fligner, 1984). Notre choix s'est porté sur la dernière comme recommandé par Hollander et Wolfe (1999). Le test de Steel-Dwass-Critchlow-Fligner peut aussi être vu comme une alternative complète au test de Kruskal-Wallis. Les LCZ sont finalement hiérarchisées par groupes de températures de surface homogènes, pour l'année entière et par saisons météorologiques. Les températures de l'air sont, quant à elles, confrontées uniquement durant la période de l'été, par manque d'échantillons assez fournis sur les autres saisons.

2. Résultats

2.1. Température de surface

Appliquée sur les journées sélectionnées, la méthode de comparaison multiple classe les ZCL en différents groupes, en fonction de leurs températures de surface. Les résultats du test de Kruskall-Wallis suivi de la procédure de comparaison multiple de Steel-Dwass-Critchlow-

Fligner indiquent des différences significatives entre les zones climatiques locales et les T_S et confirment ainsi l'intérêt de l'utilisation de ces zones. Plus précisément, pour l'agglomération lyonnaise, à l'échelle de l'année, les surfaces les plus chaudes sont les zones d'activité et les zones industrielles lourdes (36,9 et 39°C) suivies des zones compactes de faible et de moyenne hauteur (32,2 et 33,8°C). Les zones les plus fraiches à l'échelle annuelle sont également les zones en eau (18,6°C), les arbres denses (19,2°C) et les buissons et broussailles (20,4°C). Ces résultats se confirment également en fonction des saisons (Fig.2 : exemple représentatif de l'été), avec une nuance lors de l'hiver qui présente des différences thermiques moins marquées.

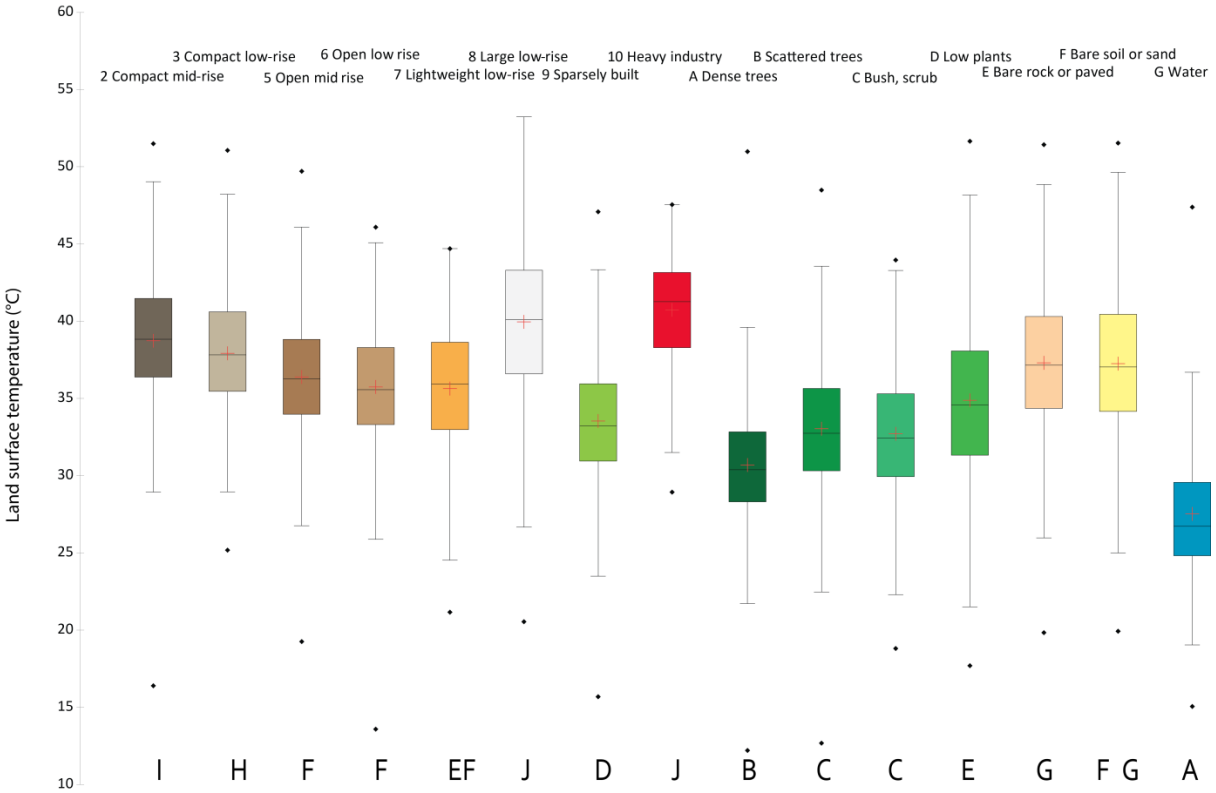


Figure 3. T_S des ZCL de l'agglomération de Lyon durant les étés de 2000 à 2019 et classification par groupes suivant la procédure de comparaison multiple de Steel-Dwass-Critchlow-Fligner

2.2. Température de l'air

Les résultats sont moins significatifs pour les T_A, le test de Kruskall-Wallis suivi de la procédure de comparaison multiple fait ressortir moins de classes distinctes, mais les résultats sont similaires dans l'ensemble pour les grandes catégories d'occupation du sol. Pour Tokyo, à l'échelle annuelle, les zones les plus chaudes sont le bâti compact de faible hauteur, les zones d'activités et la végétation rase (30,2, 30,1 et 30,4°C) et les plus fraîches sont le bâti ouvert de moyenne hauteur et les arbres denses (26,2 et 27,4°C). A Lyon, les zones les plus chaudes sont le sol nu et le sable, la roche nue et le sol imperméabilisé ainsi que le bâti compact de moyenne hauteur (respectivement 32,7, 31,4 et 31,2°C). Les plus fraiches sont les zones d'arbres denses et le bâti ouvert de taille moyenne (28,5 et 30,8°C).

Conclusions et discussion

Les zones climatiques locales sont un outil de plus en plus utilisé dans les problématiques d'aménagement grâce à son universalité et à sa facilité d'obtention. Cependant, il est nécessaire de les valider localement à l'aide de mesures, comme ici pour les agglomérations de Lyon et de Tokyo, à l'aide de mesures de température de surface et de l'air, avec des analyses à l'échelle de l'année et par saison. Il ressort que les tests statistiques permettent de différencier les ZCL

en fonction de leurs températures respectives, qu'elles soient de surface ou de l'air. D'une manière assez logique, parmi les zones les plus chaudes, nous retrouvons les zones d'activité, les zones industrielles et les zones de bâti compact alors que les zones les plus fraîches sont marquées par une végétalisation significative. Les T_A ont cependant une plage beaucoup plus faible que les T_S. En effet, pour une même journée, il est très rare de trouver des différences de température de l'air de 3°C lorsque les différences de T_S peuvent dépasser 30°C. En outre, les mesures mobiles de la température de l'air dépendent beaucoup plus du vent et de l'exposition au soleil que les températures de surface. Une autre limite de ce travail réside aussi dans le fait que les parcours pour obtenir des mesures mobiles de température de l'air ont recoupé un nombre limité de zones climatiques locales, notamment dans le centre de Lyon, contrairement aux T_S qui sont, par nature, disponibles partout. En effet, il n'est pas aisé ou tout simplement interdit de pénétrer dans certaines zones industrielles à risque et dans des propriétés privées.

Bibliographie

Alonso L., Renard F., 2020. A comparative study of the physiological and socio-economic vulnerabilities to Heat Waves of the population of the Metropolis of Lyon (France) in a climate change Context. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 1004.

Azevedo J. A., Chapman L., Muller C. L., 2016. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *Remote Sens*., 8, 153.

Box G.E.P., 1953. Non-normality and tests on variances. *Biometrika* 40, 318–335.

Conover W.J., 1998. *Practical Nonparametric Statistics*. 3rd Edition, Wiley.

Dunn O.J., 1964. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics* 6, 241–252.

Fallman J., Wagner S. & Emeis S., 2017. High resolution climate projections to assess the future vulnerability of European urban areas to climatological extreme events. *Theor. Appl. Climatol.*, 127, 667-683.

Fligner M.A., 1984. A note on two-sided distribution-free treatment versus control multiple comparisons. *Journal of the American Statistical Association* 79, 208–211.

Foissard X., Dubreuil V. & Quénol H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 29, 100490.

Hollander M. et Wolfe D. A., 1999. *Nonparametric Statistical Methods, Second Edition*. John Wiley and Sons, New York, 816p.

Landis J.R. et Koch G.G., 1977. A one-way components of variance model for categorical data. *Biometrics*, 33, 671-679.

Leconte F., Bouyer J., Claverie R., Pétrissans M., 2016. Analysis of nocturnal air temperature in districts using mobile measurements and a cooling indicator. *Theor. Appl. Climatol*. 130, 365-376.

Oke T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 108, 1-24.

Renard F., Alonso L., Fitts Y., Hadjiosif A., Comby J., 2019. Evaluation of the effect of urban redevelopment on surface urban heat islands. *Remote Sens*., 11, 299.

Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud, Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T., Pohl B., 2018. How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, 26, 258-274.

Shapiro S. S. & Wilk M. B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, 3 and 4, 591-611.

Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.*, 90, 434-440.

Stewart I. D., Oke T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc*., 93, 1879-1900.

LA TRANSITION THERMIQUE PRINTANIERE EN TUNISIE

RIAHI M.

U.R. Géomatique des Géosystèmes, Institut Supérieur des Sciences Humaines de Jendouba, Jendouba, Tunisie (riahimostapha@gmail.com)

Résumé : *Saison de transition, le printemps est théoriquement la saison d'optimum thermique en Tunisie. Il n'empêche que cette saison ne cesse de connaitre lors des deux dernières décennies des anomalies positives de plus en plus fréquentes qui se traduisent par des jours et des nuits de chaleur pénible. On se propose, donc, d'examiner les anomalies thermiques printanières, d'étudier la variabilité interannuelle des températures quotidiennes maximales et minimales moyennes ainsi que l'occurrence des jours et des nuits de chaleur élevée.*

Mots clés : *anomalies positives ; chaleur élevée ; variabilité ; Tunisie*

Summary: ***The spring thermal transition in Tunisia.*** *Transitional season, spring is theoretically the thermal optimum season in Tunisia. However, this season has been experiencing more and more positive anomalies over the past two decades, which result in days and nights of painful heat. It is therefore proposed to examine the spring thermal anomalies, to study the interannual variability of the average maximum and minimum daily temperatures as well as the occurrence of days and nights of high heat.*

Key words*: positive anomalies; high heat; variability; Tunisia*

Introduction

Saison de transition, le printemps en Tunisie, sous climat méditerranéen, est censé être, par excellence, la saison de rétablissement de confort thermique. Son début est en quelque sorte le prolongement de l'hiver ce qui explique le réchauffement lent des températures. Au milieu de la saison, le mois d'avril connait un réchauffement plus sensible ce qui marque la véritable entrée dans le printemps. Au mois de mai, le réchauffement s'accélère davantage annonçant le démarrage de l'été.

Toutefois, cette saison n'est pas à l'abri des températures chaudes, voire même, stressantes. Elles pourraient s'y produire précocement signalant ainsi une éventuelle tendance au débordement de la saison estivale au détriment du printemps. En effet, lors des dernières années, en l'occurrence le mois d'avril 2016, des anomalies positives aussi bien des maximas et des minimas ont été observées ce qui laisse à penser aux prémices d'une tendance à l'allongement de la saison chaude. D'où la nécessité s'est faite sentir de fignoler le qualificatif de ''répit réparateur'' attribué à cette saison.

On se propose dans ce papier d'étudier les anomalies thermiques positives printanières, leur fréquence ainsi que leur variabilité. Le calcul de ces anomalies est réalisé à partir des températures maximales quotidiennes (TX), minimales quotidiennes (TN) ainsi que la température moyenne (Tm) et cette référence faite aux valeurs moyennes calculées pour la période 1989-2018.

1. Méthodes et données

1.1. Méthodes

On se propose, dans cette étude, d'examiner les anomalies thermiques positives aussi bien sur les maximas que sur les minimas quotidiens et ce référence faite à la normale climatique1989-2018. Nous avons aussi calculé les données maxi moyen et mini moyen pour l'étude de la variabilité interannuelle.

Quant à la définition des seuils de chaleur stressante, nous optons ici pour des seuils d'ordre physiologique. Pour caractériser un jour de chaleur stressante, généralement une valeur thermique pour une TX supérieure ou égale à 33°C est retenue. Le choix de ce seuil est motivé

par le fait que 33°C représente la température de la peau nue et qu'à partir de ce seuil l'homme au repos commence à ne plus pouvoir émettre toute sa chaleur (Besancenot 1990). Mais comme la chaleur est une constante du climat de la Tunisie, ce seuil semble convenir, relativement, aux facultés d'adaptation de la population, d'où on voit l'intérêt de le remplacer par 35°C qui constitue, à cet égard, une limite à partir de la quelle la chaleur est jugée stressante. Toutefois, pour caractériser une nuit chaude, nous retenons un seuil thermique couramment utilisé par les chercheurs pour la Tunisie. En effet, le seuil d'une TN supérieure ou égale à 20 est considéré comme un seuil à partir duquel une nuit est jugée tropicale (Ben Boubaker 2018).

1.2. Données

Pour mener à bien cette étude, nous avons considéré les observations quotidiennes des températures printanières, maximales diurnes (TX) et minimales nocturnes (TN), dans quatre stations météorologiques représentatives de topoclimats variés de la Tunisie (Fig.1). Ces données couvrent la période 1980-2018 et sont gracieusement fournies par l'Institut National de la Météorologie (INM).

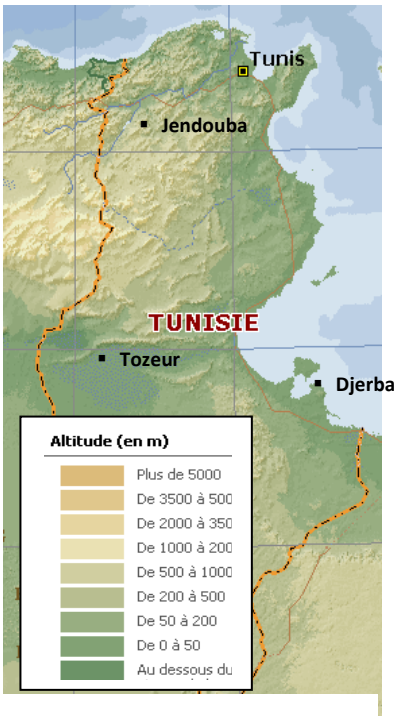


Figure 1. Carte de localisation des stations

2. Résultats

2.1. Des anomalies printanières positives très marquées sur les TX et les TN au cours des deux dernières décennies

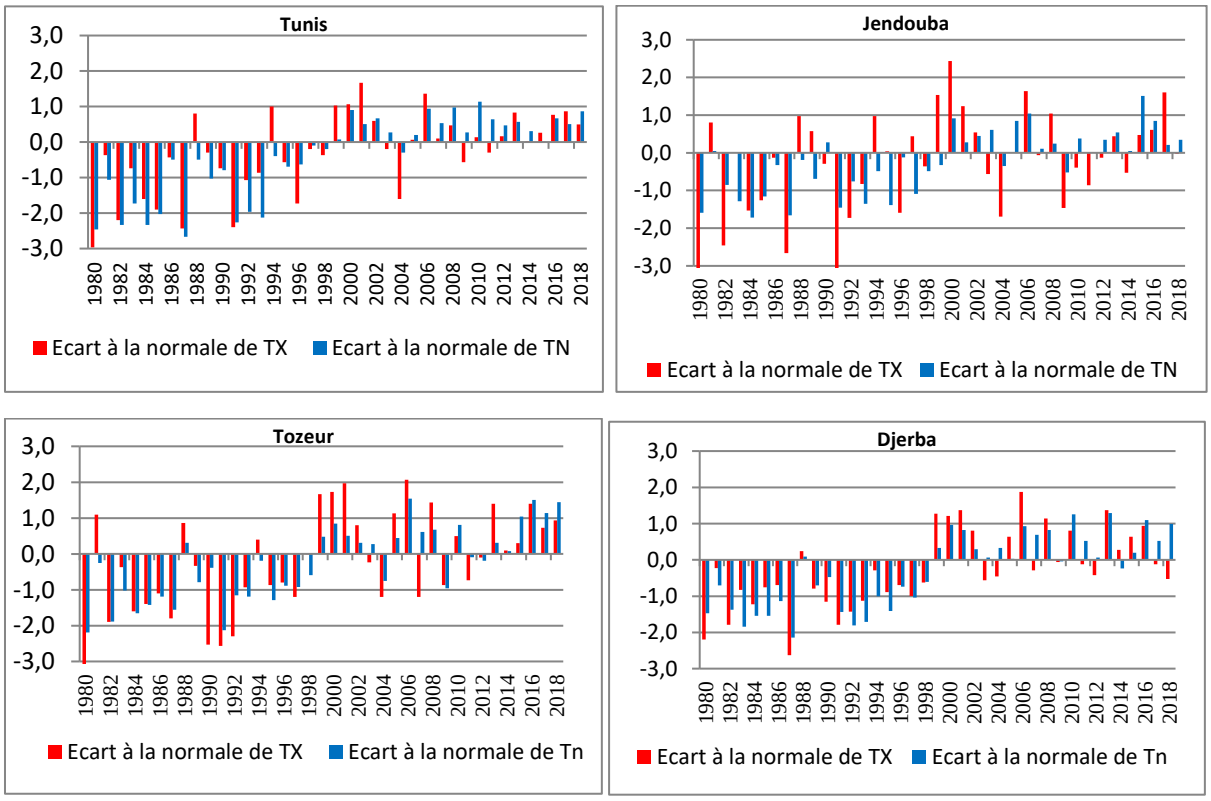
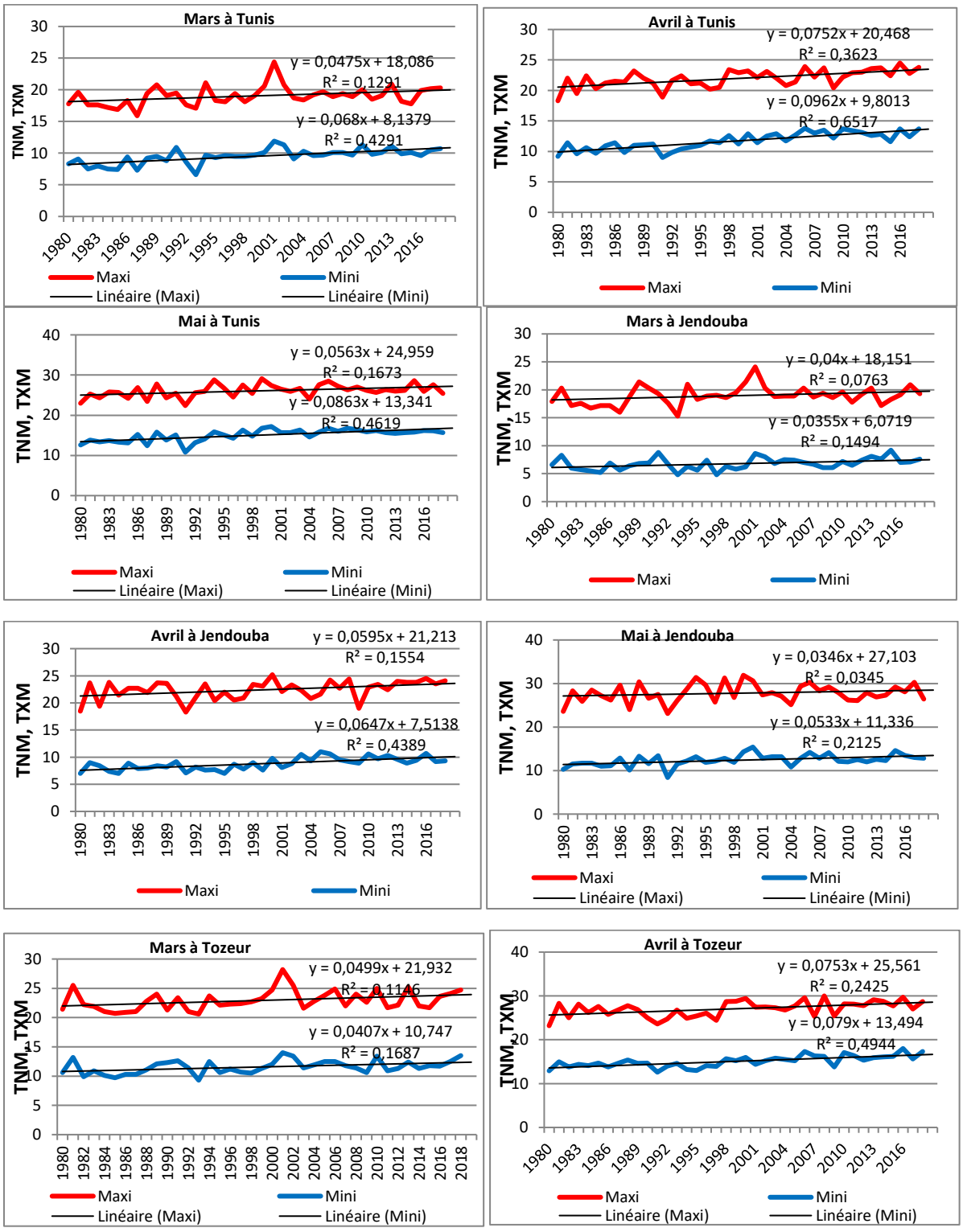


Figure 2. Ecart des températures printanières maximales et minimales à la normale (1989– 2018)

A l'échelle saisonnière, le printemps connait presque, continuellement, durant les deux dernières décennies des anomalies positives qui ont touché à la fois les températures maximales (TX) et minimales (TN) dans toutes les stations d'étude sans exception. La comparaison avec la normale climatique 1989-2018 permet de dégager des écarts à la moyenne qui dépassent 2°C et s'approchent, certaines années (2000), de 2 ,5°C à Jendouba.

2.2. Variabilité interannuelle des températures quotidiennes maximales et minimales moyennes



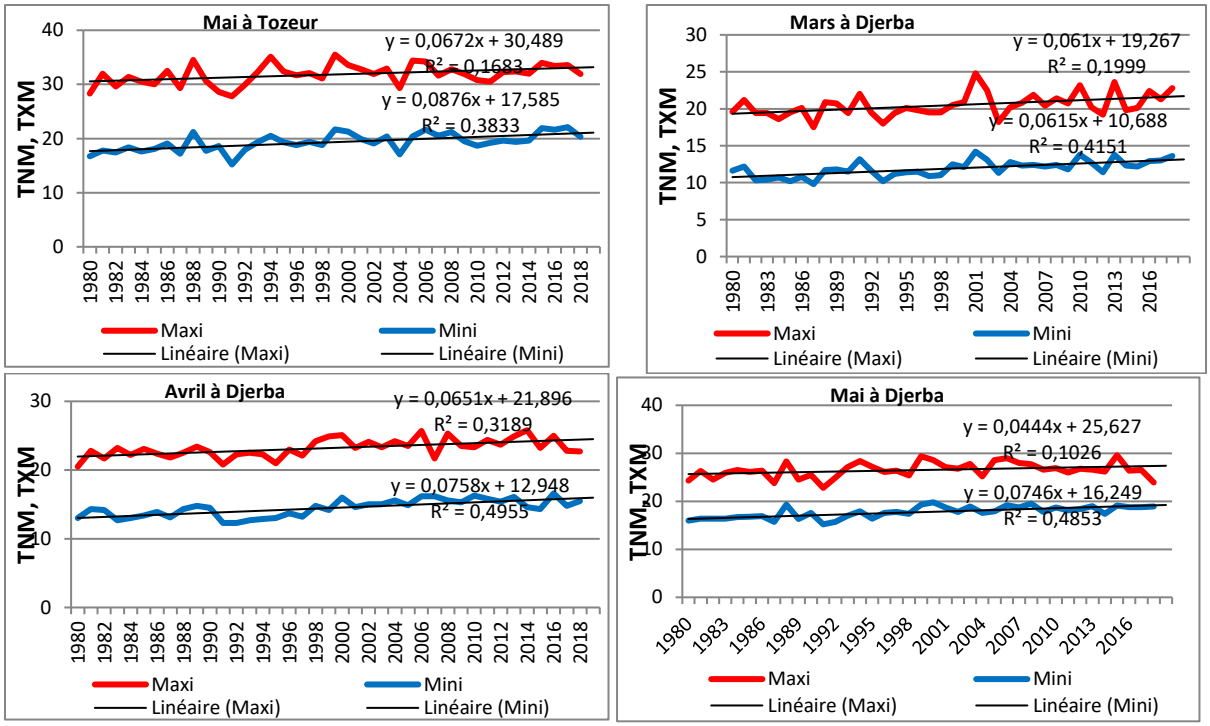


Figure 3. Variabilité interannuelle des températures quotidiennes, maximales et minimales moyennes des mois de mars, avril et mai entre 1980 – 2018.

L'analyse de la série des données disponibles des températures maximales et minimales moyennes montre une variabilité interannuelle parfois importante qui touche les différentes régions du pays. L'examen des courbes de tendances laisse apparaitre une tendance à la hausse généralisée. Cette tendance positive s'observe au niveau des températures maximales moyennes mais surtout au niveau des températures minimales moyennes nocturnes. Le mois d'avril, censé être le mois d'optimum thermique, semble être le plus touché par cette tendance au réchauffement comparativement aux autres mois du printemps. L'exemple du mois d'avril 2016 confirme cette tendance positive observée au cours des dernières années. En effet, les deux courbes des températures maximales et minimales du mois d'avril affichent un pic en 2016 dans toutes les stations retenues dans cette étude. Ce mois se montre comme le mois le plus chaud durant toute la période d'étude (1980 – 2018) dans les stations de Tunis, Jendouba et Tozeur et occupe la seconde position à Djerba, immédiatement après l'année 2006. La température moyenne était de 19,1°C à Tunis soit une anomalie de + 2,6°C et de 23,85 à Tozeur soit une anomalie de + 3,15°C.

Avec des coefficients de signification trop faible et qui sont toujours inférieurs aux valeurs affichées sur les tables de Fischer Snedecor, et en dépit d'une tendance qui est toujours positive, les modèles linéaires ne sont pas forcément les meilleurs car l'évolution des températures ne suit pas du tout une tendance linéaire. Il serait donc raisonnable de prendre un recul vis-à-vis de la fonction linéaire de tendance. A cet égard, d'autres méthodes de tendances figurent tel que la méthode de Pólya (binomiale négative) ou celle de Mann Kendall ; mais notre l'objectif, ici, n'est pas celui de tester la validation des modèles les mieux adaptés.

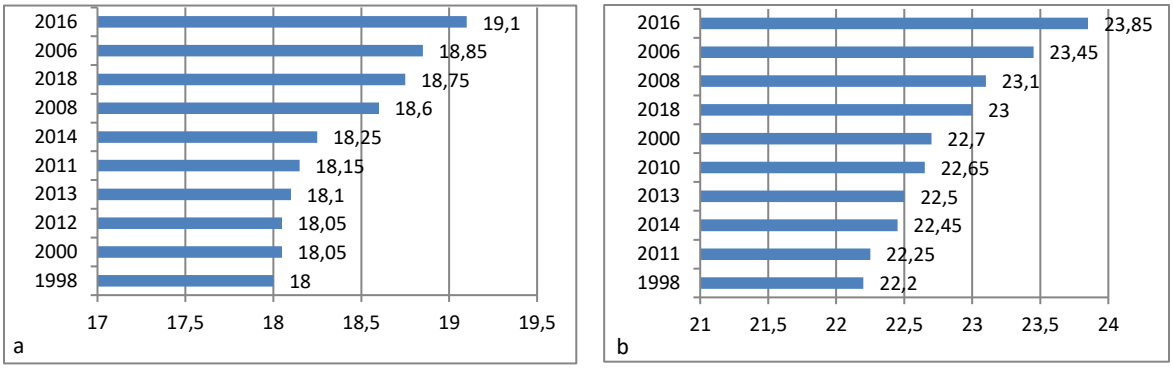
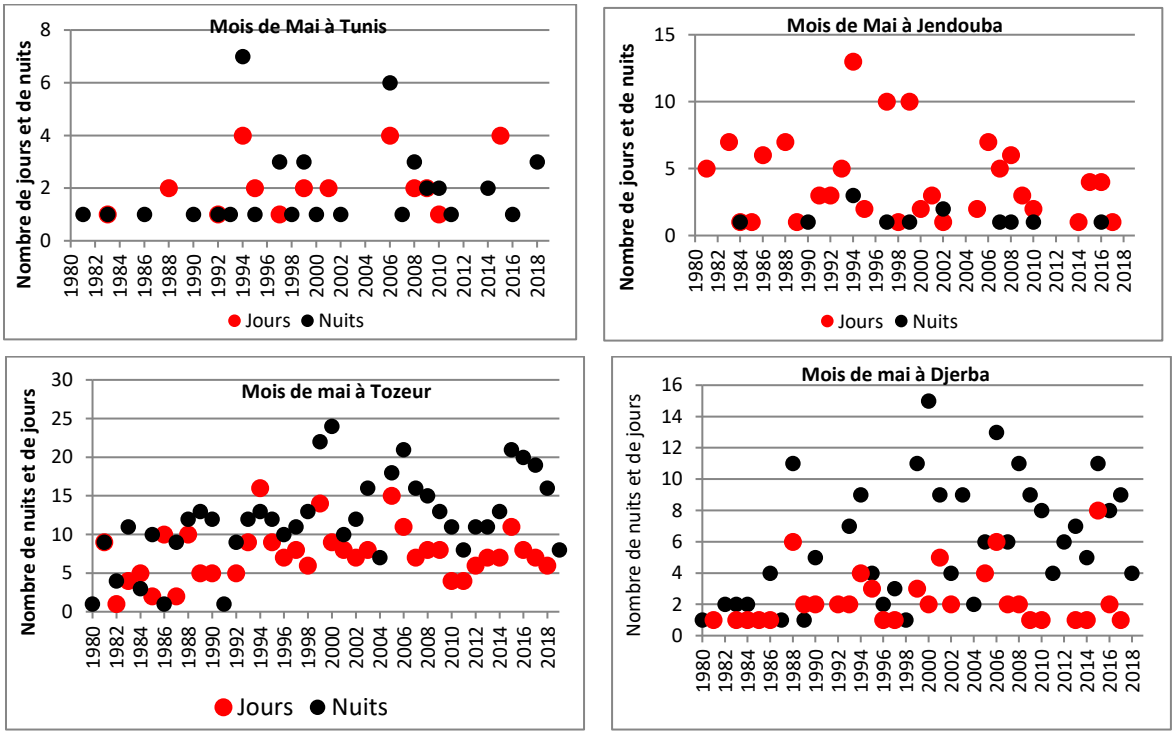


Figure 4. Dix années les plus chaudes de la période 1980 – 2018 à Tunis (a) et à Tozeur (b)

2.3 Occurrence des jours et des nuits de chaleur stressante

L'occurrence du nombre des jours et des nuits de chaleur élevée permet d'établir une nette distinction entre les stations situées au Nord de la Tunisie et celles situées au Sud. En effet, au Nord du pays, les nuits tropicales ne sont observables qu'au mois de mai. Elles prennent, toutefois, nettement le dessus à Tunis comparativement à Jendouba avec respectivement un total de 41 et 13 nuits pour la période 1980 – 2018. De surcroit, à Tunis, le nombre des nuits tropicales supérieures ou égales à deux voit sa part augmenter en passant de 3 cas entre 1994 et 1999 à 6 cas entre 2006 et 2018 contre aucune situation relevée antérieure à 1994 pour la série de référence 1980 – 2018. La situation s'inverse en ce qui concerne les jours où la température maximale quotidienne est supérieure ou égale à 35°C. Le nombre total de ces jours aux mois de mai atteint 116 à Jendouba pour la période d'étude contre 26 jours seulement à Tunis.



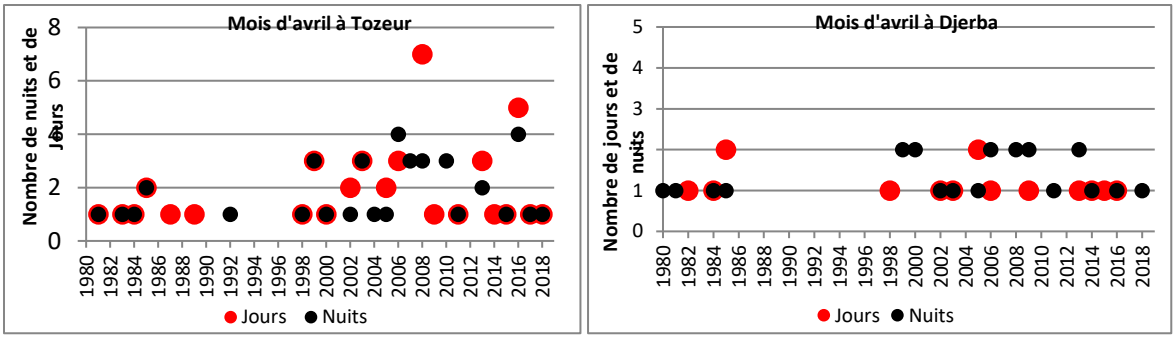


Figure 5. Occurrence du nombre de jours et de nuits de chaleur élevée en Tunisie (1980 – 2018)

Aux stations méridionales, le nombre des nuits et des jours de chaleur élevée est de loin supérieur à celui des stations septentrionales. A Tozeur, station saharienne de sud-ouest, deux remarques s'imposent. D'abord, une recrudescence des jours de chaleurs stressantes et des nuits tropicales au mois de mai et au mois d'avril notamment dans les deux dernières décennies. Le nombre des nuits tropicales au mois de mai, par exemple, a atteint ou franchi, la barre de 20 nuits aux années 1999, 2000, 2006, 2015 et 2016. Ensuite, le débordement des jours de chaleur stressante (≥ à 35°C) sur le mois d'avril où on a enregistré 43 jours.

A Djerba, en raison de l'influence maritime qui réduit la hausse des températures, le printemps est sensiblement moins stressant qu'à Tozeur mais il demeure, toutefois, plus éprouvant qu'aux stations septentrionales. Les nuits tropicales, par exemple, sont omniprésentes au mois de mai avec 216 nuits durant la période d'étude soit 17,1% du total des nuits. Leur part a considérablement augmenté lors des deux dernières décennies où elles représentent près du trois quart des nuits de mai (73,58%). La présence de ces nuits s'allonge jusqu'au mois d'avril où elles représentent 23 nuits durant la période d'étude dont 19 nuits caractérisent la période 1999 – 2018 contre 4 nuits seulement pour la période 1980 – 1998.

Conclusion

La chaleur élevée ne cesse de se multiplier et de s'exacerber au mois de mai. Elle a tendance au débordement au mois d'avril voire au mois de mars notamment aux stations méridionales. L'étude de la variabilité interannuelle des températures quotidiennes maximales et minimales moyennes durant près de 40 ans met en évidence un réchauffement plus marqué caractérisant surtout le mois d'avril et qui se manifeste par une augmentation de la température dans toutes les stations. Ceci permet de déduire que les températures stressantes sont de plus en plus fréquentes et qu'elles sont en train de prendre le dessus, progressivement, sur les températures clémentes ce qui laisse présager à des prémices de réchauffement de la saison printanière. L'ampleur de ce phénomène varie en fonction des mois et des régions.

Bibliographie

Ben Boubaker H., 2018. Les nuits tropicales en Tunisie. *Actes du XXXI colloque de l'AIC*, Nice, France, 68-73.

Ben Boubaker H., 2015. Tendance au débordement de la saison chaude sous climat méditerranéen chaud : exemples de canicules tardives automnales en Tunisie. *Actes du XXVIII colloque de l'AIC*, Liège, Belgique, 427-432.

Besancenot J.P., 1990. L'organisme humain face à la chaleur. Sciences et changements planétaires. *Sécheresse*, 1, 30-35.

Dahech S., 2010. Extension de la saison chaude et situation d'inconfort thermique extrême en fin d'été et début d'automne en Tunisie. *Actes du XXIII colloque de l'AIC*, Rennes, France, 149-154.

Kyung-Ja H., 2012. Climate change effects on tropical night days in Seoul, Korea. *Theoretical and Applied Climatology*, 109, 191-203.

CARACTERISTIQUES HORAIRE ET SAISONNIERE DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN DE FLORIANÓPOLIS (SUD DU BRÉSIL)

ROCHA G.[1], DUBREUIL V.[2], MENDONÇA F.[3]

1 Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil (geisarochageo@gmail.com)
2 LETG-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, Rennes, France (vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)
3 Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil (chico@ufpr.br)

Résumé : *Ce travail fait partie d'une thèse de doctorat qui étudie l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Florianópolis, État de Santa Catarina, dans le sud du Brésil. Considérée comme une ville de taille moyenne avec environ 500,000 habitants, elle possède la majeure partie du territoire municipal situé sur une île. L'objectif de cet article est de caractériser la variabilité thermique et l'intensité de l'ICU dans la zone d'étude. Pour cela, des données de 15 points d'enregistrement ont été utilisées, comprenant des stations météorologiques complètes et des capteurs de température, de juillet 2018 à août 2019. Deux points de référence ont été sélectionnés, l'un inséré dans la zone urbaine centrale et l'autre dans un environnement de caractéristiques rurales. La comparaison montre que l'évolution de l'ICU varie en fonction de l'heure et de la saison. Les résultats indiquent que le développement de l'ICU se produit pendant la nuit, les plus grandes amplitudes de l'ICU étant enregistrées à l'aube. Pendant les mois les plus froids, avec moins de précipitations et moins de vitesse du vent, la différence entre le point urbain et rural est en moyenne de 2°C.*

Mots clés : *îlot de chaleur urbain ; intensité et variabilité thermiques ; environnement côtier*

Summary: ***Hourly and seasonal characteristics of the urban heat island of Florianópolis (southern Brazil).*** *This work is part of a doctoral thesis that studies the urban heat island (UHI) in Florianópolis, state of Santa Catarina, southern Brazil. Considered to be a medium-sized city with about 500 thousand inhabitants, it has most of the municipal territory located on an island. The objective of this article was to characterize the thermal variability and the intensity of the UHI in the study area. For this, 15 record points were used, including complete weather stations and temperature sensors, from July 2018 to August 2019. Two reference points were selected, one inserted in an urban area and the other in an environment with rural characteristics. The comparison showed that the evolution of the UHI varies according to the hours and season. The results indicate that the development of the UHI occurs overnight, with the highest magnitudes of the UHI being recorded at dawn. In the colder months, with less precipitation and less wind speed, the difference between the urban and rural point averages 2ºC.*

Key words: *urban heat island; thermal intensity and variability; coastal environment*

Introduction

Le climat urbain fait l'objet de nombreuses études dans le domaine de la climatologie depuis le XXe siècle, la plupart des recherches se focalisant sur les impacts thermiques, notamment le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Au Brésil, ces dernières années, il y a eu une augmentation de l'intérêt et de ces études dans les villes petites et moyennes (AMORIM, *et al.*, 2015 ; GOMES, *et al.*, 2017), y compris celles situées sur la côte, là où se trouve la majorité de la population du pays.

Ce travail étudie Florianópolis (Fig.1), dont une grande partie du territoire (environ 97%) est située sur une île. L'estimation de la population en 2019 a indiqué que Florianópolis, capitale de l'Etat du Santa Catarina, compte plus d'un demi-million d'habitants (500,973). En été, cette ville économiquement dépendante des activités touristiques, triple sa population. Le climat de la région est considéré comme subtropical de l'hémisphère sud : selon DUBREUIL *et al.* (2019), les années de type Cfa selon la classification de Köppen[1] représentent 65% des années contre 6% pour les types A, 22% pour les types Cwa et 7% pour les types Csa. En l'absence d'une véritable saison sèche, Florianópolis connaît une distribution régulière des précipitations tout au long de l'année, avec des totaux plus élevés en janvier et plus faibles en août. Les

[1] Cfa : climat tempéré, sans saison sèche et été chaud ; Cwa : climat tempéré avec été chaud et humide ; Csa : climat tempéré avec été chaud et sec.

températures les plus élevées sont enregistrées en février, avec une moyenne de 29.3 ºC et les plus basses en juillet, avec une moyenne de 12.9 ºC.

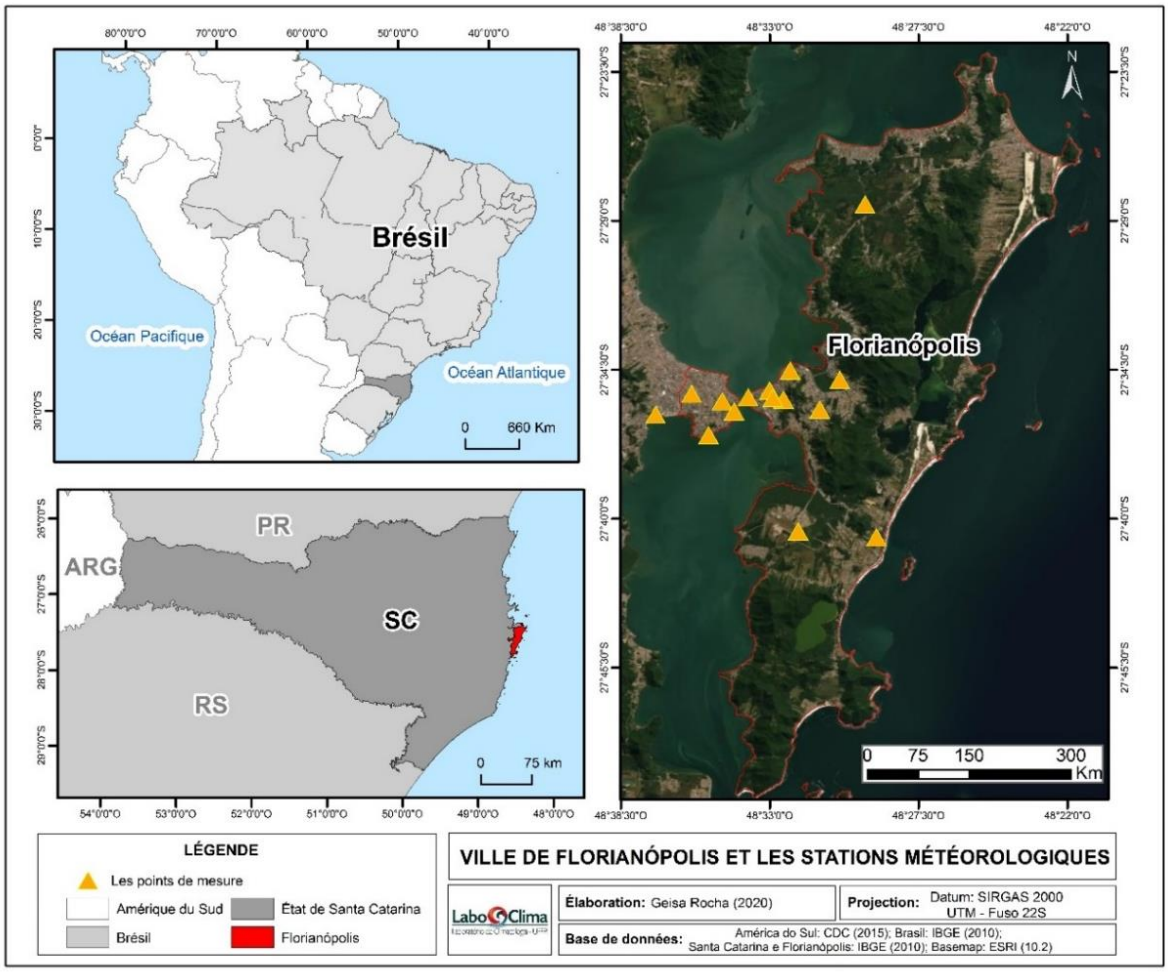


Figure 1. Localisation de la ville de Florianópolis et des stations météorologiques utilisées

Des études antérieures ont montré l'influence de l'utilisation des terres et de l'urbanisation sur le climat local (MONTEIRO, 1990; SOUZA, 2013), et les résultats préliminaires portant sur une période de deux mois (Août et Septembre 2018) ont mis en évidence la présence d'un ICU dans la péninsule centrale et continentale, montrant jusqu'à 6°C de différence thermique entre le centre-ville et la campagne (ROCHA *et al.*, 2019).

1. Données et méthodes

1.1. Base de données

Pour ce travail, nous avons utilisé 15 séries de mesures pendant une période d'un an, d'août 2018 à juillet 2019 : six stations automatiques *Davis Vue* et cinq capteurs *TinyTag* ont été installés, en plus des stations existantes appartenant à des organismes institutionnels (UFSC, IFSC, INMET et EPAGRI): au total cinq points de mesures sont situés sur le continent et dix dans la partie insulaire de l'agglomération. Les points de mesure ont été disposés sur la base d'études antérieures sur les différences d'utilisation des terres, il y a donc des points dans les zones plus denses de la ville et un autre dans la zone rurale.

Pour analyser les caractéristiques de l'îlot de chaleur, deux stations de référence ont été choisies, l'une insérée en milieu majoritairement urbain et l'autre en milieu rural (Fig.2).

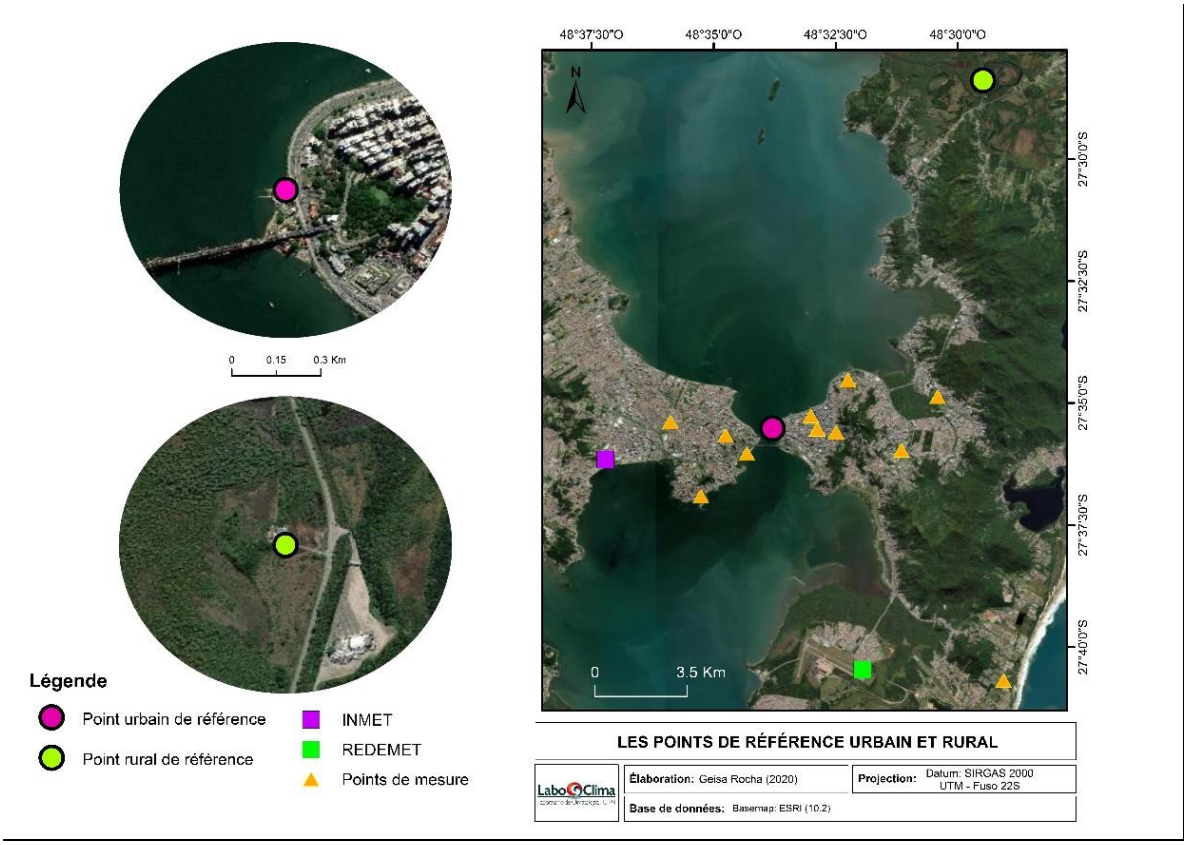


Figure 2. Stations météorologiques de référence urbaine et rurale à Florianópolis

La station du point urbain de référence située à 1 m d'altitude, est la plus proche de la mer, à 24 m de la plage. Elle est située à côté d'une avenue de circulation automobile intense et la zone urbaine environnante est constituée d'immeubles résidentiels d'une moyenne de 12 étages. Bien qu'étant proche de la mer, le choix s'est porté sur cette station car elle est située au centre de la zone urbanisée, dans un environnement littoral très représentatif de la ville de Florianópolis et parce qu'il s'agissait de la station qui présentait les valeurs d'intensité les plus élevées de l'ICU.

Pour représenter l'environnement rural (le point rural de référence), la station météorologique de la Société de Recherche Agricole et d'Extension Rurale de Santa Catarina (EPAGRI) a été choisie : elle est située dans le nord de l'île de Santa Catarina, au sein de la station écologique "Carijós", où prédomine l'écosystème de la mangrove. Elle est à environ 3,5 km de la mer et à 14 km du centre-ville.

Les deux stations ont enregistré des températures instantanées, maximales et minimales toutes les heures (soit environ 28,000 enregistrements pour chaque station). Pour le calcul de l'intensité de l'ICU, nous avons soustrait les valeurs de températures du point de référence de l'environnement rural des valeurs de température du point urbain, c'est à dire ΔT = Urbain - Rural. Les données ont été organisées dans une feuille de calcul Excel, qui a également été utilisée pour des calculs statistiques.

2. Résultats

2.1. Variabilité thermique sur la période

Au cours de la période d'observation (Fig.3), la température moyenne maximale la plus élevée des deux stations a été observée pendant le mois de Janvier, avec 32.7 ºC pour la station urbaine et 31.9°C pour la station rurale, soit une différence 0.8 ºC entre elles.

La température minimale moyenne la plus basse a été enregistrée en Août 2018, avec 14.1°C pour la station urbaine et 10.3°C pour la station rurale, soit une différence de 3.8°C. De manière générale, l'ensemble de l'année 2018-2019 a été une année plus chaude que la normale, puisque la température maximale moyenne était 26.6ºC, 1.5ºC de plus, et la minimale était 19.8, 2.4ºC au-dessus de la normale. De plus, l'année a été légèrement moins arrosée, il a plu environ 268 mm de moins que la normale soit 1768.6.

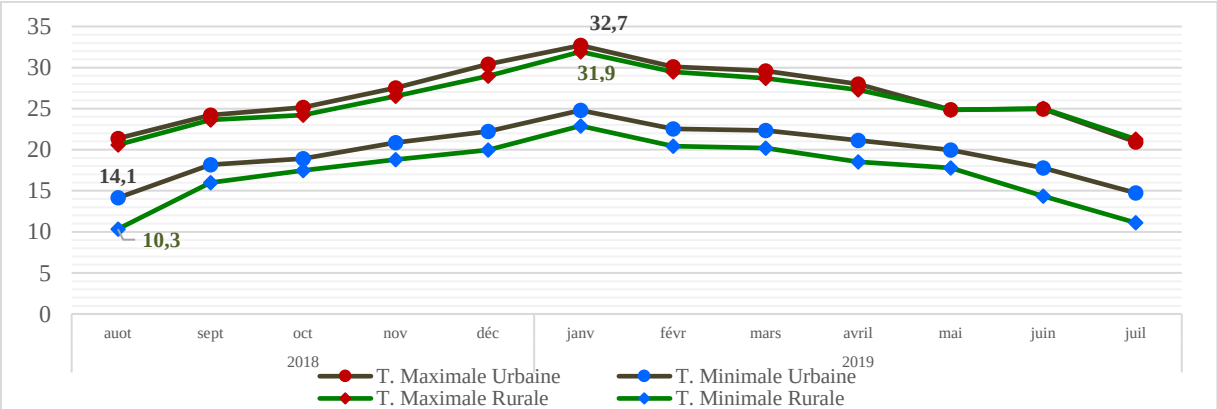


Figure 3. Variation thermique des températures maximales et minimales des stations urbaines et rurales à Florianópolis en 2018-2019

2.2. Variation saisonnière de l'intensité de l'ICU

L'intensité moyenne de l'ICU au cours de la période (1 an) était de 2.5°C, avec des valeurs plus élevées en hiver et en automne. Amorim et Dubreuil (2017) ont trouvé la même saisonnalité pour la ville de Presidente Prudente – Brésil. Mendonça (1995), en revanche, a trouvé un ICU à Londrina (Paraná) plus élevé en hiver et en été, avec des intensités allant jusqu'à 7 ºC.

La figure 4 montre comment l'intensité de l'ICU varie en fonction de la pluviométrie (relevés à la station de l'Institut National de Météorologie - INMET) et la vitesse moyenne du vent (km/h) (relevés à la station de la Réseau Météo de Commande Aéronautique – REDEMET, aéroport SBFL). En l'absence de mesures de nébulosité, on considère ici la pluviométrie comme un indicateur inverse et indirect des conditions radiatives favorables à l'ICU. Les trois mois qui ont connu le plus fort ICU moyen correspondent aux mois d'hiver (juin, juillet et août) mais surtout ceux ayant connu les plus faibles totaux pluviométriques. Pour ces trois mois, l'ICU moyen dépasse 3°C et les pluies sont inférieures à 80mm. De septembre à mai, les précipitations sont plus élevées et l'ICU devient proche ou inférieur à 2°C : c'est notamment le cas en octobre, janvier et février. Pendant l'automne, l'ICU moyen est légèrement plus marqué en mai qu'en avril du fait de la plus forte pluviométrie observée en mai. Si les conditions littorales pluvieuses et nébuleuses sont a priori peu favorables au développement d'un fort ICU à Florianópolis, elles permettent cependant au phénomène de bien se développer lors de la saison la moins arrosée.

La relation entre ICU et vent moyen est plus complexe : certes, juin, juillet et août sont des mois où la vitesse moyenne du vent est plus faible que la moyenne et l'ICU le plus faible est bien observé pendant les mois où le vent est le plus fort (d'octobre à février). Pendant la saison des pluies, d'octobre à mai, l'intensité moyenne de l'ICU augmente légèrement, au fur et à mesure que la vitesse du vent diminue. En septembre, la faible vitesse moyenne du vent observé ne permet pas le développement d'un fort ICU en raison des fortes pluies enregistrées au cours de ce mois.

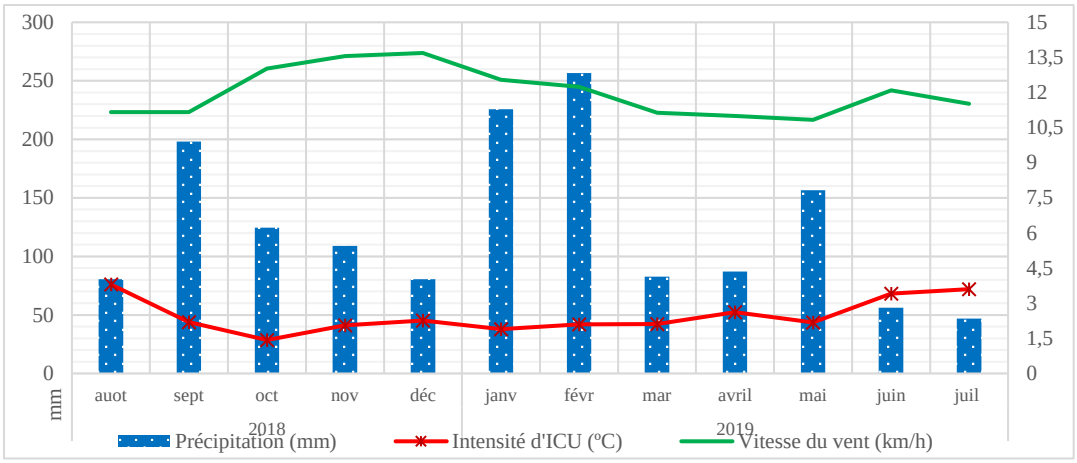


Figure 4. Précipitations, intensité de l'ICU, vitesse et direction du vent à Florianópolis en 2018-2019

Ainsi, une relation inverse entre l'intensité de l'ICU et la vitesse du vent peut être observée, ce qui est une caractéristique standard observée dans le développement du phénomène de l'ICU, car le vent contribue à la dissipation de la chaleur.

2.3. Dynamique horaire de l'ICU

La figure 5 montre la variation horaire moyenne de la température à chaque heure de la journée (ΔT = Urbain - Rural), il est donc possible d'identifier l'évolution quotidienne de l'ICU sur l'ensemble de la période 2018-2019. Il apparaît que les intensités les plus élevées des îlots de chaleur ont été enregistrées principalement pendant la nuit, lorsque la différence T°C urbaine-T°C rurale dépasse 1.5°C à 20h, après quoi elle reste au-dessus de ce niveau jusqu'à 8h du matin en passant par un maximum observé vers 6h (2.1°C) et, occasionnellement, des valeurs supérieures à 3°C sont observées vers 7h du matin. De même, il est possible de remarquer que l'ICU a une intensité plus élevée en hiver (août) qu'en été (janvier).

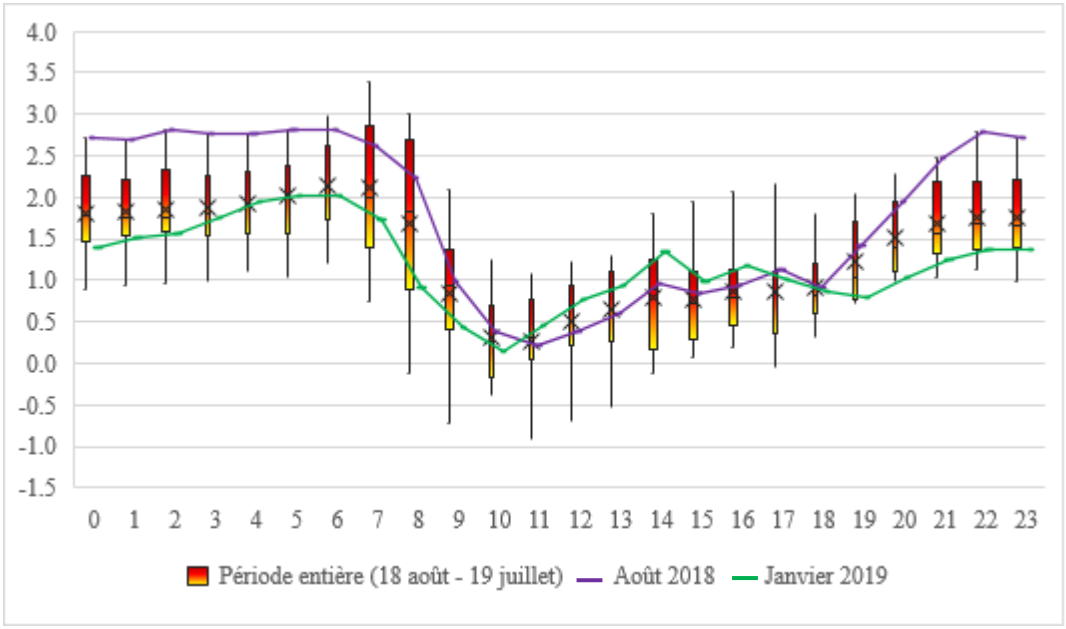


Figure 5. Box plots horaires de l'intensité de l'ICU en 2018-2019 et valeurs moyennes pour août (violet) et janvier (vert)

Conclusions et Discussion

Compte tenu de l'intensité moyenne de l'ICU (2.5°C) au cours de la période et de la classification de Fernández García (1996), Florianópolis présente un îlot de chaleur de moyenne amplitude. Les caractéristiques générales de la température, complétées par des données sur les précipitations, la direction et la vitesse du vent, ont montré que l'ICU se développe avec une plus grande ampleur dans les périodes d'atmosphère plus stable, avec moins de précipitations et une vitesse du vent plus faible, c'est à dire pendant les mois d'hiver austral. En outre, on peut observer que l'ICU a une plus grande importance pendant la nuit et jusqu'à l'aube, atteignant la plus forte intensité à 6 heures du matin. Des analyses ultérieures sur des épisodes particuliers combinées à une étude plus approfondie du vent, notamment l'effet des brises marines, pourront montrer les conditions synoptiques qui permettent le développement de ce phénomène de climat urbain dans une ville avec ces particularités, côtière et insulaire.

Remerciements

Á la CAPES (Coordination de l'amélioration du personnel de niveau supérieur) pour la bourse de doctorat et à EPAGRI-CIRAM pour les données de la station rurale. Projet CAPES-COFECUB, CiClAMEn, Sh 941/19 *(Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies)*.

Bibliographie

Amorim M. C. C. T., Dubreuil V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, v. 5, n. 4, p.91.

Amorim M.C.C.T., Dubreuil V., Cardoso R., 2015. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*. (16) 29-45.

Dubreuil V., Fante K.P., Planchon O., Sant'Anna Neto J.L., 2018 : Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*. v.39, n°3, 1446-1456.

García F.F., 1996. *Manual de Climatologia Aplicada: Clima, Medio Ambiente y Planificación*, 1st ed.; Editorial Síntesis: Madrid, Spain.

Gomes W. P., Amorim M. C. C. T., Dubreuil V., 2017. Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. *Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo*, v. 34, p.82.

Mendonça F., 1995. *O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno. Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR*. Tese de doutorado em Geografia da Universidade de São Paulo, Brésil.

Monteiro C.A.F., 1990. O campo térmico na cidade de Florianópolis: primeiros experimentos. *Revista GEOSUL*, nº 9 - Ano V. Florianópolis.

Rocha G. S., Dubreuil V., Mendonça F.A., 2019. Résultats préliminaires de l'étude de l'ilot de chaleur urbain à Florianópolis (Brésil). XXXIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.

Silveira R. B., Passos M., Murara P., 2012. Estudo de Caracterização da Direção Predominante dos Ventos no Litoral de Santa Catarina. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica*, 380–392.

Souza F.R., 2013. *Estudo de fatores explicativos urbanos da distribuição da temperatura no centro de Florianópolis/SC.* 2013. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis. 252p.

Wahrlich J., Silva F. A. Da; Campos C. G. C., Rodrigues M. L. G., Medeiros J., 2018. Characterization Of The Predominant Wind Speed And. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 23, 356–373.

COOLPARKS: AIDE A LA CONCEPTION DE PARCS ET DE FORMES URBAINES POUR OPTIMISER LE RAFRAICHISSEMENT URBAIN

RODLER A.[1,5], BERNARD J.[2], MORILLE B.[3,4], BODENAN P.[4,5], GUERNOUTI S.[1,5], MUSY M.[1,5]

1 Cerema, Equipe-Projet BPE, France (auline.rodler@cerema.fr)
2 Chercheur associé au LAB-STICC, Université de Bretagne Sud, France
3 Chercheur associé au Crenau, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, France
4 Soleneos, France
5 L'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV), Ecole Centrale de Nantes, France

Résumé : *Les projections climatiques des prochaines décennies prévoient des périodes de canicule plus longues et plus fréquentes qui seront exacerbées en ville par le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU). Un des enjeux des nouveaux aménagements urbains est d'intégrer des mesures pour atténuer l'intensité de l'ICU en ayant recours au végétal et à l'eau. Ainsi, les parcs urbains offrent une source importante de fraîcheur. Les effets de ces aménagements varient largement selon leur type, leur proportion, leur répartition, leur mode de gestion et l'environnement urbain dans lequel ils sont implantés. Aussi, la fraîcheur générée se diffuse différemment dans les alentours proches du parc selon la morphologie des quartiers qui l'environnent. Le projet de recherche Coolparks, présenté dans cet article, interroge ces problématiques. Son objectif est de concevoir un outil simple à mettre en œuvre, permettant aux collectivités locales de concevoir conjointement les parcs et les quartiers environnants, en considérant leurs interactions réciproques, pour optimiser le rafraîchissement urbain et la réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments.*

Mots clés : *ICU ; canicules ; morphologie urbaine ; parc urbain ; consommations énergétiques des bâtiments*

Summary: Coolparks: ***a tool to assist the designing of parks and urban shapes to optimize urban cooling.*** ***Climate*** *projections for the next decades predict heat waves, which will be intensified in cities due to the Urban Heat Island (UHI) effect. To mitigate the UHI, new urban planning projects look forward to integrate more solutions based on vegetation and water. Thus, urban parks can generate cooled air but the amount of freshness created will depend on the park's constitution and proportion of each element and the urban environment surrounding the park. In addition, the cooled air will be spread differently in the surroundings depending on the urban district's morphology. The interaction between the urban morphology and the urban park will be considered in the CoolParks project. The aim of this project is to develop a tool for local communities to design urban parks and the surrounding districts with the aim to optimize urban cooling and reduce the buildings' energy consumption.*

Key words: *UHI; heat wave; urban morphology; urban park; building's energy consumption*

Introduction

Les projections climatiques des prochaines décennies prévoient des périodes de canicule qui seront plus longues, plus intenses et plus fréquentes (GIEC, 2014). Le phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) exacerbe les effets des périodes de canicule si bien que, les risques d'inconfort thermique, les risques sanitaires et les risques de surconsommations énergétiques estivales seront particulièrement importants en milieu urbain.

Un des enjeux des nouveaux aménagements urbains est donc d'intégrer des mesures pour atténuer l'intensité de l'ICU. Le recours à des "espaces verts" (zones humides naturelles, réseaux de parcs urbains, toits végétalisés, etc.) fait partie des solutions envisageables (Lewis, 2016). Ces dernières années, plusieurs grands projets de végétalisation ont vu le jour en France comme par exemple le projet Claude Bernard Mc Donald (Mairie de Paris, 2009) dans le XIXe arrondissement qui avait pour but de créer de nombreux espaces végétalisés dans des quartiers existants - forêt linéaire entre le quartier et le boulevard du périphérique. Les villes s'intéressent aussi de plus en plus à la mise en place de solutions de végétalisation et de désimperméabilisation des sols pour une meilleure gestion des eaux de pluie et du climat urbain.

Cependant, les effets de l'eau et de la végétation varient largement selon leur type (végétation haute et basse, eau stagnante ou mobile, etc.), leur proportion, leur répartition, leur mode de gestion et l'environnement urbain dans lequel ils sont implantés. Les parcs urbains sont, de par leur très fort taux de végétalisation, une source importante de création de fraîcheur. Cette dernière se diffuse différemment dans les alentours proches du parc selon la morphologie des quartiers qui l'environnent.

De nombreuses études expérimentales existent sur l'effet de rafraîchissement des parcs mais peu étudient l'influence de la forme urbaine sur le processus de diffusion de la fraîcheur. De plus, la plupart d'entre elles sont des études expérimentales qui limitent l'investigation à des configurations fixes et à des espaces restreints. Par ailleurs, la modélisation numérique des phénomènes physiques régissant le micro-climat urbain permet de diagnostiquer le phénomène d'ICU à l'échelle d'une ville et également les variations micro-climatiques au sein d'un quartier. A l'inverse des études expérimentales, ces approches numériques permettent une exploration spatiale plus vaste et la possibilité d'augmenter le nombre des configurations étudiées en faisant notamment varier les caractéristiques des parcs et de la forme urbaine. Néanmoins, les outils numériques permettant de quantifier l'influence des parcs sur le rafraîchissement urbain sont peu nombreux, leur mise en œuvre est souvent complexe et demande une expertise qui n'est souvent pas maîtrisée par les aménageurs.

Dans ce contexte, l'objectif du projet de recherche CoolParks[1], est d'élaborer un outil simple permettant aux collectivités locales de concevoir conjointement les parcs et les quartiers environnants, en considérant leurs interactions réciproques, pour optimiser le rafraîchissement urbain.

Dans une première partie, les résultats obtenus dans une étude préliminaire utilisant des approches numériques simplifiées (Bernard *et al.*, 2018) sont présentés. La seconde partie traite des objectifs et de la méthodologie du projet CoolParks.

1. Étude préliminaire

Afin de quantifier les impacts d'un parc sur le rafraîchissement de son environnement urbain nous avons mené une étude préliminaire (Bernard *et al.*, 2018) en utilisant une approche numérique simplifiée. L'outil de mécanique des fluides numérique Code-Saturne a été utilisé avec prise en compte des forces de flottabilité afin de quantifier les relations entre indicateurs morphologiques (hauteur de bâtiment, densité de bâtiment, rapport d'aspect, largeur de rue, largeur de bâtiments), vitesse de vent et diffusion de la fraîcheur pour des parcs de dimensions différentes. Dans le cadre de cette étude paramétrique, plusieurs hypothèses ont été considérées (Bernard *et al.*, 2018) :

Nous avons imposé un flux de chaleur de -300 W/m² au niveau de la surface correspondante au parc. Cela correspond à une amplitude maximale d'une différence de flux de chaleur sensible mesurée à midi entre une zone très végétalisée et une zone très minéralisée (McPherson, 1994; Rodriguez, 2015).

Les autres surfaces urbaines sont considérées neutres du point de vue thermique. Leur unique influence est donc du point de vue aéraulique : elles forment un obstacle à l'écoulement de l'air uniquement. Cela signifie qu'il n'y a pas de couplage thermo-aéraulique entre les surfaces urbaines et l'air. La température d'air extérieur est fixée à 35°C, ce qui correspond à des conditions caniculaires.

[1] *CoolParks* est un projet financé par l'ADEME. Le consortium est constitué de Jérémy Bernard, Soleneos et le Cerema Ouest (Equipe BPE).

La distance entre l'isotherme où 1°C de différence est constaté et les bords du parc est calculé, ce qui nous permet d'obtenir la surface de fraicheur générée par le parc. Cette isotherme de 34°C à 2 m de hauteur est tracée entre chaque simulation pour comparer la taille de la zone rafraîchie. L'indicateur de performance utilisé est la surface couverte par cette zone, la surface de rafraichissement.

Plusieurs scénarios d'aménagement de l'espace alentour au parc ont été élaborés afin d'évaluer l'influence des caractéristiques morphologiques d'un quartier sur son rafraîchissement (Bernard *et al.*, 2018). Ces scénarios sont décrits quantitativement par des indicateurs morphologiques dont les valeurs sont présentées dans le tableau 1. La densité des bâtiments, D_B étant la surface des bâtiments divisée par la surface totale du quartier. Le rapport d'aspect H/W, est la hauteur des bâtiments divisée par la largeur des rues.

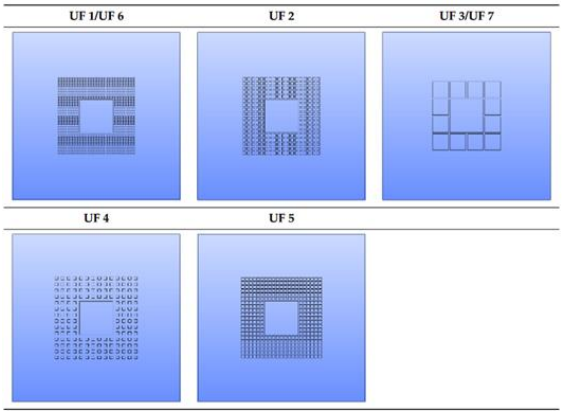


Figure 1. Formes urbaines

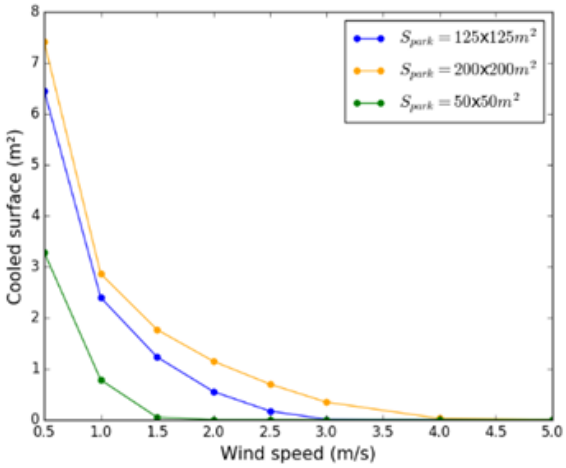


Figure 2. Surface de rafraîchissement pour différentes vitesses de vent

Tableau 1. Scénarios de simulations basés sur différents indicateurs morphologiques (UF étant les formes urbaines (Bernard *et al.*, 2018))

UF	Height (m)	Building Width (m)	Street Width (m)	D_B (%)	H/W	Number of Buildin
1	10	8	8	25 (low)	1.25	672
2	10	18	8	48 (medium)	1.25	260
3	10	96	8	85 (high)	1.25	12
4	10	18	18	25 (low)	0.56	160
5	10	18	5	95 (high)	2.00	360
6	17	8	8	25 (low)	2.12	672
7	4	96	8	85 (high)	0.50	12

1.1. Effet de la taille du parc et de la vitesse du vent

Afin de quantifier l'effet de la taille de parc et de la vitesse du vent sur le potentiel de rafraîchissement, plusieurs simulations ont été réalisées pour différentes conditions de vent et de dimensions de parc (des parcs carrés de largeur 50, 100 et 200 m). Pour ces simulations aucune construction adjacente au parc n'a été considérée et la surface rafraîchie correspond à une réduction de la température de l'air de 1°C par rapport à la température initiale de 35°C à 2m au-dessus du sol.

Nous observons sur la Figure 1 que :

- Plus le parc est grand plus la surface rafraîchie est grande, ce qui semble intuitif. La distribution de la fraicheur dans son environnement peut être trouvée dans Bernard *et al.* (2018).
- La surface rafraîchie est plus grande lorsque la vitesse de vent est faible. Ceci est moins évident et s'explique par le fait que l'air traverse doucement le parc et a donc le temps "d'accumuler de la fraîcheur" du fait de l'hypothèse du flux négatif constant qui lui est appliqué (ce qui représente une limite réelle de cette étude).

1.2. Effet de la morphologie du quartier

Le parc de dimension 200 m x 200 m a été utilisé pour l'étude morphologique du quartier. L'analyse des résultats obtenus suite aux simulations présentées dans le tableau 1 permet les observations suivantes :

- Effet de seuil de la hauteur des bâtiments : lorsque les bâtiments sont de petites tailles, l'air frais est transporté au-dessus des bâtiments et à travers les rues. Plus les bâtiments sont hauts, plus le passage de l'air se concentre dans les rues, augmentant par conséquence la taille de la zone rafraîchie. Au-delà d'une certaine hauteur de bâtiments, l'air frais ne peut plus franchir les bâtiments. Il est donc seulement canalisé par les rues. Il en résulte alors que toute augmentation de hauteur de bâtiment au-delà de ce seuil n'a donc plus d'influence (Bernard *et al.*, 2018).
- Effet de la densité des bâtiments : nous avons augmenté la densité de bâtiment en agissant soit sur la dimension du bâtiment, soit sur la largeur des rues. Dans le premier cas nous avons observé que la surface rafraîchie diminuait lorsque la densité de bâtiment augmentait. Pour le deuxième cas, lorsque la densité des bâtiments augmentait en augmentant la largeur des rues, la surface rafraîchie augmentait. Contrairement à ce qu'on aurait pu attendre, l'effet de la densité des bâtiments n'est donc pas un indicateur suffisant pour décrire la diffusion de la fraîcheur.
- Effet du rapport d'aspect : à densité et hauteur de bâtiments constants et pour une vitesse de vent donnée, la surface rafraîchie augmente lorsque le rapport d'aspect augmente (Bernard *et al.*, 2018). Cet indicateur est donc à explorer.
- Effet du nombre de bâtiments : la surface rafraîchie semble fortement corrélée au nombre de bâtiments mais peu à la largeur des rues (Figure 3).

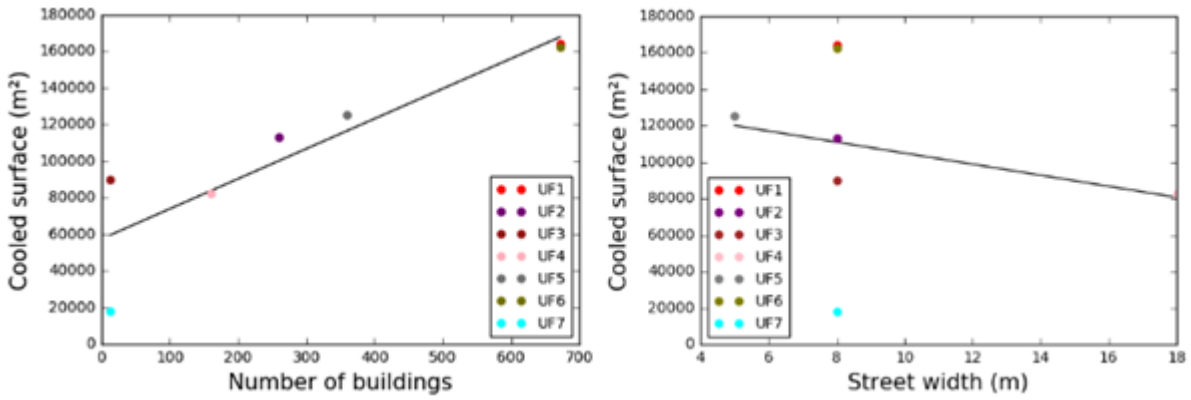


Figure 3. Surface rafraîchie fonction (a) du nombre de bâtiments (b) de la largeur des rues

1.3. Limites de l'étude préliminaire

Dans ce travail préliminaire nous avons fait plusieurs hypothèses simplificatrices :

- Le parc est considéré comme une surface végétale uniforme. La quantification des effets thermiques engendrés par l'utilisation d'un élément naturel en particulier (arbre, pelouse, lac, etc.) ou de la combinaison de plusieurs de ces éléments (par exemple arbre au-dessus de pelouse) n'a pas été abordée.
- Si le flux est constant, le parc peut être perçu comme un « puits de fraîcheur infini ». Cependant, le flux devrait être considéré comme variable, évoluant au cours de la journée en fonction de l'écart de température entre les surfaces urbaines et l'air et également de la vitesse du vent.
- Aucune validation expérimentale de ces résultats n'a été réalisée.

Le travail envisagé dans le cadre du projet *CoolParks* permettra d'approfondir ces premières observations en reconsidérant nos hypothèses simplificatrices et de mener des campagnes expérimentales pour confronter les résultats de simulation à des données observées.

2. Méthodologie du projet CoolParks

La méthode et les éléments qui ont été investigués dans l'étude préliminaire seront améliorés et complétés (Fig.4). En résumé, nous allons dans le cadre de ce projet :

- quantifier le rafraîchissement généré par un parc au vu des éléments qui le composent (arbres, pelouse, bassins, rivières, etc.), de sa topographie et de son mode de gestion (arrosage, entretien, etc.).

- quantifier la diffusion de cette fraîcheur dans les quartiers environnants selon les caractéristiques des tissus urbains qui entourent le parc.

- quantifier les effets de cette fraîcheur sur la consommation d'énergie des bâtiments alentours et les risques d'inconfort pour leurs occupants.

Ces éléments quantitatifs seront évalués à partir de modèles empiriques qui nécessiteront seulement le calcul d'indicateurs caractérisant les parcs (constitution, environnement et mode d'usage) et les tissus urbains alentour (morphologie et structure). L'élaboration de ces modèles sera effectuée à partir d'analyses statistiques reliant des résultats de simulations micro-climatiques aux indicateurs qui caractérisent les parcs et les tissus urbains. Les simulations seront réalisées à partir des modèles SOLENE-microclimat (Musy *et al.*, 2015) et DANA (DetAilled buildiNg simulAtion) (Rodler *et al.*, 2018) et validées à partir de campagnes de mesures menées sur le territoire nantais.

Les modèles empiriques établis dans le cadre de ce projet relieront des indicateurs climatiques (diminution de la température de l'air générée par un parc) et énergétiques (diminution ou augmentation des consommations d'énergie d'un bâtiment) à des indicateurs caractérisant le type de surface d'un parc ainsi qu'à la morphologie et la typologie des bâtiments et du quartier qui l'entoure. Ces résultats seront synthétisés dans un outil SIG permettant le diagnostic d'un état existant ou la mise en œuvre d'un nouvel aménagement urbain (Fig.4).

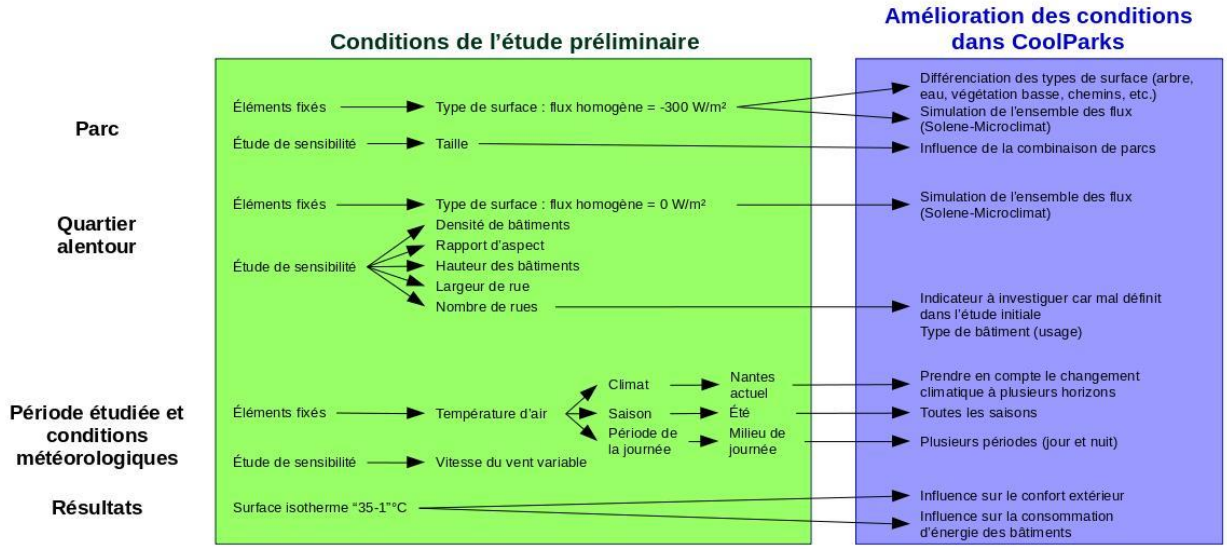


Figure 4. Evolution entre l'étude préliminaire et le projet CoolParks.

Remerciements

Le projet est financé par l'ADEME (2019-2023) et lauréat de l'appel à projets MODEVAL URBA.

Bibliographie

Bernard J., Rodler A., Morille B., Zhang X., 2018. How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air? *Climate* 6, 10.

GIEC., 2014. Changements Climatique 2014. Rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Lewis D., 2016. Cities leading the way to a better future. State of European Cities Report. European commission.

Mairie de Paris., 2009. Projet Claude Bernard - MacDonald. Instruments and observing methods report. Ville de Paris.

McPherson E.G., 1994. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.

Musy M., Malys L., Morille B., Inard C., 2015. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate* 14, 213–223.

Rodler A., Guernouti S., Musy M., Bouyer J., 2018. Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison. Energy and Buildings 168, 19–34.

Rodriguez F., 2015. FluxSAP - A collaborative experimental campaign on water and energy fluxes in urban areas and the relation with the vegetation : the case of a Nantes district. In: 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9). Météo-France, Toulouse, France.

L'ÉTÉ 2019 À GRENOBLE (FRANCE) : ANALYSE D'UN EXTRÊME DE CHALEUR ET MESURES D'ADAPTATIONS MISES EN PLACE PAR LA COLLECTIVITÉ

ROME S.[1], BIGOT S.[1], FOISSARD X.[2], FOUVET A.-C.[3], MADELIN M.[4], DUCHE S.[5]

1 Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France; *Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes, France (sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr)*
2 Université Grenoble Alpes, IUGA, Grenoble, Université Rennes 2, TerraClima/LETG Rennes, UMR 6554 CNRS, Rennes, France
3 Direction de l'Environnement et du Cadre de Vie, Grenoble, France
4 Université de Paris, UMR 8586 PRODIG, Paris, France
5 Université Grenoble Alpes, UMR 5194 PACTE, Grenoble, France

Résumé : *Ce travail analyse la température quotidienne minimale (TN) et maximale (TX) de l'air dans 6 stations de l'agglomération de Grenoble (Isère, France), lors de l'été 2019. La méthode vise à détecter la présence de canicule (notée HW) par le dépassement de seuils biométéorologiques (TN ≥ 19°C et TX ≥ 34°C) pendant au moins 3 jours consécutifs. L'étude révèle la présence d'une canicule précoce fin juin dans 4 des 6 stations étudiées. Une seconde débute le 24 juillet dans la plupart des stations urbaines et périurbaines ; elle est plus longue et sévère, avec des pics > 40°C ; une 3[ème] HW est enregistrée la 1[ère] décade d'août dans les stations à proximité du trafic routier. Ces analyses sont comparées aux deux "Alertes canicules" déclenchées par la Préfecture de l'Isère au cours de l'été 2019. Des mesures d'adaptations aux fortes chaleurs sont présentées.*

Mots clés : *extrêmes thermiques ; canicule ; vague de chaleur ; mesures adaptatives ; Grenoble*

Summary: ***Summer 2019 in Grenoble (France): analysis of extreme heat and adaptation measures put in place by the community***. *This study analyses the daily minimum (TN) and maximum (TX) air temperature from six stations in the Grenoble area (Isère, France) during the summer of 2019. The method consists of detecting the presence of heat waves (HW) by exceeding bio meteorological thresholds (TN ≥ 19°C and TX ≥ 34°C) for at least three consecutive days. The study reveals an early heat wave at the end of June in four of the six stations studied. A 2nd HW begins on July 24th in most urban and peri-urban stations; it is longer and more severe, with peaks > 40°C; a 3rd HW is recorded in the 1st 10-day period of August in stations close to road traffic. We compare these analyses to the two "Heat Wave Alerts" triggered by the Isère Prefecture during the summer of 2019. We present a list of measures to adapt to high temperatures.*

Keywords: *thermal extremes; heat wave; adaptive measures; experience feedback; Grenoble city*

Introduction

Les extrêmes thermiques représentent un aléa dont le retour d'expérience mérite d'être pris en compte dans les politiques urbaines et sanitaires. L'enjeu lié aux impacts des changements climatiques à l'échelle urbaine est fondamental, notamment à Grenoble, pour différentes raisons : parmi celles-ci, des contraintes topographiques fortes (site de fond de vallée intra-alpine engendrant une accumulation de l'air chaud en été, sans écoulement d'air en épisode de surchauffe), mais aussi des enjeux socio-économiques (l'aire urbaine grenobloise est la 11[ème] de France avec 196 communes, comptant plus de 684 000 habitants, soit le principal pôle urbain alpin français). Grenoble est la 1[ère] ville française dépassant 150 000 habitants avec un maire écologiste depuis 2014, donc où les planifications environnementales liées au climat sont *a priori* mieux abordées (Bigot *et al.*, 2017). Cela se traduit par exemple par la mise en place localement de différents plans sur le climat (cf. § 3). Des études de vulnérabilité des populations aux vagues de chaleur sont menées dans plusieurs métropoles françaises, à l'instar du Grand Lyon où Alonso et Renard (2020) montrent des vulnérabilités physiologiques plus élevées au centre de Lyon, tandis que celles socio-économiques s'observent en périphérie est de l'agglomération.

Aussi, cette étude propose d'une part, de rappeler la terminologie sur les extrêmes de chaleur et d'analyser les extrêmes chauds enregistrés durant l'été 2019, et ce, à différents pas de

temps. D'autre part, il s'agit d'étudier les actions préventives que la ville de Grenoble a d'ores et déjà mises en place lors d'extrêmes de chaleur. Le but est d'aider les collectivités à mieux anticiper les actions lors des futurs épisodes caniculaires, et de valider les indicateurs météo-climatiques servant de veille ou d'alerte, et ce, dès l'été 2020.

1. Données météorologiques et méthodes d'étude des extrêmes de chaleur

1.1. Le réseau thermique utilisé

Les données de températures (T) journalières concernent la période du 1er juin au 31 août 2019, pour 6 stations réparties dans l'agglomération de Grenoble (Fig.1). Il s'agit de T :
minimales (TN) et maximales (TX) de 2 stations du réseau Météo-France (Le Versoud et Saint-Etienne-de-Saint-Geoirs, notée ensuite St-Geoirs), obtenues *via* la Publithèque ;
infra-horaires de la station Grenoble-CEA-RADÔME (CEA), située dans la cluse de l'Isère, dans un couloir ventilé, à moins de 50 m à la fois de l'Isère et du Drac ;
quart-d'heure enregistrées par ATMO-AURA aux stations Les Frênes, Le Rondeau et Saint-Martin d'Hères. Ces données, mesurées hors conditions standards de l'OMM (postes installés pour mesurer en priorité la qualité de l'air), sont néanmoins représentatives de la T du milieu urbain, à proximité du trafic routier et de surfaces asphaltées (station du Rondeau) et de bâti dense (Les Frênes et St-Martin-d'Hères).

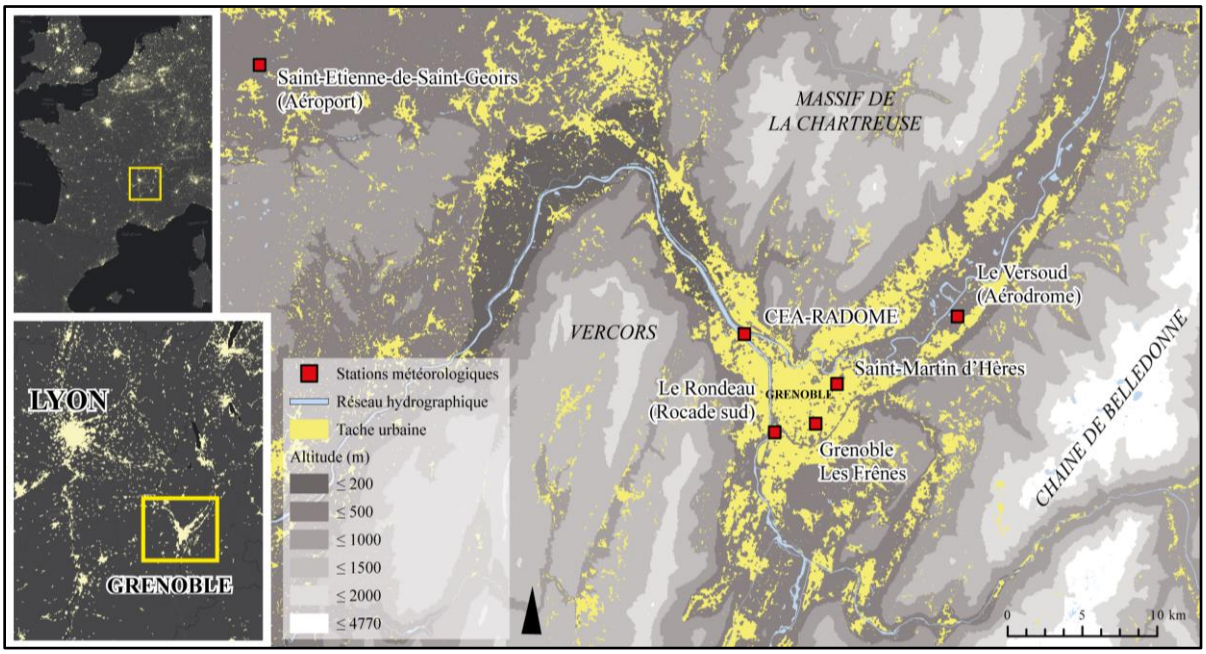


Figure 1. Localisation des 6 stations météorologiques étudiées à Grenoble. (Sources des données : IGN BD ALTI (2018), DDT de l'Isère (2015), Météo-France, CEA, ATMO-AURA)

Ces 6 stations couvrent l'ensemble de l'agglomération, avec leurs spécificités : stations urbaines (Les Frênes, Le Rondeau), péri-urbaines (CEA, Le Versoud, Saint-Martin-d'Hères) et rurales (St-Geoirs). Cette dernière, située à 48 km au NW de Grenoble, à 384 m d'altitude *vs* 210 m à Grenoble-centre, est pourtant souvent encore considérée comme "le référentiel" climatique pour la ville, le réseau météo-climatique urbain grenoblois n'ayant jamais été très stable et dense ces dernières décennies (Bigot *et al.*, 2017). Depuis octobre 2019, la station CEA-Radôme a été intégrée au réseau Météo-France (accessible *via* la Publithèque) et devrait devenir le véritable référentiel urbain (communication privée avec Météo-France).

1.2. Méthodes de détection des extrêmes chauds

1.2.1. Canicule et indicateur biométéorologique de chaleur

Pour rappel, le terme "canicule" n'est utilisé qu'en France et en français ; il équivaut en anglais à "vague de chaleur" (notée ici HW pour Heat Wave). Météo-France (2019a) définit la canicule comme une "*période de chaleur intense pour laquelle les indicateurs biométéorologiques dépassent les seuils départementaux pendant trois jours et trois nuits consécutifs et susceptible de constituer un risque pour l'ensemble de la population exposée. Elle est associée au niveau de vigilance météorologique orange*". Ces "indicateurs biométéorologiques" (*i.e*. moyennes sur 3 jours glissants des TN et TX prévues) sont calculés par Météo-France pour une station de référence par département, avec des seuils variant de l'un à l'autre. En Isère, les seuils TN et TX sont fixés respectivement à 19°C et à 34°C. Croisés avec les prévisions à court terme (quelques jours) et l'existence d'éventuels facteurs aggravants, ils permettent de définir la couleur de vigilance et le niveau du plan départemental canicule. Ces seuils sont cohérents pour les fonds de vallées comme à Grenoble, mais pourraient être atteints avant le déclenchement de l'alerte canicule par le Préfet en zone urbaine, ce qui représente un enjeu sanitaire majeur.

1.2.2. Détection des extrêmes de chaleur

Bien qu'aucune définition universelle ne fasse foi, la vague de chaleur est une anomalie de température par rapport à la climatologie locale (+5°C ou > 90ème centile selon la latitude) ; elle est en général rare, intense, sévère et d'une durée minimale de 3 jours consécutifs pour la plupart des auteurs (*e.g.* Steadman, 1979 ; Nairn, 2014 ; Russo *et al*., 2014) ou sur une fenêtre glissante de 5 jours (ETCCDI, 2013). Le projet *Extremoscope* identifie les HW en France selon un processus complexe (cf. Soubeyroux *et al*., 2016). Météo-France (2019b) les recense à partir d'un indicateur thermique national (moyenne de 30 stations) ; la durée de l'événement est alors calculée à partir d'une valeur seuil, caractérisant le début et la fin de l'épisode (Météo-France, 2019a).

Dans ce travail, les extrêmes de chaleur en Isère sont recherchés à partir du dépassement des indices biométéorologiques, *i.e*. faisant état d'une canicule (TN ≥ 19°C et TX ≥ 34°C pendant au moins 3 jours consécutifs) ; en-deçà, il s'agit d'un pic de chaleur. Ce terme "canicule" est important pour les collectivités car des mesures spécifiques sont déployées au niveau 3 alerte canicule. En effet, l'objectif du plan national canicule (PNC) et du Plan Municipal Canicule (PMC, Ville de Grenoble, 2019) est de définir les actions de court et de moyen termes quant à la prévention et la gestion de crise, pour en réduire les effets sanitaires.

2. Les fortes chaleurs à Grenoble pendant l'été 2019

2.1. Profil thermique quotidien de juin-juillet-août 2019

L'été 2019 a été très chaud à Grenoble, avec dépassement des seuils biométéorologiques à plusieurs reprises, et comme dans le reste de la France métropolitaine, la présence d'au moins 2 canicules (Fig.2), générées par un flux d'air chaud remontant de la péninsule ibérique.

La HW1 (26 juin-1er juillet) est constatée partout sauf à St-Geoirs. Dans les stations urbaines Les Frênes et Le Rondeau, la HW a duré 15 jours consécutifs (24 juin-8 juillet) contre 6 jours sur la Presqu'île du Polygone scientifique au CEA (26/06-2/07) ; dans cette dernière, TN est restée au-dessus de 19°C pendant 13 jours consécutifs (22 juin-9 juillet), sauf le 2 juillet où TN est tombée à 14,8°C suite à des orages accompagnés de très fortes averses avec de la grêle (Météo-France, BCMR, juin 2019c), alors que TX est restée à 34,4°C. Ce manque de rafraîchissement nocturne est difficile à supporter par l'organisme humain l'été. La HW1 bat

des records avec 15 nuits douces (TN > 20°C) et 14 jours de très forte chaleur (TX > 35°C). La TN est proche de la normale ou excédentaire jusqu'à 3°C, TX affichant un excédent jusqu'à 4,5°C. L'anomalie mensuelle (réf. 1981-2010 des T moy. des 8 stations de Rhône-Alpes) de juin 2019 est de +2,4°C, la classant au 3ème rang des mois les plus chauds depuis 1970, après juin 2003 (+5,6°C) et juin 2017 (+3,4°C) (Météo-France, BCMR juin, 2019c).

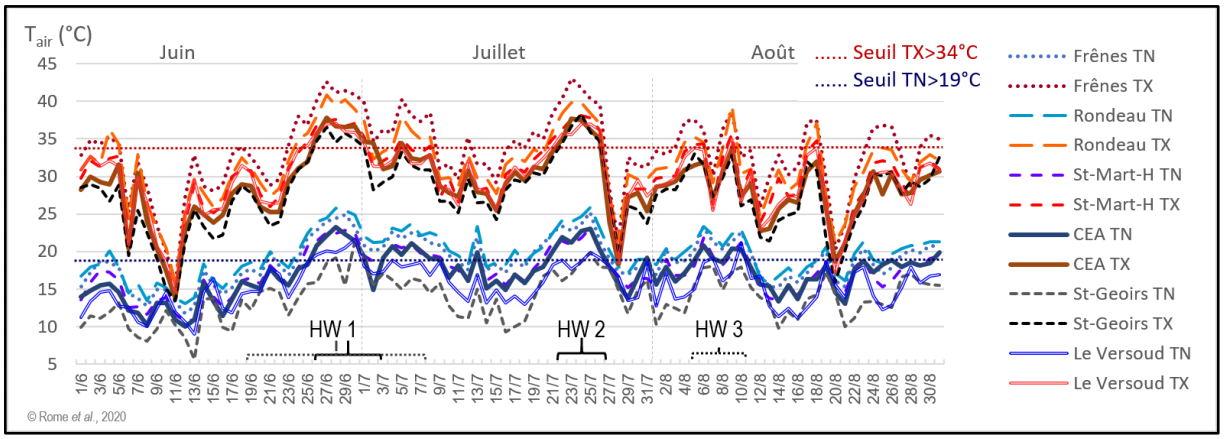


Figure 2. Variations quotidiennes de la température de l'air à 2 m dans 6 stations de Grenoble, du 1er juin au 31 août 2019. HW 1 à 3 signalent la présence des 3 canicules. (Source des données : Météo-France (St-Geoirs et Le Versoud), CEA (CEA) et ATMO-AURA (Les Frênes, Le Rondeau et Saint-Martin d'Hères))

La 2ème canicule (HW2) du 22-26 juillet l'est uniquement dans les stations urbaines et périurbaines ; elle a débuté dès le 19 et 20 juillet (resp. Les Frênes & le Rondeau, St-Martin-d'Hères) et le 22 juillet au CEA et Le Versoud. Les TX ont été particulièrement intenses, battant des records quotidiens de température, avec un pic atteignant 43°C le 23 juillet aux Frênes et >40°C pendant 4 jours. À Grenoble-CEA, la T a dépassé les seuils caniculaires, atteignant 37°C les 23 & 24 juillet et 2 nuits tropicales (TN>22°C) les 24 et 25 juillet (Fig.2, 3). St-Geoirs et Le Versoud sont épargnées par des nuits chaudes (TN < 20°C) alors que les TX dépassent 34°C. Avec une anomalie de +2,4°C (réf. 1981-2010 des T moy. des 8 stations de Rhône-Alpes), juillet 2019 se classe au 4ème rang des mois de juillet les plus chauds depuis 1969 (Météo-France, BCMR juillet 2019c). La T dégringole les 27 et 28 juillet de 20°C, suite à une dégradation pluvio-orageuse.

Vu la vigilance météorologique orange canicule émise par Météo-France, le Préfet de l'Isère a activé le niveau 3 « alerte canicule » à compter du 24 juin jusqu'au 4/07, puis du 22 juillet au 26/07 (CG-38). Ces déclenchements sont cohérents avec les mesures relevées dans les stations périurbaines, alors que les seuils sont déjà atteints 2 jours plus tôt dans les stations Frênes et Rondeau. Dans ces deux seules stations urbaines, une 3ème HW est esquissée du 5 au 10 août, non validée par les instances décisionnelles car hors du réseau agréé Météo-France.

2.2. Évolution thermique horaire lors de la seconde HW

Les variations thermiques horaires lors de la HW2 diffèrent en durée selon les lieux : les seuils sont dépassés pendant 5 jours et 6 nuits consécutifs à Grenoble-CEA (non montré), et pendant 8 jours et 9 nuits consécutifs en milieu urbain (Fig.3). La canicule débute dès le 23 juillet aux Frênes, il faisait déjà 34°C à 9h, 39,2°C à 12h, et la T a atteint 43°C à 15h30 ; la T est restée au-delà de 34°C de 9h à 19h et est descendue en-deçà de 30°C après 21h30. L'évolution thermique est similaire dans les autres stations, avec des valeurs moins élevées d'environ 2°C : matinée déjà chaude, maximum thermique atteint en milieu d'après-midi (entre 15 et 17h) et chaleur persistante jusqu'en fin de soirée.

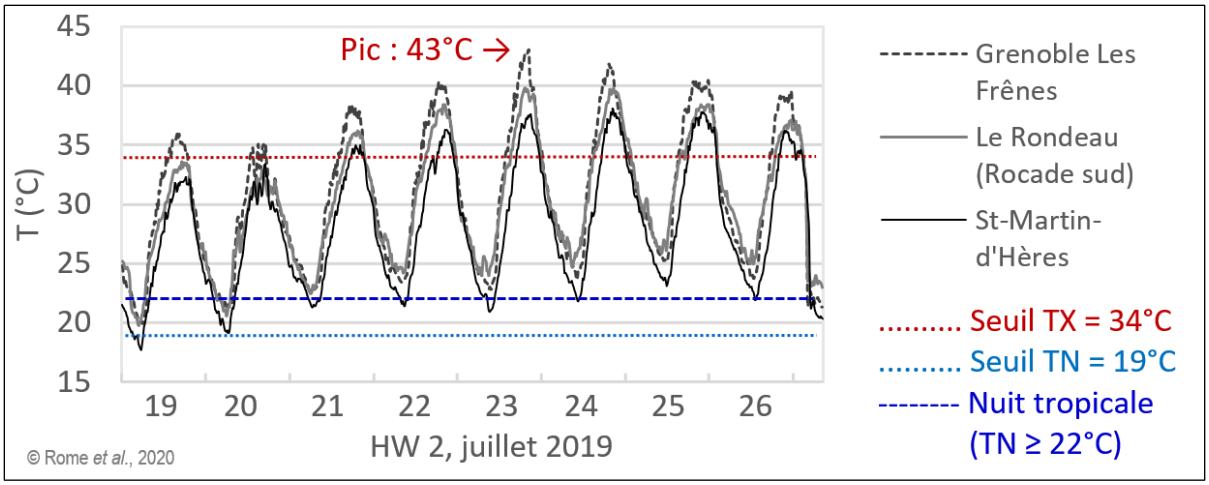


Figure 3. Variations horaires de la température lors de la seconde canicule (HW2), dans 3 stations de Grenoble : Les Frênes, Le Rondeau et Saint Martin d'Hères du 19 au 26 juillet 2019 (Données source : ATMO-AURA).

3. Les réponses de la ville de Grenoble face aux fortes chaleurs estivales

La ville de Grenoble s'est dotée d'un Plan climat local dès 2005, renforcé par des volets « qualité de l'air » et « adaptation au changement climatique » ; le Plan Air Energie Climat (2019-2025) de la ville s'articule avec le Plan Municipal de Santé et contribue à la démarche climatique de la Métropole.

Différentes actions ont été mises en œuvre en 2019, déclenchées dans l'urgence pour certaines lorsque le niveau d'alerte 3 canicule a été annoncé par le Préfet de l'Isère. L'intensité et la durée des HW ont impacté l'organisation des services de la collectivité, non seulement pendant l'événement, mais aussi à plus long terme, en vue de capitaliser sur l'expérience acquise et préparer l'été suivant. Plusieurs actions sont en cours d'élaboration (liste disponible sur https://www.grenoble.fr/1457-fortes-chaleurs-et-canicules.htm) et visent notamment à lutter contre le changement climatique, s'y adapter et aménager l'espace public : accès à la fraîcheur (*e.g.* parcs urbains ouverts la nuit), diagnostic des besoins et aménagements en points d'eau « fraicheur » (*e.g.* fontaines, points d'eau potable, ombrières, brumisation), etc.

Ainsi, les leçons tirées de la canicule de 2019 ont permis d'ajuster le PMC en l'organisant de façon opérationnelle selon les publics : grand public, personnes âgées, enfance et petite enfance, public de la rue ou en situation précaire, agents de la Ville et du CCAS. Ainsi, en vue de l'été 2020, plusieurs actions sont en préparation, *e.g.* à destination des 4000 agents, des établissements recevant des enfants, une communication aux usagers *via* divers media. En parallèle, la Ville de Grenoble intègre l'adaptation aux fortes chaleurs dans ses projets d'aménagement (végétalisation de l'espace public et privé, des façades et des toitures, désimperméabilisation des sols, présence de l'eau) et prend en compte le confort thermique d'été dans la rénovation du patrimoine municipal et les futures constructions (schéma directeur de l'immobilier). Cependant, les connaissances sur cette nouvelle donne climatique peuvent encore progresser, en particulier sur l'îlot de chaleur urbain qui peut orienter les choix d'urbanisme, au regard de l'enjeu sanitaire : l'intérêt d'un rapprochement entre le monde académique et les collectivités (à l'échelle communale et intercommunale) est partagé.

Conclusions et discussion

Les températures de l'été 2019 en France ont été exceptionnelles, avec des valeurs record, extrêmement peu probables sans la modification du climat par les activités humaines. Par exemple, 24 nuits tropicales sont enregistrées à Grenoble Les Frênes. Ce sont surtout les TX

qui excèdent la normale jusqu'à +3,5°C en AURA (Météo-France, BCMR août 2019c). Deux canicules sont enregistrées, l'une précoce fin juin, l'autre du 22 au 26 juillet fut relativement courte (5 jours) et s'est distinguée par une intensité exceptionnelle ; des dépassements des seuils d'alerte en Isère sont enregistrés du 24 juin au 4/07, et du 22 au 26/07. Lors de ces 2 canicules, pour la première fois, respectivement 4 et 20 départements, représentant 7 et 35 % de la population française métropolitaine ont été placés en vigilance rouge, vu les TX exceptionnelles (Santé Publique France, 2019). Ces canicules ont eu des impacts sanitaires pour les populations exposées. La surmortalité dans les départements placés en vigilance rouge (dont en région AURA) est environ 50 % plus élevée que la moyenne des départements touchés (572 décès en excès) (Santé Publique France, 2019). Plus de 12000 hospitalisations suite à un passage pour iCanicule (indicateur suivi dans le cadre du PNC : hyperthermies, déshydratations et hyponatrémies) ont été enregistrées en métropole. Ceci montre l'intérêt du suivi de la qualité de l'air, même si les données thermiques de certaines stations urbaines doivent être interprétées avec prudence.

Remerciements

Nous remercions les 3 organismes ayant communiqué les données de T de l'air : 1/ l'Institut Max von Laue - Paul Langevin (ILL) du CEA et en particulier Giovanna CICOGNANI, Frédéric FOULADOUX et Jean-Philippe PIERRE pour l'extraction des données de la station Grenoble-CEA-RADOME ; 2/ ATMO-AURA et 3/ Météo-France *via* la Publithèque.

Bibliographie

Alonso L. & Renard F., 2020. A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to HeatWaves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 1004. Doi: 10.3390/ijerph17031004

Bigot S., Duché S., Madelin M. & Rome S., 2017b. Etude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques, *BSGLg* [En ligne], 68. URL : http://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4505.

ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). [en ligne], Dernière mise à jour le 29.01.2013. URL : http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml (consulté le 15.12.2015).

Météo-France, 2019a. Canicules et vagues de chaleur. Dossier de presse, 21 juin 2019.

Météo-France, 2019b. Canicules 2019 : la moitié de la France n'avait jamais eu aussi chaud ! Actualités, 02/08/2019. URL : http://www.meteofrance.fr/actualites/74603888-canicules-2019-la-moitie-de-la-france-n-avait-jamais-eu-aussi-chaud

Météo-France, 2019c. BCMR Rhône-Alpes, Bulletin Climatique, juin, juillet et août 2019.

Nairn J., 2014. Heatwave defined as a heat impact event for all community and business sectors in Australia. *Urban climate and weather*, 13-15 March 2012. South Australia.

Préfecture de l'Isère, 2016. *Plan départemental de gestion d'une canicule en Isère*, Juin 2016.

Russo S., Dosio A., Graversen R.G., Sillmann J., Carrao H., Dunbar M.B., Singleton A., Montagna P., Barbola P., & Vogt J.V., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world, *J. Geophys. Res. Atmos*., 119. Doi: 10.1002/2014JD022098.

Santé Publique France, 2019. Canicule et santé. Bulletin de santé publique. Été 2019.

Soubeyroux J.-M., Ouzeau G., Schneider M., Cabanes O. & Kounkou-Arnaud R., 2016. Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, 94, 45-51. Doi : https://doi.org/10.4267/2042/60704

Steadman R.G., 1979. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl. Meteor*., 18, 861-873.

Ville de Grenoble, 2019. Plan Municipal Canicule (PMC) 2020-2022. 18 octobre 2019.

BILAN HYDRIQUE AGRO-CLIMATIQUE DE LA VIGNE A PARTIR DE DONNEES DE TELEDETECTION A MOYENNE RESOLUTION SPATIALE : CAS DE LA REGION DU CAP BON (TUNISIE)

SAMAALI H.[1], MJEJRA M.[2]

1 Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, Tunis, Tunisie (samaalihamouda@yahoo.fr)
2 Institut Supérieur des Sciences Humaines de Jendouba, Jendouba, Tunisie (mustaphamjejra@yahoo.fr)

Résumé : *Ce travail a eu pour objectif d'exposer les opportunités des données satellitaires à moyenne résolution spatiale en optique pour une caractérisation de la vigueur de la viticulture de la région du Cap Bon dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques. Deux campagnes agricoles extrêmement différentes sur le plan climatique, saison humide et saisons sèche sont utilisées pour spatialiser les besoins en eau de la vigne à l'échelle parcellaire. Les résultats ont montré la performance des indices Kc-NDVI et NDVI-P pour les fins de ce travail.*

Mots clés : *viticulture ; télédétection optique ; Cap Bon*

Summary: ***Agro-climatic water balance of the vine based on medium-resolution spatial teledetection data: case of the Cap Bon Region (Tunisia).*** *The aim of this work was to present the opportunities of medium spatial resolution satellite data for a characterization of the vigour of viticulture in the Cape Bon region in a context of adaptation to climate change. Two extremely different agricultural seasons in terms of climate, wet season and dry season are used to spatialize the water needs of the vine at the plot scale. The results showed the performance of the Kc-NDVI and NDVI-P indices for this work.*

Key words: *viticulture; optical remote sensing; Cap Bon*

Introduction

La viticulture est l'une des spéculations agricoles les plus importantes dans la région du Cap Bon, dans la mesure où elle offre 12% de raisins de table et 70% de raisins de production (MARH, 2016). La vigne est majoritairement cultivée en sec dans la région, et sa production subit, de fait, l'influence de la forte variabilité interannuelle du régime pluviométrique et où les déficits hydriques édaphiques et atmosphériques exercent de fortes contraintes sur le rendement et la qualité. La région d'étude est caractérisée par la fragilité de son milieu, elle présente des problèmes exemplaires de déficit hydrique, de salinité due à l'intrusion marine, et de dégradation de la qualité du sol (APAL et PNUD, 2012). D'autant plus que les modèles prévoient une augmentation de la fréquence et de l'intensité du stress hydrique estival (GIEC, 2014). En raison notamment du déficit en eau, les conditions de l'activité agricole se sont fortement dégradées, ayant pour conséquence un important mouvement d'abandon des terres, plus particulièrement dans les zones littorales.

Dans ce contexte, le potentiel des images satellitaires optiques pour la cartographie et le suivi de quatre phénophases principales (débourrement, floraison, véraison et récolte) de la vigne, est d'un grand d'intérêt. En effet, les données satellitaires peuvent contribuer à évaluer les besoins en eau de la vigne et aboutir à une meilleure gestion de l'eau en viticulture (Loussert, 2017). A cet égard, le potentiel des indices de végétation pour dériver le coefficient cultural et de l'approche analytique pour estimer l'évapotranspiration des vignobles sont nécessaires pour déterminer l'état hydrique de la vigne. De même, la relation entre NDVI et la pluie offre une opportunité assez importante pour le suivi de la vigne en sec.

La problématique de ce travail porte sur l'évaluation des images satellitaires optiques à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des vignobles du Cap Bon dans le contexte d'adaptation, de la Tunisie, aux changements climatiques prévus.

1. Région d'étude, Données utilisées et approche méthodologique

1.1. Région d'étude

La presqu'île du Cap Bon se caractérise par sa singularité climatique et sa diversité bioclimatique. La partie Nord-est et nord-ouest est dominée par la nuance subhumide, tandis que la partie sud-est et sud-ouest est occupée par la nuance semi-aride (Fig.1). Dans cette région est installé la plupart des surfaces des vignobles d'environ 8400 ha avec près de 70 % de vigne de production et 12 % de vigne de table de l'ensemble national. En plus, le climat de la région est marqué par l'omniprésence des vents, dans la mesure où on enregistre en moyenne 300 jours de vents par an (On désigne par jour de vent, la force du vent supérieure à 4m/s et qui fait tourner « l'éolienne », Mjejra, 2018). Ces vents chargés d'embruns salés forment les conditions favorables de sécheresse, en favorisant une plus forte évapotranspiration des végétaux. Ainsi, le climat du Cap Bon se caractérisé par une pluviométrie irrégulière et des amplitudes thermiques assez élevées. Les moyennes annuelles des précipitations sont d'environ 500 mm à Kélibia et 463 mm à Grombalia. En général, les régions occidentales sont légèrement plus arrosées. La température moyenne annuelle oscille entre 17° et 19°C, tandis que la température minimale moyenne est comprise entre 12 et 15°C en hiver et la température maximale moyenne est entre 31 et 33°C en été (Ben Boubaker, 2004).

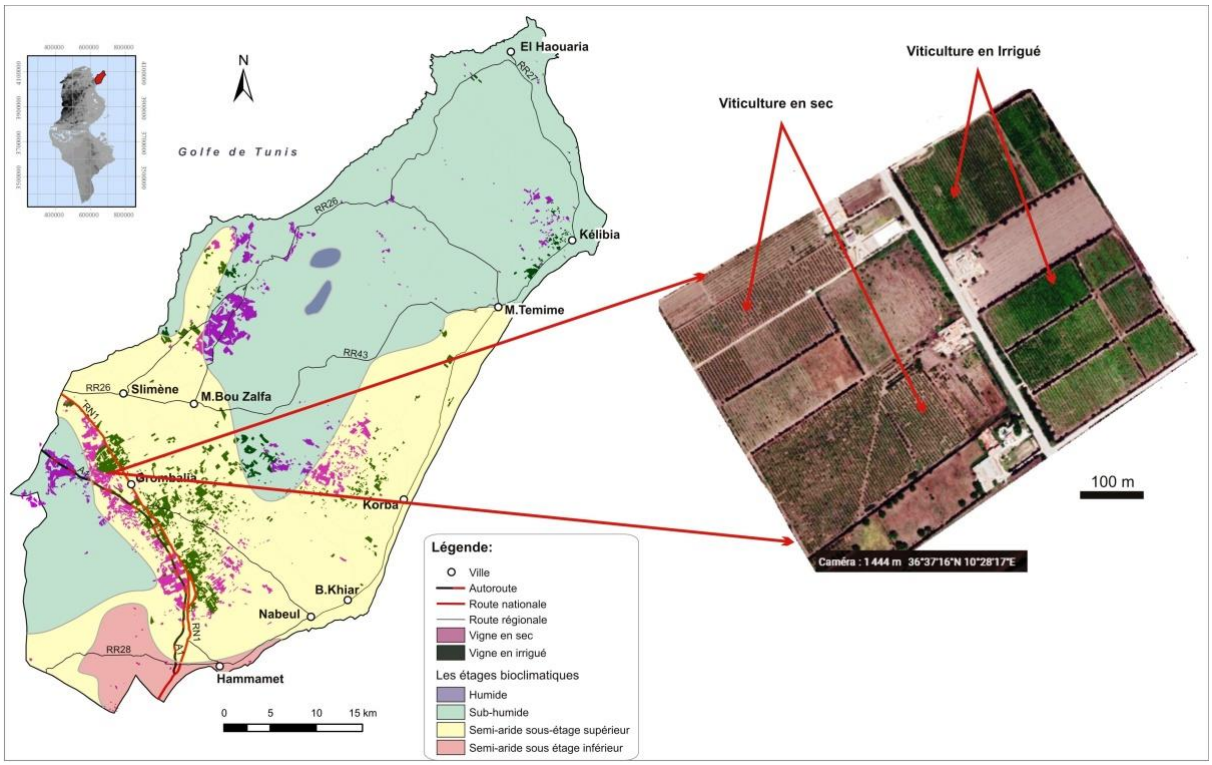


Figure 1. Localisation des vignobles irrigués et en sec dans la région d'étude (Source : Nasri 2017 et extrait Google Maps)

1.2. Données utilisées

L'étude du bilan hydrique agro-climatique de la vigne dans la région du Cap Bon s'appuie sur les données suivantes :

Les données géographiques : il s'agit des documents cartographiques et les recensements prises à partir des plans des services administratifs (MARH, CRDA Nabeul, ONA), et ce pour réaliser la carte de la répartition de vignoble (sec ou irrigué) et suivre la variation de la production intra-annuelle des raisins.

Les données climatiques : ces données proviennent de l'Institut National de Météorologie. Il s'agit des totaux mensuels de la pluie. Les valeurs de l'ETP calculées par la formule de FAO-PM. Ces données sont utilisées pour calculer le bilan hydrique agro-climatique des sites retenus.

Les données satellitales : il s'agit des séries temporelles des NDVI du capteur MODIS-Terra (Produits MOD13Q1 et MYD 13Q1) et des séries de LST (Land Surface Temperature, Produits MOD11A2). Ces images ont été retenues, pour déterminer le Kc et le Ks de vignoble.

La période d'étude : la notion de l'état hydrique de la vigne est abordée ici par une comparaison entre deux campagnes agricoles contrastées sur le plan climatique. Une année pluvieuse (2012) et une année déficitaire (2016).[1]

Un zoom sur le secteur le plus représentatif de la viticulture (ville de Grombalia) au Cap Bon, situé à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur, où les parcelles de la vigne sont voisines (en sec et en irrigué) (Fig.1).

1.3. Approche méthodologique

Dans cette étude nous avons utilisé deux approches. La première approche, concerne la viticulture irriguée, basée sur modèle de l'Organisation de l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) développé par Allen *et al.* (1998). Ce modèle est le plus utilisé pour estimer les besoins en eau des cultures. L'ETP et l'ETR sont calculées par les formules suivantes :

L'évapotranspiration potentielle[2]

$$\mathrm{ETP} = \{0{,}408\,\Delta\,(\mathrm{Rn} - \mathrm{G}) + [900\,\gamma\,/(\mathrm{T}+273) * \mathrm{U2} * (\mathrm{es} - \mathrm{ea})]\} / [\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,\mathrm{U2})]$$

L'évapotranspiration réelle (besoins en eau) : $\mathrm{ETR} = \mathrm{ETP} * \mathrm{Kc} * \mathrm{Ks}$

$$Kc = 1{,}07 * [1 - (\mathrm{NDVImax} - \mathrm{NDVI}/\mathrm{NDVImax} - \mathrm{NDVImin}) * 0.88/0.54]$$

Avec, NDVI min et NDVI max sont les valeurs minimales et maximales de NDVI relatives à la fin du cycle végétatif et à la végétation en plein développement.

En ce qui concerne le coefficient de stress (Ks), nous avons utilisé la méthode d'ajustement de coefficient de stress hydrique (Mjejra, 2015) qui se base sur la relation théorique entre le Ks et l'humidité du sol. Pour ce faire nous avons utilisé NDWI (Normalized difference water index) qui permet de détecter l'humidité calculée par l'équation suivante.

$$\mathrm{NDWI} = \left(\frac{\boldsymbol{R-\mathrm{MIR}}}{\boldsymbol{R+MIR}}\right)$$

Où R = rouge et MIR = Moyen infrarouge

Enfin les valeurs de Ks sont déterminées par l'intersection à la pente entre l'axe des NDWI et l'axe des valeurs théoriques de Ks (les valeurs sont comprises entre 0 et 1 ; 0 représentent des conditions sèches et 1 représentent des conditions humides).

La deuxième approche, se rapporte à la vigne cultivée en sec, nous avons utilisé le rapport **NDVI/Pluie.** Plusieurs études ont montré la forte corrélation entre NDVI et la pluie (Yacoub 2015 et Mjejra 2018), dans la mesure où « lorsque le rationnement hydrique était le principal facteur affectant le développement végétatif au sein d'une parcelle, la variabilité de

[1] Nous avons utilisé le **RaN** pour identifier le type de l'année sèche ou humide. C'est un indice simple, très fréquemment utilisé et auquel la population est familiarisée (Coord., Hénia et Halaoui, 2015). Le rapport à la normale : **RaN= Xi/Xn** (%) avec Xi précipitations de l'année considérée ; Xn la normale pluviométrique annuelle, et la période de référence de la moyenne est celle 2000-2018.

[2] **ETP** évapotranspiration potentielle [mm/jour] ; **Rn** rayonnement net de surface [MJ/m²/jour] ; **G** flux de chaleur du sol [MJ/m²/jour] ; **T** température de l'air moyenne à 2m [°C] ; **u2** vitesse du vent à 2m [m/s] ; **es** pression de vapeur à saturation [kPa] ; **ea** pression de vapeur actuelle [kPa] ; **Δ** variation de la courbe de pression de vapeur [kPa/°C] ; **γ** constante psychométrique [kPa/°C]

développement pouvait être aisément cartographiée grâce au NDVI » selon Amand *et al.* (2015). Cette relation permet de reconstituer une cartographie précise du potentiel hydrique de la viticulture en condition non irriguée. Pour ce faire, et dans une première étape, nous avons interpolé les données pluviométriques en images rasters à l'aide de la méthode d'interpolation SEDI[3] (Mjejra, 2015) et ce pour l'homogénéité de l'NDVI et la pluviométrie. La deuxième étape consiste à représenter le rapport entre le NDVI et la pluie pour chaque période.

2. Résultats et discussion

2.1. Vignoble irrigué

Les besoins en eau du vignoble irrigué, calculés par la méthode Kc-NDVI (Fig.2), au cours du cycle végétal sont de l'ordre de 344,7 mm en 2012 (année humide) et ils se lèvent à 452,5 mm en 2016 (année sèche). Ces besoins augmentent au fur et à mesure avec la croissance végétative (Fig.3). Par ailleurs, ils sont assez élevés au cours de la phase de débourrement et ils peuvent atteindre les 20 mm chaque décade, en particulier, vers le mois de juin pendant lequel la croissance végétative et l'expansion foliaire sont maximales, et ce en 2016 (année sèche). Ceci, est expliqué par plusieurs facteurs. Premièrement, la saison de croissance pendant cette année a été plus chaude au début et la demande climatique est très élevée. Deuxièmement, les sols sont secs car la réserve hydrique n'est pas établie, en raison du manque des précipitations par rapport à l'année 2012 (Fig.4). Les faibles valeurs des besoins en eau observées à la fin de la saison sont associées à une demande d'évapotranspiration et à une sénescence foliaire réduites (Vanino *et al.*, 2015).

En ce qui concerne le bilan hydrique agro-climatique, pour l'année humide (2012) la croissance végétale, en particulier, durant la phase de débourrement a été assurée dans des conditions agro-climatiques optimales. Les besoins en eau sont généralement satisfaits en raison de l'existence d'une réserve utile dans le sol héritée de l'hiver et permettant de couvrir avec l'apport pluviométrique de mars les besoins de la vigne (Hlaoui, 2006). En contrepartie, l'année 2016 a été caractérisée par un bilan largement déficitaire, dans la mesure où le manque d'eau a commencé dès la fin du mois d'avril et devient très prononcé pendant la phase de pleine floraison.

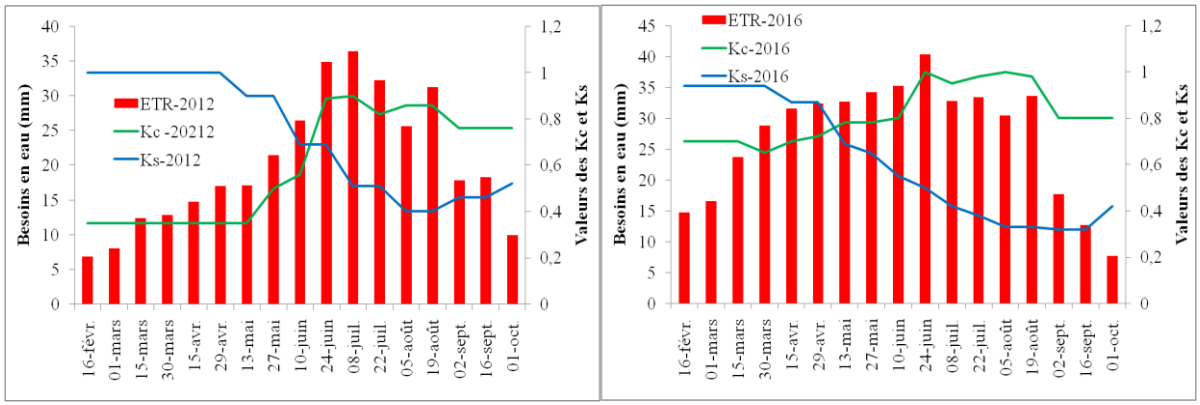


Figure 2. Besoins en eau calculés dans une parcelle irriguée à Grombalia pour les cycles végétaux de la vigne (2012 et 2016)

[3] **SEDI** (Satellite Enhanced Data Interpolation) comparable à la méthode de co-krigeage. L'interpolation SEDI tient compte des valeurs mesurées liées aux valeurs des images satellitaires qui présentent

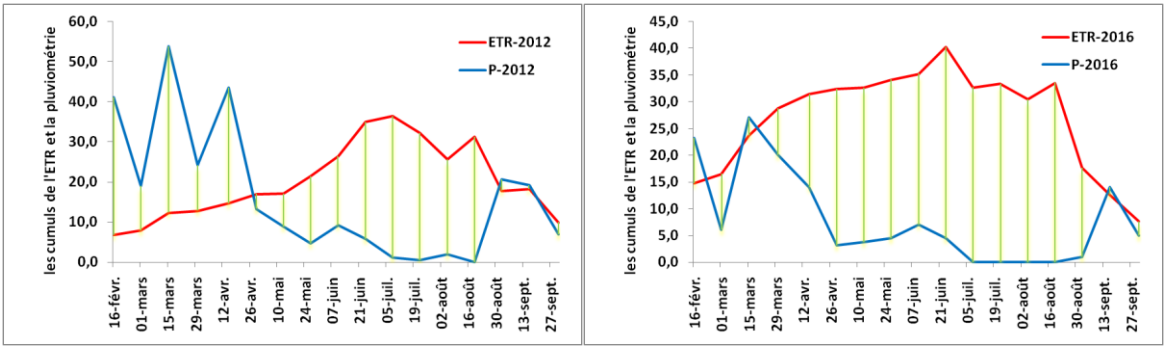


Figure 3. Variabilité du bilan hydrique agro-climatique dans une parcelle irriguée à Grombalia dans deux saisons végétatives de la vigne (2012 et 2016)

2.2. Vignoble en sec

Dans le secteur de Grombalia, les profils temporels de NDVI, du cycle végétatif de la vigne, déduis de l'imagerie satellitaire MODIS (Fig.4) sont similaires au profil théorique de NDVI (Fig.5). Les faibles valeurs (0,2 à 0,45) sont associées respectivement à la sortie de la période hivernale et au stade de la sénescence. Les valeurs élevées de NDVI sont survenues pendant la phase de la floraison (0,7 à 0,8). En outre, le développement végétal de la viticulture en sec est fonction des événements pluvieux. C'est pour quoi, pendant l'année pluvieuse (les cumuls de janvier à octobre 2012 avec 462,4 mm) les valeurs de NDVI observées sont plus élevées que les valeurs de NDVI de l'année sèche (les cumuls de janvier à octobre 2016 avec 282,6 mm). Ainsi, la forte activité végétale de la viticulture à Grombalia est enregistrée après une saison pluvieuse, par contre, elle devient peu active lorsque les cumuls de la pluviométrie sont diminués. L'écart pluviométrique entre les deux années, avant la période de développement foliaire (début mai à fin juin) est de l'ordre de 91.9 mm. Ces conditions agro-climatiques ont pour conséquence une diminution de la photosynthèse de la vigne qui peut expliquer certaines pertes de rendement pendant l'année 2016. Cette dernière, a enregistré une quantité de pluie inférieure au seuil de 322 mm, associée à une contrainte hydrique modérée où la vigne peut s'adapter (les recensements de CRDA http://www.agridata.tn/fr/dataset).

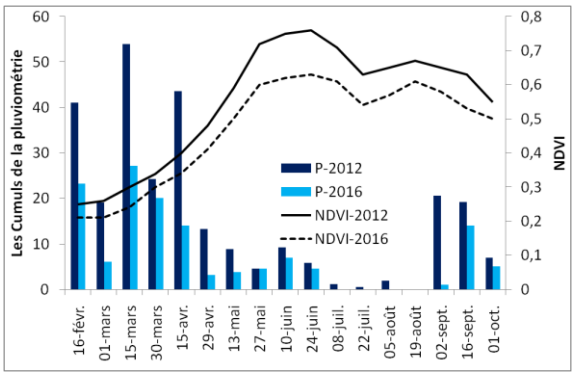


Figure 4. Profils temporels des NDVI et des cumuls pluviométriques de 15 jours au cours du cycle végétatif de la vigne à Grombalia dans une parcelle non irriguée (2012 et 2016)

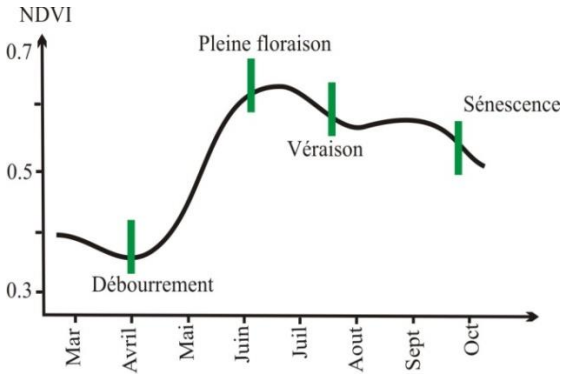


Figure 5. Profil temporel théorique de la vigne (Source : Johnson, 2003)

Conclusion et discussion

Les résultats présentés dans la région du Cap Bon ont souligné qu'il est possible de réaliser un suivi temporel fin de la vigueur du vignoble avec les données de la télédétection optique, et ce à l'échelle parcellaire en fonction des besoins et du stade de développement des vignes. Ces résultats ont montré, aussi, que les valeurs de Kc et Ks sont spécifiques au site d'échantillonnage et à l'année prise en considération et dépendent de l'ETP local et les cumuls des précipitations. Ceci pourrait être fourni aux viticulteurs pour contribuer à réaliser des économies d'eau, à l'optimiser les apports en eau, et d'améliorer les rendements et la qualité des vignes.

Cependant, Il est intéressant de noter que la méthode de FAO-56 sous-estime les besoins locaux en eau des vignobles à tous les stades phénologiques, en particulier, dans un climat marqué par l'aridité (Vanino *et al*., 2016). C'est pour quoi la méthode Kc-NDVI donne des résultats préliminaires prometteurs pour spatialiser les besoins en eau de la viticulture à l'échelle locale. Mais, elle doit être utilisée avec une certaine prudence en raison de la différence des caractéristiques phénologiques des variétés de la vigne.

Bibliographie

Alia Gana, Benjamin Fouillen, 2014. Concurrences et conflits pour l'usage de l'eau en Tunisie : étude de cas dans la région du Cap Bon. Le Carnet de l'IRMC. URL : http://irmc.hypotheses.org/1412

APAL et PNUD, 2012. Etude de la carte de la vulnérabilité du littoral tunisien à l'élévation du niveau de la mer due aux changements climatiques. Rapport de la Phase 2. 112p.

Er-Raki S., Rodriguez J. C., Garatuza-Payan J., Watts C. J. & Chehbouni A., 2013. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural water management*, 122, 12–19.

Hlaoui Z., 2006. Bilans hydriques agro-climatiques de l'olivier en Tunisie. *Revue Tunisienne de Géographie*, 37, 43-73.

IPCC, 2014. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 696p

Johnson L. F., 2003. Temporal stability of an NDVI-LAI relationship in a Napa Valley vineyard. Australian Journal of Grape and Wine Research, 9(2), 96-101.

Mjejra M., 2018. Suivi interannuel de l'état hydrique de la végétation par la télédétection optique: le cas de la région du CAP BON au nord-est tunisien. *Actes du 31ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Nice, France, 4-7 juillet 2018.

Mjejra M., 2015. *Etude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Majerda (en Tunisie) : Apport de la Télédétection Satellitaire et des Systèmes d'Information Géographiques*. Thèse de Doctorat en Géographie, Rennes 2, France, 300p.

Nasri M., 2017. *Cartographie de l'évolution récente de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le Cap Bon*. Thèse de doctorat, Université de Sfax. Tunisie, 435p.

Perrine L., 2017. *Caractérisation de la viticulture irriguée par télédétection en contexte de changement climatique : application aux vignobles de la province de Mendoza en Argentine*. Université Rennes 2, France, 229p.

Yagoub Houria., 2015. *Cartographie et suivi du couvert végétal des zones semi-arides par l'imagerie satellitaire*. Thèse de Doctorat Es-Science, Alger, Algérie, 150p.

Vanino S., Pulighe G., Nino P., De Michele C., Bolognesi S. F. & D'Urso G., 2015. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of tendone vineyards using multi-sensor remote sensing data in a mediterranean environment. *Remote Sensing*, **7** (11):14708–14730.

http://www.agridata.tn/.

http://www.onagri.nat.tn/statistiques

APPROCHE SPATIALE DU RISQUE CLIMATIQUE DANS LE SECTEUR DE L'ÉLEVAGE À L'ÉCHELLE DU BURKINA FASO

SANOU K.[1], ROUAMBA S.[1], SOME W.[2], SOME Y.S.C.[3]

1 Laboratoire d'Études et de Recherche sur les Milieux et les Territoires (LERMIT), Université Norbert Zongo, Koudougou, Burkina Faso (sanoukoro77@gmail.com ; sanoukoro05@yahoo.fr)
2 Ministère des Ressources Animales et Halieutiques, Ouagadougou, Burkina Faso
3 Laboratoire de Recherche en Sciences Humaines (LABOSH), Université Norbert Zongo, Burkina Faso

Résumé : *Au Burkina Faso, les systèmes de production animale se caractérisent par l'utilisation de la production de fourrage dans les pâturages « naturels » et l'utilisation des résidus de cultures d'une agriculture elle-même pluviale. Ainsi, l'élevage est fortement tributaire des conditions climatiques dont les changements en cours sont susceptibles de conduire à une insuffisance de la production de la matière sèche (PMS). L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les risques climatiques et les impacts de ces contraintes sur l'élevage. La méthodologie est basée sur l'analyse statistique des précipitations (1983-2017) et de PMS (1998-2017) à l'échelle des 45 provinces du pays. Les résultats permettent de détecter 35 provinces de sécheresses modérées à sévères et 5 provinces de sécheresses extrêmes ; une province a connu une abondance exceptionnelle de PMS contre 4 provinces avec un déficit exceptionnel. Les conséquences de ces perturbations climatiques sont perceptibles sur la PMS et constituent des aléas qui entravent le développement de l'élevage.*

Mots clés *: Burkina Faso ; province ; sécheresse ; PMS ; élevage*

Summary: ***Spatial approach of climate risk in the livestock sector at the scale of Burkina Faso.*** *In Burkina Faso, livestock production systems are characterized by the use of fodder production in "natural" pastures and the use of crop residues from rainfed agriculture. Thus, livestock production is highly dependent on climatic conditions whose ongoing changes are likely to lead to insufficient dry matter production (DMP). The objective of this work is to highlight the climatic risks and the impacts of these constraints on livestock farming. The methodology is based on the statistical analysis of rainfall (1983-2017) and DMP (1998-2017) at the scale of the 45 provinces of the country. The results allow the detection of 35 provinces of moderate to severe droughts and 5 provinces of extreme droughts; one province experienced an exceptional abundance of DMP against 4 provinces with an exceptional deficit. The consequences of these climatic disturbances are perceptible on the DMP and constitute hazards that hamper the development of livestock farming.*

Key word: *Burkina Faso; province; drought; DMP; livestock farming*

Introduction

L'économie du Burkina Faso est essentiellement basée sur l'agriculture et l'élevage. Le sous-secteur de l'élevage contribue pour 18 % à la formation du Produit Intérieur Brut (PIB). Il occupe la troisième position derrière l'or et le coton au niveau de la balance commerciale et constitue une source de revenu pour environ 80 % de la population (GRAD, 2017). Toutefois, l'élevage, de par son caractère extensif est très dépendant des ressources naturelles au Burkina Faso. Les systèmes de production animale du pays se caractérisent par l'utilisation de la production de fourrage dans les pâturages « naturels » et l'utilisation des résidus de cultures d'une agriculture elle-même pluviale. L'élevage est fortement tributaire des conditions climatiques dont les changements en cours affectent négativement les systèmes agraires de production.

Le bouleversement des conditions climatiques se caractérise par la hausse des températures, la baisse de la pluviométrie et la recrudescence des phénomènes extrêmes dont les sécheresses et les inondations (Dipama, 2014). De tels évènements sont susceptibles de conduire à une insuffisance de la production de la matière sèche (PMS). L'objectif de cet article est de mettre en évidence les risques climatiques et les impacts de ces contraintes sur l'élevage. Le Burkina Faso est situé dans la zone intertropicale entre 9°20' et 15°05' de latitude nord et 2°20' est et 5°30' de longitude ouest. Le Burkina Faso a un climat tropical de type sahélien, caractérisé par une courte saison pluvieuse et une longue saison sèche. Il est subdivisé en treize régions et 45 provinces et couvre une superficie d'environ 274 000 km².

1. Données et méthodes

1.1. Données

Dans le cadre de cette étude, le risque climatique concerne la sécheresse et l'insuffisance de la production de fourrage. Il a été abordé sur un triple plan : fréquentiel, géographique et intensité. Les données sur les sécheresses et l'insuffisance de la production du fourrage sont issues d'imagerie satellitaires TIMESAT provenant de la plateforme Africa Risk View et du réseau EUMESAT. Il s'agit d'un réseau de production d'images sur plusieurs thématiques pour le suivi de processus naturels tels les paramètres climatiques, la végétation, les ressources en eau. Ce sont des données d'observations indirectes qui donnent un moyen de suivi relativement fiable. Les indices et paramètres saisonniers issus des images satellitaires sont corrélés aux données de biomasses collectées au sol (Diouf, 2015 ; Garba, 2017 in MRAH, 2018). Les informations collectées concernent les précipitations sur la période de 1983 à 2016 et la production de la matière sèche sur la période de 1998 à 2017. La base de données spatiale utilisée est la Base Nationale de Données Topographique (BNDT) de l'institut Géographique du Burkina (IGB) dont l'échelle est au 1/200000. Compte tenu du système d'agrégation des données statistiques nationale, régionale et provinciales, la cartographie est réalisée à moyenne échelle et à l'unité spatiale de référence, la province.

1.2. Méthodes

Les années déficitaires et les années excédentaires en pluviométrie et en production de fourrage ont été dénombrées par région et par province sur la base du SPI qui est une valeur centrée réduite des précipitations annuelles.

1.2.1. Calcul de l'indice de sécheresse : « Standard Precipitation Index » (SPI)

Pour apprécier l'intensité de la sécheresse, le « Standard Precipitation Index » (SPI) ou Indice standardisé de précipitation développé par McKee *et al*. (1993) a été utilisé :

SPI = (Pi-Pm) / σ

Pm = Pluviosité ; **Pi =** précipitation de l'année et **σ** = écart type de la précipitation annuelle de 1983 à 2017. Le SPI permet de déterminer le degré d'humidité ou de sécheresse du milieu.

Le tableau 1 donne les classes de la sévérité de la sécheresse et de DMP selon le SPI.

Tableau 1. Classification de la sécheresse et de DMP en rapport avec la valeur du SPI

Valeurs de SPI	Interprétation du degré de sécheresse	Interprétation DMP
SPI > 2	Extrêmement humide	Extrêmement abondante
1,5 < SPI > 1,99	Très humide	Très abondante
1 < SPI > 1,49	Modérément humide	Modérément abondante
-0,99 < SPI > 0,99	Proche de la normale	Proche de la normale
-1,0 < SPI > -1,49	Modérément sec	Modérément déficitaire
-1,50 < SPI > -1,99	Sévèrement sec	Sévèrement déficitaire
SPI < -2	Extrêmement sec	Extrêmement déficitaire

1.2.2. Calcul de production de la matière sèche : « Dry Matter Production » (DMP)

Pour déterminer l'insuffisance de la production du fourrage, les données utilisées sont celles de « Dry Matter Production » (DMP) ou production de la matière sèche (PMS). Les données étant de même nature que celles précédentes, les valeurs centrées réduites des DPM ont été également calculées, pour permettre l'évaluation des intensités des déficits de la production du

fourrage sur les mêmes principes et en s'appuyant sur les mêmes seuils que ceux de McKee *et al*. (1993).

2. Résultats et discussion

2.1. Dynamique spatiale et temporelle de la pluviométrie à l'échelle du Burkina Faso

L'analyse de la variation interannuelle des pluies relevée au cours des 34 dernières années dans les 13 régions, fait apparaître une évolution à la hausse. La figure 1 montre une augmentation des totaux pluviométriques sur l'étendue du territoire. En effet, la dernière décennie (2007-2016) de la série d'étude (1983-2016) a été pluvieuse pour 8 régions. Seules les régions des Cascades et le Sud-ouest ont connu un déficit pluviométrique en 2007, il en est de même pour les régions du Centre, du Centre-ouest et les Hauts-bassins en 2011. Par contre, l'analyse de la sécheresse des deux décennies précédentes (1983-2006) indique un nombre important d'années sèches, quinze dans les Haut-bassins et quatorze à l'Est, au Centre-est, au Centre, les Cascades et la Boucle du Mouhoun. Le nombre de cas restant varie entre 13 et 12 épisodes secs. Les années les plus sèches de la période d'observation sont 1983 et 1984. Cet intervalle s'inscrit dans celui de la grande crise climatique qui a sévi dans le Sahel (1973-1974 et 1983-1984). Cette tendance évolutive des sécheresses a été observée sur la normale 1971-2000 par Dipama (2009) avec quatre grands épisodes de sécheresses en 1973, 1983, 1984 et 1997 et onze séquences sèches à la station de Ouahigouya. Par ailleurs, les tests de pettitt et ou la segmentation de Hubert appliqués à des longues séries pluviométriques allant de 1953 à 2013 à Gouré au Niger par Ozer *et al*., 2005 et au Bénin par Vissin, 2007, montrent tous des points de ruptures significatifs aux seuils de confiance de 95 % à 90 %, au tour des années 1970. À travers ces tests, les auteurs mettent en évidence le déficit pluviométrique des années 1970 et 1980. La variation du nombre d'années sèches est fortement corrélée à la migration des isohyètes et l'apparition de l'isohyète 400 mm au Nord (Dipama 2009 ; 2014).

Cette perception des épisodes de sécheresses à l'échelle régionale fait fit de certaine disparité, compte tenue de l'allure des droites de tendance à la hausse dans toutes les régions. Alors, il importe de connaître l'influence de la variabilité pluviométrique à une plus fine échelle, la province qui pourrait révéler des contrastes.

2.2. Caractérisation de la sécheresse

Le calcul du SPI permet d'évaluer le déficit des précipitations à différentes échelles de temps (Karrou, 2006). De l'analyse des cartes (Fig.2), l'on constate que sur la série de 34 années d'observation, les SPI des années sèches indiquent que 8 provinces ont connu des sécheresses modérées (Nord et Est du pays). Cependant 30 provinces ont connu des sécheresses sévères majoritairement situées dans la ceinture nord-soudanienne du territoire, contre 5 provinces qui ont vécu des sécheresses extrêmes, localisées dans la partie soudanienne du pays. Une seule province au Sud-Ouest a vécu des sécheresses exceptionnelles, notamment la province du Poni, contrairement à la province de l'Oudalan (au Sahel) qui n'a connu aucune sécheresse. Ce constat est suffisant pour parler de risque climatique, car pour Koudamiloro *et al*. (2016), une année d'humidité extrême et une année de sécheresse extrême sur une série de 1971 à 2010 favoriserait l'existence d'un risque hydroclimatique dans le bassin versant de l'Ouémé à Béterou (Bénin).

Quant aux années humides, l'analyse des SPI montre que 4 provinces dans les régions de l'Est, du Centre et du Centre-Sud ont connu des années d'humidité modérée au cours des 34 dernières années (Fig.2). Cependant 37 provinces reparties sur toute l'étendue du territoire ont connu des périodes très humides, contre 3 provinces situées au Nord-Est, Nord-Ouest et Sud-Ouest qui ont connu des périodes d'humidité extrême.

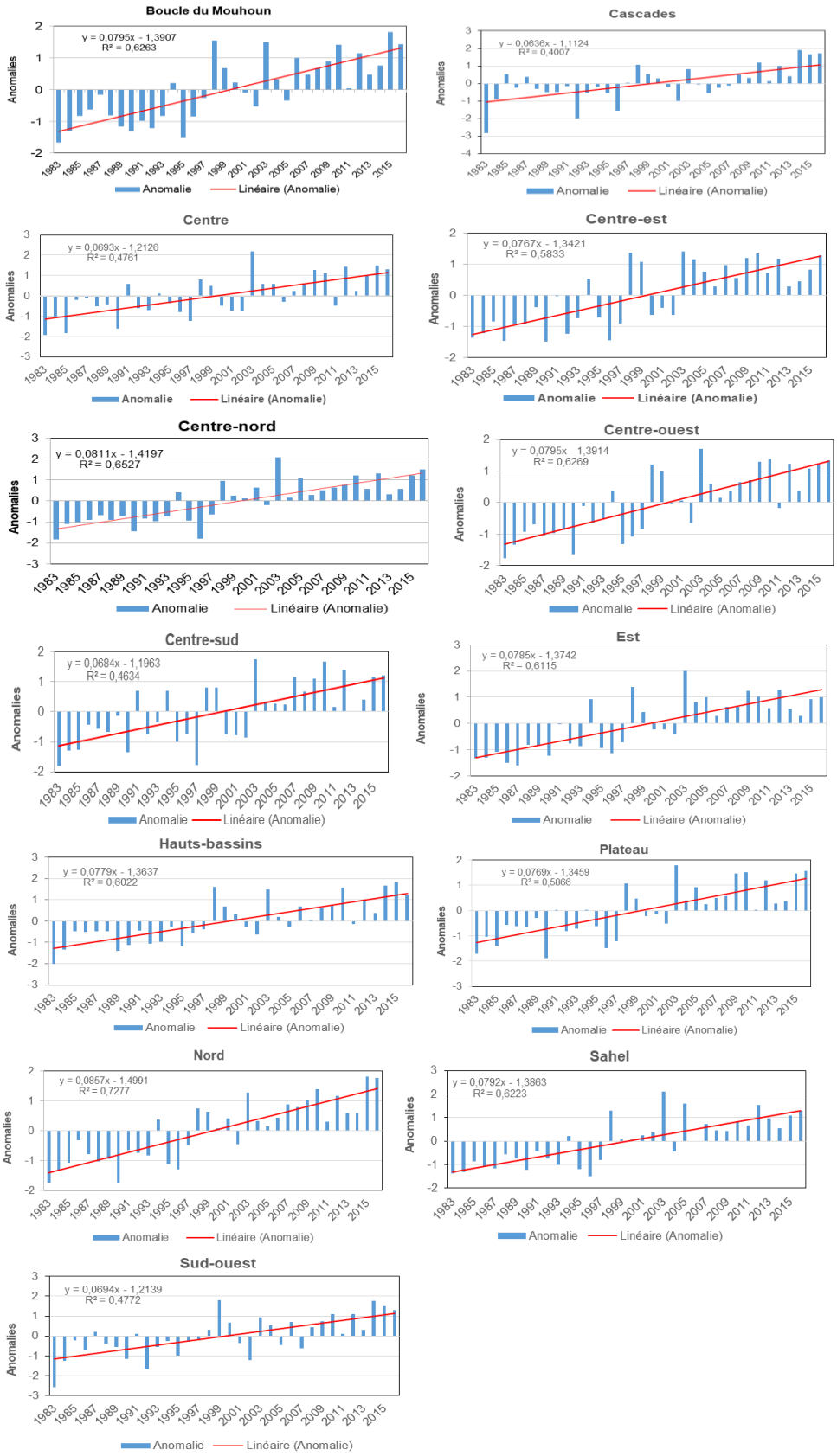


Figure 1. Burkina Faso -Variabilité interannuelle des précipitations par région (1983-2016)

Aucune province n'a vécu une humidité exceptionnelle. Or, des sécheresses exceptionnelles ont été enregistrées avec un SPI de l'ordre de -2 à -2,2 ce qui montre l'existence de risque climatique dans le Sud-Ouest.

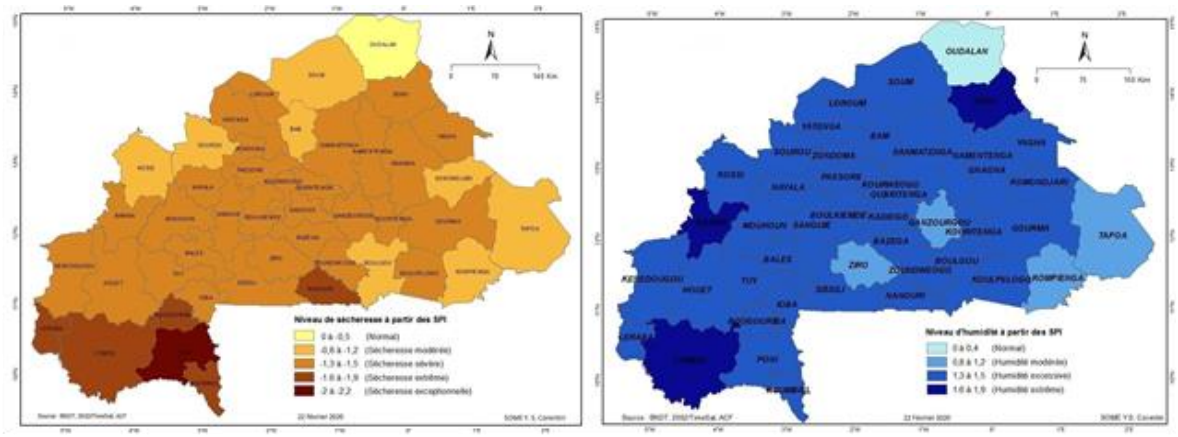


Figure 2. Burkina Faso - Indices standardisés de précipitation (SPI) de 1983 à 2016

2.3. Caractérisation de la production de la biomasse

L'impact de la sécheresse est perceptible sur la production de la matière sèche. En effet, on remarque le caractère généralisé du déficit de production de matière sèche (PMS) sur toute l'étendue du territoire ces deux dernières décennies (Fig.3). Les années déficitaires en PMS ont été modérées dans 5 provinces, sévères dans 26 provinces, extrême dans 10 provinces et un déficit exceptionnel dans 4 provinces. Les années d'abondance en PMS sont aussi constatées : 8 provinces ont connu une abondance modérée, 27 provinces de période très abondante, 8 provinces d'extrême abondance et une province en situation exceptionnelle de PMS. Il est à noter que pour l'ensemble de la série, une seule province a connu une abondance exceptionnelle (SPI = 4,03) et 4 provinces ont vécu un déficit exceptionnel (SPI= -2 à -6,3) localisées dans la ceinture sahélienne et nord-soudanienne, zone d'élevage par prédilection au Burkina Faso. Ces déficits fourragers, caractéristiques de l'irrégularité spatio-temporelle des pluies sont également aggravés par les risques de feu de brousse qui peuvent être très élevés dans les provinces à forte production de biomasse. Toutefois, l'augmentation sensible des précipitations sur les dix dernières années comme indiqué précédemment (Fig.1), laisse entrevoir une tendance à la hausse de la PMS.

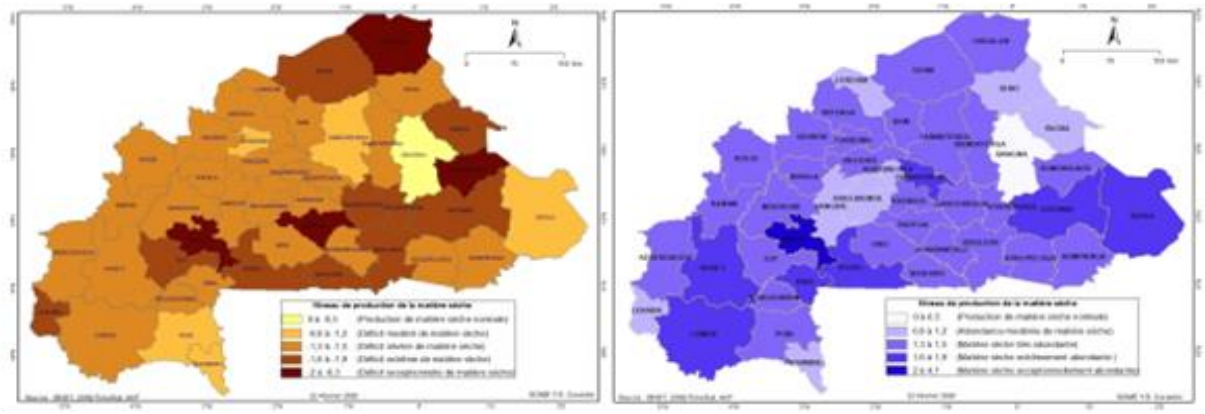


Figure 3. Burkina Faso - Indices standardisés de PMS de 1998 à 2017

2.4. Effets de la sécheresse et du déficit de PMS sur l'élevage

Au Burkina Faso, le risque climatique a des répercussions sur la disponibilité des ressources naturelles, mais aussi sur le système de production agropastorale. Au-delà de la quantité, la qualité et l'accessibilité de la plupart des points d'eau restent difficile aux animaux en raison de l'absence ou de l'obstruction des pistes à bétail existantes. Il ressort que le manque d'eau et/ou de fourrage peut être retenu pour l'alerte précoce de départ à la transhumance suite au

manque d'eau dans les affluents du sous-bassin du Niger au Burkina Faso. La date de départ précoce en transhumance suite au manque d'eau pourrait s'observer déjà au mois d'octobre, avec un mouvement orienté vers les zones d'abondance de PMS.

Selon le MRAH (2018), les provinces de Seno, Yagha, Komondjari et Comoé qui sont des zones de concentration de bétail en saison sèche, seront des sites critiques, car étant déjà en situation de déficit fourrager. Par ailleurs, on constate une migration définitive de certains éleveurs vers les pays voisins comme le Ghana et le Bénin.

D'une manière générale, les débits des cours d'eau sont très dépendants des pluies extrêmes qui conditionnent le tarissement précoce des chapelets de mare d'eau disponible pour l'abreuvement du bétail.

Conclusion

Le Burkina Faso connaît une variabilité interannuelle des précipitations caractérisées par une alternance de séquence humide et de séquence sèche. La caractérisation de la production de la matière sèche porte sur les années de déficit et d'abondance sur une période d'observation de 20 ans. Malgré la tendance d'évolution à la hausse de la pluviométrie au cours de la dernière décennie, les extrêmes climatiques, notamment les sécheresses exceptionnelles sévissent toujours avec pour corollaire une faible production de la matière sèche, un tarissement précoce des eaux de surface et un recul de la nappe phréatique. Ainsi, les extrêmes pluviométriques (humidité abondante) qui sont rarissimes, jouent un rôle considérable dans la disponibilité en eau pour l'abreuvement du bétail. À cet effet, il serait plus recommandé d'approfondir le suivi des chapelets de retenu d'eau par le débit.

Bibliographie

Dipama J. M., 2009. Les grands épisodes de sécheresse et leurs implications écologiques au Burkina Faso de 1970 à 2000. *CAHIERS DU CERLESHS*, 32-49.

Dipama J.M., 2014. Approche spatiale du phénomène du réchauffement climatique à l'échelle du Burkina Faso et perception des populations. *Climat et Développement,* 36-49.

Groupe de Recherche et d'Actions pour le Développement (GRAD), 2017. Problématique de la sécurisation des zones pastorales au Burkina Faso : état des lieux, enjeux et défis. Ouagadougou, *ONF-BF*, 88p.

Koudamiloro O., Vissin E.W., Dipama J.M., Houssou C. S., 2016. Études des risques hydroclimatiques dans le bassin versant du fleuve Ouémé à Bétérou au Bénin (Afrique de l'Ouest). *Revue scientifique MIRD*, 298-311.

Ministère des Ressources Animales et Halieutiques (MRAH), 2018. Suivi et évaluation des ressources pastorales pour la campagne 2018-2019 au Burkina Faso. Ouagadougou. Direction Générale des Espaces et des Aménagements Pastoraux, 70p.

Karrou M., 2006. Mise en place d'un système d'alerte précoce à la sécheresse dans 3 pays de la rive Sud de la méditerranée : l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Tunis, *OSS*, 61p.

Mckee T.B., Doesken J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration times scales. *American Meteorological Society*, 179-184.

Ozer P., Bodart C. et Tychon B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, article 308, mis en ligne le 02 mai 2005, modifié le 03 juillet 2007. URL : http://cybergeo.revues.org/3338.

Vissin E.W., 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 310p.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA REGION MONTAGNEUSE DU MOYEN ATLAS AU MAROC

SEBBAR A.[1], HSAINE M.[2], FOUGRACHE H.[2], SALOUI A.[3], BADRI. W.[2]

1 Direction de la Météorologie Nationale (DMN), Casablanca, Maroc (sebbar202@gmail.com)
2 Laboratoire Ecologie et Environnement (LEE), Equipe Ecologie et Ecophysiologie Végétale (3EV), Faculté des Sciences Ben M'Sik - Casablanca. Université Hassan II, Casablanca, Maroc (b1.wadi@hotmail.fr)
3 Département de Géographie, FLSH de Mohammedia, Université Hassan II, Casablanca, Maroc (saloui.abdelmalik@gmail.com)

Résumé : *Au Maroc, la région montagneuse du Moyen Atlas est une zone de transition entre les climats tempéré et subtropical. Elle est confrontée à un véritable problème de variabilité et de réduction pluviométrique. Cette forte variabilité pluviométrique influence énormément la disponibilité des ressources en eau pour une population sans cesse croissante et pour un couvert végétal en dégradation. Dans ce cadre, nous avons étudié d'une part la variabilité relative annuelle du régime pluviométrique et sa connexion avec l'Oscillation Nord Atlantique (ONA), et d'autre part, calculé l'indice pluviométrique standardisé régional (IPS) et analysé la significativité des tendances. Et afin de quantifier d'éventuelle réduction pluviométrique, nous avons cherché à détecter les ruptures au sein des séries pluviométriques des stations retenues. Il ressort qu'une rupture climatique a été identifiée vers la fin des années 1970. De même, les résultats obtenus, montrent que la majorité des stations étudiées signalent une tendance à la baisse, soit une réduction pluviométrique de l'ordre de 18 %.*

Mots clés : *changement climatique ; pluviométrie ; réduction ; ONA ; Moyen Atlas*

Summary: ***Impact of climate change on the mountainous Middle Atlas region of Morocco***. *In Morocco, the mountainous region of the Middle Atlas is a transition zone between the temperate and subtropical climates. It faces a real problem of variability and rainfall reduction. This high rainfall variability greatly influences the availability of water resources for an ever growing population and for degraded plant cover. In this context, we have studied on the one hand the annual relative variability of the rainfall regime and its connection with the North Atlantic Oscillation (ONA), and on the other hand, calculated the regional standardized rainfall index (IPS) and analyzed the significance of trends. And in order to quantify any rainfall reduction, we tried to detect breaks in the rainfall series of the stations selected. It appears that a climatic rupture was identified towards the end of the 1970s. Likewise, the results obtained show that the majority of the stations studied report a downward trend, a regional reduction in rainfall of the order of 18%.*

Key words: *climate change; rainfall; reduction; ONA; Middle Atlas*

Introduction

Lors des dernières décennies, dans les pays arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, la notion de la précarité en eau n'est pas récente. Néanmoins, les événements extrêmes qui ont affecté les pays du bassin méditerranéen à savoir, les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur ou de froid, présentent toutes à la fois une sévérité, une extension et une intensité très remarquées (GIEC, 2007 ; Sebbar *et al.*, 2011). Ainsi, plusieurs recherches ont été menées dans différentes régions du globe pour étudier la disponibilité des ressources en eau et plus particulièrement, pour caractériser l'évolution du régime pluviométrique. En Afrique sahélienne et non sahélienne, Paturel *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1999, ont mis en évidence une baisse significative de la pluviométrie annuelle. Tandis qu'en Afrique du Nord, notamment en Algérie, Meddi *et al.*, 2009 ont détecté la fluctuation la plus brutale et la plus significative autour des années 1980. Au Maroc, la répartition des précipitations a été étudiée depuis les années 1940, grâce aux travaux d'Emberger (1952), premier auteur à avoir établi la carte pluviométrique du Maroc septentrional. D'autre part, Sebbar *et al.*, (2012) ont confirmé l'irrégularité des pluies et ont mis en évidence une diminution importante des apports depuis 1980 au niveau du Haut Atlas sur la période 1935/2009. Dans ce cadre, nous proposons d'une part, d'étudier la variabilité relative annuelle du régime pluviométrique et sa connexion avec l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) au niveau de la région montagneuse du Moyen Atlas, et d'autre part, de calculer l'indice pluviométrique standardisé régional (IPS) et d'analyser la

significativité des tendances. Et afin de quantifier d'éventuelle réduction pluviométrique, nous allons détecter les ruptures au sein des séries pluviométriques des stations retenues et émettre des hypothèses de ce changement.

1. Base de données et méthodologie

1.1. Zone d'étude

Notre zone d'étude est une région montagneuse qui s'ouvre à la fois sur l'océan Atlantique et sur la Méditerranée, entre les 32ème et 34ème parallèles et les longitudes 7° et 4° W. C'est une vaste région de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale. Située au centre du Maroc, elle est limitée au nord par la chaîne du Rif, à l'est par les plateaux orientaux, au sud par la chaîne du Haut Atlas et à l'ouest par la Meseta occidentale (océan Atlantique). Elle est caractérisée, par un climat méditerranéen, du semi-aride à l'hyper-humide, avec une altitude qui atteint 3700 m (Fig.1), (Sebbar, 2013). La région montagneuse du Moyen Atlas reçoit des cumuls pluviométriques annuels allant de 220 à plus de 1500mm. Les précipitations diminuent, du nord vers le sud et en fonction de l'exposition, et inversement pour les températures.

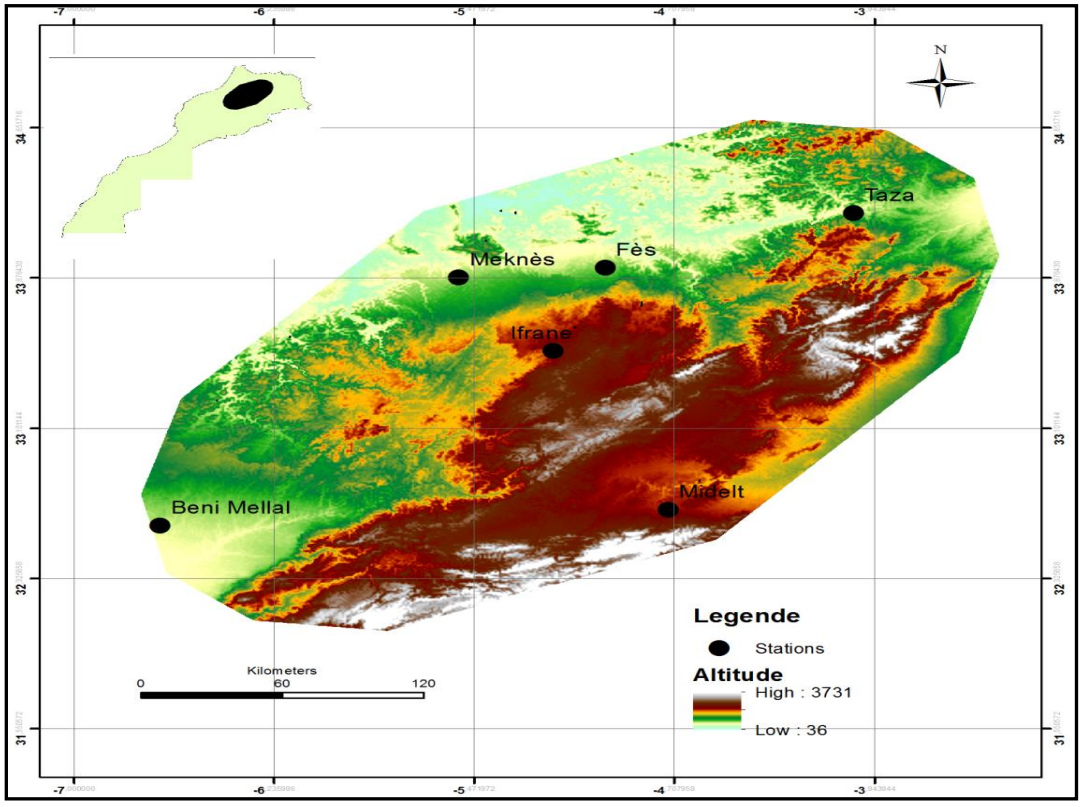


Figure 1. Zone d'étude et stations retenues

1.2. Traitement de la base de données

La base de données utilisée pour cette étude provient des services d'hydrologie, des plans directeurs, de la Direction de la Météorologie Nationale, du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et des services des Eaux et Forêts. Elle se compose de cumuls pluviométriques mensuels et annuels de six stations réparties sur l'ensemble de la zone d'étude pour des périodes d'environ un siècle (Tab.1). Notre choix des stations s'est basé sur trois critères : (i) des séries d'observations complètes ou quasi complètes, (ii) une répartition spatiale relativement uniforme, (iii) des stations issues de réseaux professionnels.

Tableau 1. Caractéristiques des stations étudiées

Station	Longitude (DD)	Latitude (DD)	Altitude (m)	Période d'observation	Pluie Moyenne (mm)	C_V (%)
Béni Mellal	-6,67	32,60	468	1922/2015	396	30
Meknès	-5,53	33,88	549	1931/2015	548	28
Fès	-4,97	33,93	598	1914/2015	511	25
Taza	-4,02	34,21	521	1921/2015	625	35
Ifrane	-5,17	33,50	1660	1957/2015	1013	31
Midelt	-4,73	32,68	1508	1932/2015	200	35

Pour combler les données manquantes, nous avons appliqué la méthode développée par Laborde & Mouhous (1998). L'homogénéité des séries a été vérifiée et ajustée avec le logiciel AnClim (Stèpànek, 2005), par l'application du test d'homogénéité normal standard (SNHT).

1.3. Méthodologie

Pour la détection des ruptures au sein des séries pluviométrique, nous avons employé les tests statistiques de Pettitt (1979), de Lee et Heghinian (1977), U de Buishand (1984) et la méthode de segmentation d'Hubert (1989), permettant de déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique. L'approche de Pettitt « suppose un non-changement de la variance de la série étudiée ». Pour vérifier cette hypothèse a posteriori, nous avons comparé les variances avant et après la date de rupture de chaque station étudiée par l'application du test F de Fisher. Tandis que pour analyser et vérifier les tendances des précipitations et leurs significativités, nous avons appliqué le test non paramétrique de Mann-Kendall. Nous avons calculé l'IPS pour déterminer le caractère humide ou sec de chaque année. La quantification de la réduction pluviométrique est basée sur la formule suivante (Meddi *et al.*, 2009) :

Tr: Taux de réduction
Ma: moyenne avant rupture
Mp: moyenne après rupture

$$Tr = [\frac{Ma - Mp}{Ma}] * 100$$

2. Résultats et discussion

Pour l'ensemble des stations étudiées le coefficient de variation (C_V %) des pluies annuelles varie entre 25 et 35 % (Tab.1). L'irrégularité pluviométrique est plus importante pour les stations de Midelt exposée à un régime de sud-est sec et chaud (Sebbar, 2013) et pour la station de Taza située plus à l'est (C_V= 35%), alors que la variabilité relative (Cv) reste en dessous de 30 %pour les autres stations.

D'autre part, après application du test de Mann Kendall pour les différentes séries, il ressort que la majorité des stations enregistre une tendance à la baisse non significative de la pluviométrie annuelle à l'exception de la station de Meknès où cette tendance est significative puisque P_{value} = 0,004 (Tab.2).

L'application du test F de Fisher (test bilatéral) (Tab.2) montre que les deux variances sont statistiquement identiques, étant donné que la valeur de la « p-value » est supérieure au seuil de signification $\alpha = 0.05$, et donc l'hypothèse principale (H0 : les variances sont identiques) est acceptée. La majorité des ruptures détectées par les différents tests de rupture (Fig.2) ont eu lieu vers la fin des années 1970 et semble dominer. Ainsi, on propose donc l'année 1979 comme année de rupture du régime pluviométrique dans la région du Moyen Atlas au Maroc. Ces résultats concordent avec ceux d'autres chercheurs. A l'échelle de la rive sud méditerranéenne, les travaux effectués sur la même période d'étude par Meddi *et al.*, (2009) et Hallouz *et al.*,

(2013) en Algérie, ainsi que par Bouzaiane et Lafourgue (1986) et Henia (2008) en Tunisie, signalent une tendance à la baisse des précipitations à partir de 1975.

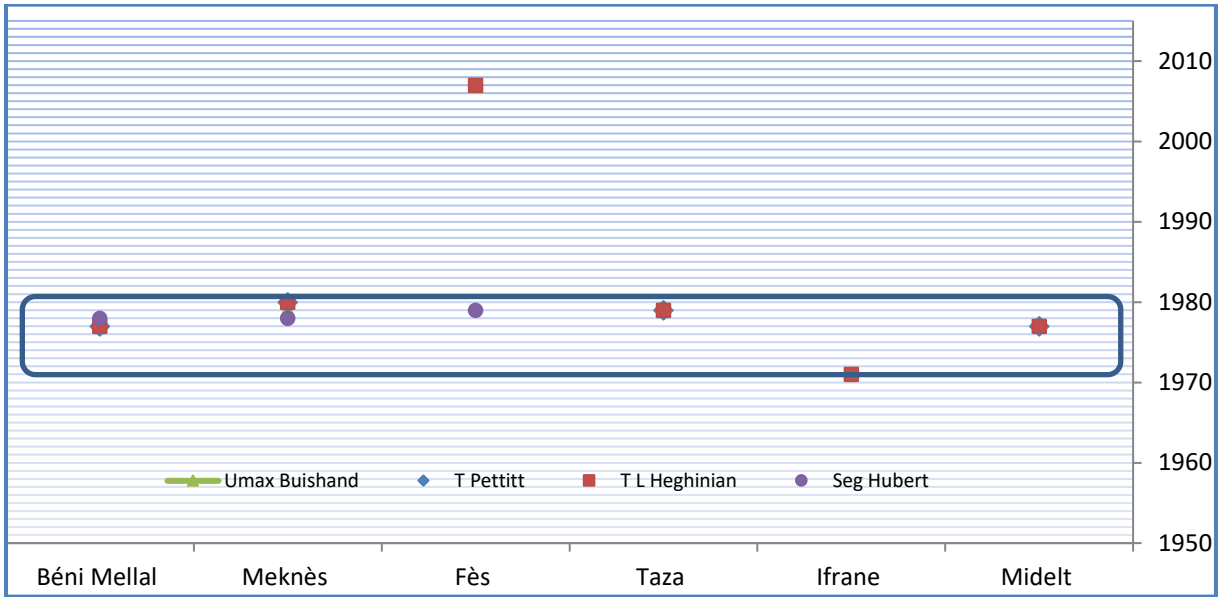


Figure 2. Phase de rupture pluviométrique dans la région du Moyen Atlas

A l'échelle nationale, Singla *et al.*, (2010) décrivent également que dans certaines régions du Maroc une rupture climatique a débuté vers 1976. Elle s'est étendue largement vers 1979-1980 à la presque totalité du Royaume. D'autre part, dans son rapport 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique que les pays de la rive Sud méditerranéenne subissent une réduction pluviométrique qui va s'accentuer dans le futur.

Tableau 2. Tests de rupture et de significativité des tendances (NS : non significative ; S : significative)

Station	Test dePettitt	Test de Lee Heghinian	U_{max} de Buishand	Segment de Hubert	Test de Fisher	Test de Mann Kendall (α = 0.05)	Tendance
Béni Mellal	1977	1977	---	1978	P_{value} = 0,896	P_{value} = 0,311	NS
Meknès	1980	1980	1979	1978	P_{value} = 0,543	P_{value} = 0,004	S
Fès	---	2007	---	1979 et 2007	P_{value} = 0,022	P_{value} = 0,203	NS
Taza	1979	1979	1979	---	P_{value} = 0,366	P_{value} = 0,115	NS
Ifrane	---	1971	---	---	P_{value} = 0,991	P_{value} = 0,266	NS
Midelt	1977	1977	---	---	P_{value} = 0,085	P_{value} = 0,313	NS

Le calcul de l'indice pluviométrique standardisé (Fig.3) a permis de localiser une phase normale entre 1914 et 1941, une phase déficitaire de 1941 à 1956, puis une phase normale et/ou excédentaire jusqu'à la fin des années 1970. Après ces années, la baisse de la pluviométrie s'est installée d'une manière significative jusqu'en 2007 avant de retrouver des années humides à normales jusqu'en 2012. De plus, il convient de noter une opposition de phase entre les indices IPS et ONA. La région montagneuse du Moyen Atlas a connu une période humide pendant laquelle l'ONA présentait une phase négative. Après la fin des années 1970, une phase fortement positive de l'ONA s'est installée, avec une persistance de l'anticyclone des Açores et des valeurs élevées de la pression sur l'Atlantique autour des Açores. Cela a sans doute beaucoup contribué à l'installation de la sécheresse dans cette région. On pourrait donc émettre l'hypothèse que la rupture détectée aux alentours de 1979 est probablement principalement due au changement de phase de l'ONA.

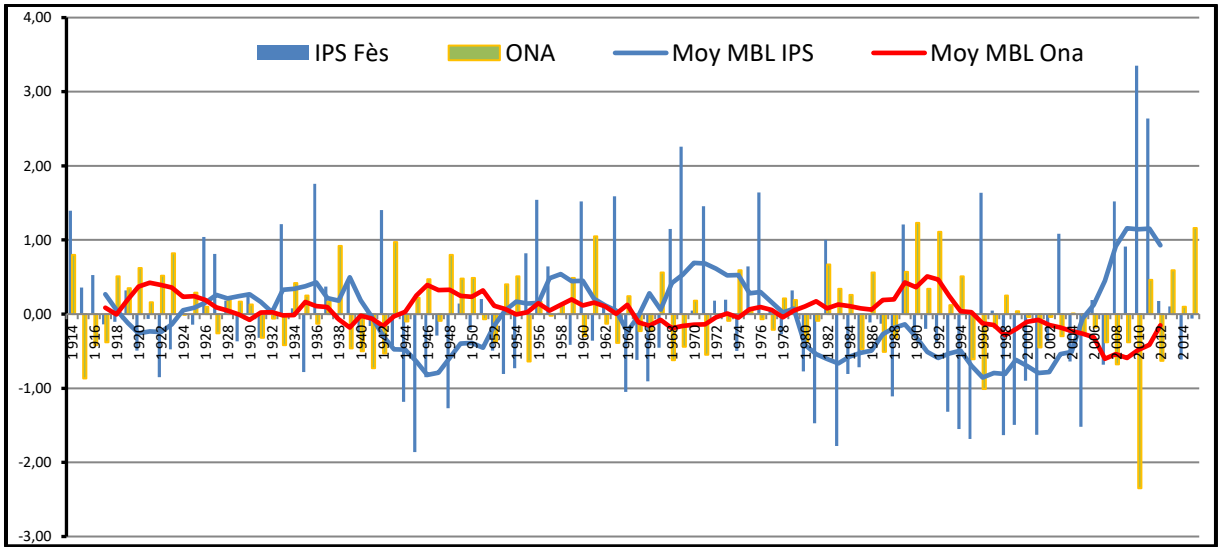


Figure 3. Opposition de phase entre l'IPS et l'ONA à la région du Moyen Atlas (1914/2015)

Cette similitude du comportement du régime pluviométrique à la région du Moyen Atlas s'expliquerait par l'organisation de la variabilité des cumuls pluviométriques annuels et leurs tendances. D'où la nécessité de quantifier la réduction des précipitations annuelles et localiser les parties les plus touchées.

Nous avons calculé les taux de réduction pluviométrique pour deux cas :

- une période homogène pour toutes les stations qui s'étale de 1957 à 2015;
- l'ensemble de la période disponible pour chaque station.

D'après le tableau 3, il ressort que la totalité des stations présente une réduction pluviométrique. Les plus importantes sont enregistrées par les stations de Meknès, Taza, Midelt et Béni Mellal aux alentours de 25 % pour la période 1957/2015 et aux alentours de 17 % pour l'ensemble de la période disponible.

A l'échelle de notre région d'étude, le taux de réduction moyen est de l'ordre de 17,7 % après la rupture de 1979. Ces résultats concordent avec ceux obtenus à l'échelle du bassin méditerranéen. En effet, cette réduction des apports en eau a certainement impacté la disponibilité des ressources en eau et par conséquent, la population locale, la faune et la flore de cette région montagneuse.

Tableau 3. Taux de réduction pluviométrique après la rupture de 1979 en (%)

Période	Béni Mellal	Fès	Meknès	Taza	Ifrane	Midelt
1957/2015	24,2	12,6	24,0	26,1	12,9	24,2
Période dispo.	15,8	08,3	19,5	13,6	----	18,8
Après 1979	10,4	20,0	19,8	21,5	12,9	21,8
Après 1979 régional		17,7				

Période dispo. : Période de données disponible (1914/2015 ou 1922/2015)

Conclusion

Il apparait à travers cette étude que les précipitations annuelles dans la région montagneuse du Moyen Atlas sont caractérisées par une forte variabilité. Ainsi suite au changement climatique, on a conclu que les séries annuelles ont signalé des tendances à la baisse généralement non significative. D'autre part, une rupture pluviométrique a été détectée autour de l'année 1979 suivie d'une période exceptionnellement déficitaire accompagnée d'un taux de réduction pluviométrique de l'ordre de 18 %. Il convient aussi de soulever la liaison des

caractères humides ou secs de l'année avec les phases de l'ONA. Une étude approfondie sur les oscillations de l'ONA et ses relations avec les régimes pluviométriques saisonniers sera d'une grande utilité pour déceler d'éventuelles corrélations.

Bibliographie

Bouzaiane S., Lafforgue A., 1986. *Monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil*. Tunis, Paris, Ministère de l'Agriculture, ORSTOM, 1058p.

Buishand T.A., 1984.Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 58, 51-69.

Emberger L., 1952. Sur le quotient pluviométrique, CR. *Ac. Sci.* 234, 2508 – 2511.

GIEC, 2007. *Impacts adaptation and vulnerability, Summary for policymakers.* Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. URL: www.ipcc.ch.

Hallouz F., Meddi M., Mahe G., 2013. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'Oued Mina (nord-ouest d'Algérie). *Revue des sciences de l'eau*, 26(1), 33-38.

Henia L., 2008. *Atlas de l'eau en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis 1, 186 p.

Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.

Laborde J.P., Mouhous N., 1998. Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Equipe de gestion et Valorisation de l'Environnement, Nice, 4p.

Lee A.F.S., Heghinian S.M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables - A Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 503-506.

Meddi H., Meddi M., 2009. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 20(1), 57-65.

Paturel J.E., Servat E., Kouame B., Lubes H., Ouedraogo M., Masson J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II : an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191, 16-36.

Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.

Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A., Badri W., 2011. Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004). *Sécheresse*, 22, 139-148.

Sebbar A., Fougrach H., Hsaine M., Badri W., 2012. Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. *Actes du XXV^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble, France, 709-714.

Sebbar A., 2013. *Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations*. Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat en Bioclimatologie, Univ. Hassan II, Fac. Sci. Ben M'Sik, Casablanca, 189p.

Servat E., Paturel J.E., Lubes H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M., *et al.*, 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 363-87.

Singla S., Mahe G., Dieulin C., Driouech F.,Milano M., El Guelai F.Z., Ardoin-Bardin S., 2010.Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. *IAHS-AISH publication*, Vol.340, 679-687.

Stèpànek P., 2005. AnClim – software for time series analysis. Dpt of Geog. Fac. of Nat Sc, MU Brno, 1, 47p.

CLIMATE CHANGE IMPACT ON TWO VITICULTURAL REGIONS: VALENCIA DO AND GORIŠKA BRDA

SIRNIK I.[1], QUENÓL H.[1], JIMÉNEZ-BELLO M.A.[2], MANZANO J.[3], LE ROUX R.[4]

1 LETG RENNES, Université Rennes 2, Rennes, France (igsir@topo.upv.es ; herve.quenol@univ-rennes2.fr)
2 Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de València, València, Spain (mijibar@dihma.upv.es)
3 Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVER), Universitat Politècnica de València, València, Spain (juamanju@agf.upv.es)
4 Forêts et Sociétés, CIRAD, TA C-105 / D-Campus international de Baillarguet, Montpellier, France, (renan.leroux@cirad.fr)

Summary: *Changes in viticulture, especially in the location of vineyards and the introduction of new grape varieties, are becoming a reality due to climate change. The purpose of this research is to provide a spatial-temporal assessment of climate change during the period 1965-2100 and its impact on viticulture in two vine-growing regions: Valencia DO, located in eastern Spain and Goriška Brda, in western Slovenia. It was used the meteorological data retrieved from four weather stations, associated with future climate models from Eurocordex project, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The spatial-temporal study was conducted by using two bioclimatic indices - Huglin and Winkler - suggesting the most favorable grape varieties in terms of local climate conditions. By following the presented models of suitable grape varieties, there are high probabilities to increase the competitiveness of both vine-growing regions in the future and stimulate the wine economy at a regional and national level.*

Key words: *viticulture; climate change; Winkler; Huglin*

Résumé : ***Impact du changement climatique sur deux régions viticoles: Valencia Do et Goriška Brda.*** *L'évolution de la viticulture, notamment dans la localisation des vignobles et l'introduction de nouveaux cépages, devient une réalité du fait du changement climatique. Le but de cette recherche est de fournir une estimation de l'évolution spatio-temporelle du changement climatique au cours de la période 1965-2100 et de son impact sur la viticulture dans deux régions viticoles : la DO de Valence, située dans l'est de l'Espagne et Goriška Brda, située dans l'ouest de la Slovénie. Nous avons utilisé les données météorologiques extraites de quatre stations météorologiques, associées aux futurs modèles climatiques du projet Eurocordex, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. L'étude spatio-temporelle a été réalisée en utilisant deux indices bioclimatiques - Huglin et Winkler - suggérant les cépages les plus propices en termes de conditions climatiques locales. En suivant les modèles présentés de cépages appropriés, il y a de fortes probabilités d'augmenter la compétitivité des deux régions viticoles à l'avenir et de stimuler l'économie viticole aux niveaux régional et national.*

Mots clés : *viticulture ; changement climatique ; Winkler ; Huglin*

Introduction

Changes in viticulture, especially in the variety and changing position of vineyards, are observed worldwide. Moreover, shifts in the vine's phenological stages and changes in wine characteristics are facts, which clearly show the recent impact of climate change on viticulture; indeed, the adaptation of viticulture is essential and should be based on future climate models. In the future, viticulture will confront two important climate forces: increasing temperature and changing precipitation patterns, which will have a severe impact on grapevine phenology and soil water availability. *Vitis vinifera* is a demanding cultivar, requiring a basal temperature of 10°C for its normal growing cycle (Winkler *et al.*, 1974) and it needs relatively high solar radiation intensities (Magalhães, 2008). The increasing temperatures worldwide during the last few decades (IPCC, 2018) have caused prolonged exposure to excessive heat and have influenced the vine's physiological processes (Flexas *et al.*, 1999).

Bioclimatic indices are usually used as a tool to assess climate suitability and climate modelling, thus providing significant data for spatial-temporal analysis (Nesbitt, 2016). There are numerous bioclimatic indexes used to determine the characteristics of wine regions in function of grape varieties, nevertheless there are only a few based on temperature (Gladstones, 1992).

There were several investigations undertaken using bioclimatic indices as a tool for analysis on the impact of climate change on viticulture worldwide (Tonietto & Carbonneau, 2004) and several studies addressing the impact of climate change on viticulture by bioclimatic indices in Europe (Neethling *et al.*, 2012). However, there have been fewer studies in Spain (Resco, 2015) and even less in Slovenia (Vršič *et al.*, 2014) and in the Goriška Brda (Brda) wine-growing area. Even fewer studies have been undertaken that address future modelling using bioclimatic indices. In order to provide a spatial-temporal assessment of climate change and its impact on viticulture, we used a methodology based on the calculation of bioclimatic indices Huglin (HI) and Winkler (WI) (Tonietto & Carbonneau, 2004) to analyze and define their dynamics in Valencia DO and Goriška Brda study sites. The model of bioclimatic indices HI and WI was elaborate for the period 1965-2100, suggesting grape varieties due to climate change on both study sites.

1. Data and Method

There are two viticultural study sites chosen for the purposes of this research: Brda, located in the western part of Slovenia, and Valencia DO, in the eastern part of Spain. Both study sites enjoy similar topographical conditions. Each site benefits from, and is influenced by, the Mediterranean Sea climate and is located within 70 kilometers from the coastline (Fig.1).

Goriška Brda (Brda) is a relatively small area, located next to the Slovenian-Italian border. The climate is described as mild-mediterranean, classified as 'Cfa' class according to the Köppen-Geiger climate classification system (Peel *et al.*, 2006). The site's coldest average January temperature is 3°C, the hottest average August temperature is 24°C and average yearly precipitation is approx. 1500 mm (Arso, 2019). The soil fragmentation originated from the oceanic sedimentary mass, and consists of layers of flysch, clay, marl, sandstone and limestone (Drnovšček, 1994). Total surface area of vineyards is 1802 ha. Most important vine varieties are: Rebula (*Ribolla Gialla*), Chardonnay, Merlot, Sauvignonasse (*Tocai Friulano*) and Sivi pinot (*Pinot gris*). Vine is grown from 80 m above sea level (asl) to 400 m asl of altitude (Gorjak, 2017). Valencia DO enjoys a Mediterranean climate, classified as BSk, according to the Köppen-Geiger climate classification system. The local climate has mild winters with an average high temperature of 14°C and long, warm summers with an average high temperature of 28°C in July and August. The average rainfall reaches 424 mm per year (IVIA, 2019). The altitude of the vineyards is between 60 m asl and 800 m asl (Benavent Aleixander & Crespo Díaz, 2005). In the upper soil horizon, there is a lack of humus. Clay is generally present in the soil in all Valencia DO, which increases the quality of wine due to its ability to retain water (White, 2003).

The temperature data were retrieved from the weather stations with observation datasets for the period 1965-2016 and located as close as possible to the both study sites for the period 1965-2016 (Fig.1). The parameters used were daily maximum (Tmax) and mean temperature (Tmean). Datasets of future climate were retrieved from the Eurocordex project under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the period 1985-2100 (Jacob *et al.*, 2014)

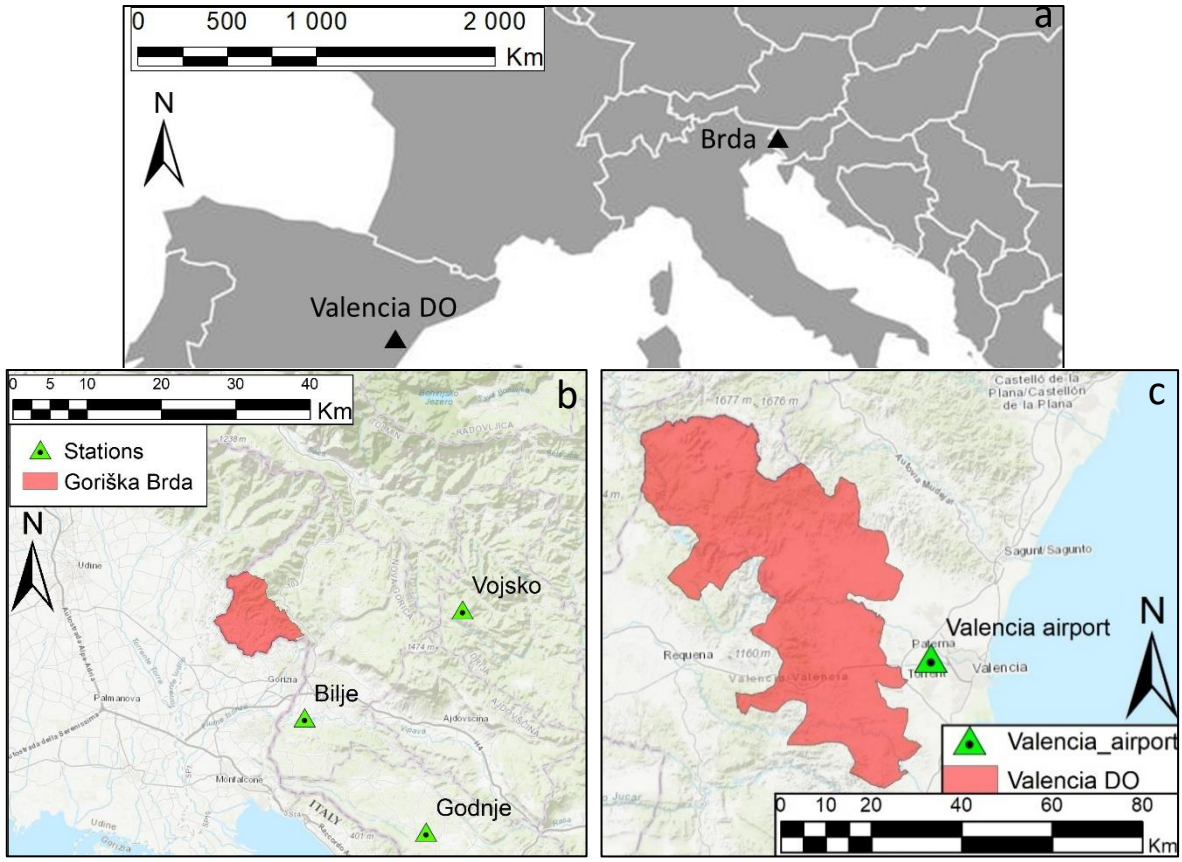


Figure 1. Location of the two study sites Valencia DO and Brda (map a), used weather stations in Brda (map b) and Valencia DO (map c)

The bioclimatic indices HI and WI were calculated, with the purpose of defining general guidelines for the potential quality and style of wine (Winkler *et al.*, 1974). The WI estimates the characteristics of geographical zones and the local adaptation of grape varieties (Winkler *et al.*, 1974). It is classified into five different regions with designated suggested grape varieties: HI is derived from the observed or simulated daily temperature in a certain period and is correlated with wine growth and sugar concentration in berries. It is classified into six HI classes, where each class suggests a grape variety according to the number of points in a class (Huglin, 1978). Bio indices WI and HI are categorized in the way, that lower index points, suggest grape varieties, which produce quality yield in colder climate (Chardoney, Gewurztraminer) and higher index points suggest grape varieties, which produce quality yield in warmer climate (Grenache, Tempranillo).

2. Results

Observation temperature data and modelized scenarios demonstrate an upward trend during the entire analysis period (1965-2100) in both study sites. However, the observed and modelized temperatures in Valencia DO show approx. 4°C higher values comparing to Brda. The correlation between observed and modelized temperatures is strong in both winemaking regions. Average absolute differences between observed and modelized Tmean show less than 1°C in both study areas. The WI and HI evolution demonstrate similar progress as temperature, since bio indices derive from temperature. Progress of observed and modelized WI and HI show a positive tendency during the entire analysis period in both regions (Fig.2).

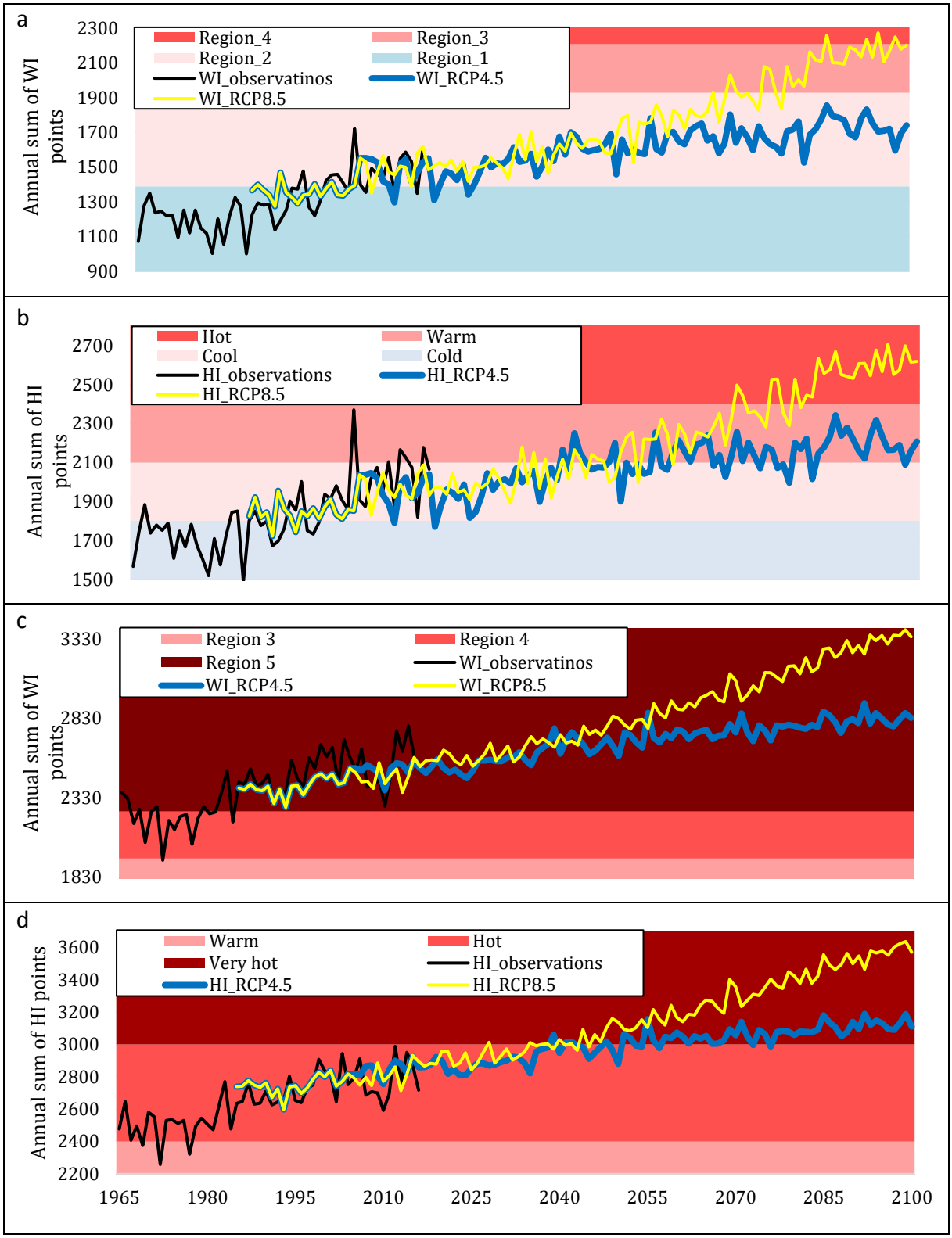


Figure 2. Progress of bio indices WI and HI for the period 1965-2100 in Brda (maps a and b) and Valencia DO (maps c and d). WI and HI classes are depicted with different colors. WI and HI_observations stand for annual average value of WI and HI derived from observed temperature during period 1965-2016. WI_RCP4.5 and HI_RCP4.5 stand for annual average value of WI and HI derived from modelized daily temperature under RCP4.5 scenario 1985-2100. WI_RCP8.5 and HI_RCP8.5 stand for annual average value of WI and HI derived from modelized daily temperature under RCP8.5 scenario (1985-2100).

Roughly estimated, the difference of WI and HI under both climate scenarios considerably diverges from the year 2050. The increment of both bioclimatic indices shows higher values under RCP8.5 scenarios during the entire analysis period 1965-2100. WI progress shows the increase of 862.10 points in Brda and 916.82 point in Valencia (RCP8.5). HI progress demonstrates lower increase: 783.89 in Brda and 901.06 HI points in Valencia DO (RCP8.5).

In the year 1965, viticultural site Brda was classified as HI's "Cold class" and WI's "First region". Hence, the suggested grape varieties according to bioclimatic index WI are Pinot noir, Riesling, etc.; according to HI: Sauvignon blanc, Riesling, etc. According to RCP4.5 scenario, the HI class for Brda will shift until the year 2100 to "Warm class" with recommended grape varieties: Grenache, Mourvèdre and Carignan. WI will shift to the next region, "Third region", with recommended varieties: Grenache, Tempranillo, etc. According to RCP8.5 scenario, HI class will shift until the year 2100 by two classes. WI will shift until the year 2100 to the "Fourth region" with suggested grape varieties: Carignan, Cinsault, Mourvedre and Tempranillo.

According to the grape varieties recently cultivated in Valencia DO, it corresponds to Region 3 and 4 of WI bioclimatic index: Tempranillo, Monastrell, etc. WI, calculated from observed and modelized temperature data during recent years, corresponded to the Region 5, where suggested grape varieties are Primitivo, Nero d'Avola, Palomino and Fiano. Modelized WI progress by 2100 shows positive growth under the both scenarios and it remains in the Region 5. Around the year 2055, the WI model under RCP4.5 shows a shift, where WI points exceed 2800 points, suggesting too hot conditions for viticulture. The WI model under RCP4.5 shows moderate progress, nevertheless it passes the 2800 WI points barrier around the year 2090.

Conclusions and Discussion

Future climate models showed warming trends and increases in indices HI and WI in the Goriška Brda and Valencia DO sites under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios by the year 2100. The future models of bioclimatic indices demonstrated temperate progress of suggested grape varieties by the year 2100, presenting an important tool for winemakers for their future adaptation strategies. Nevertheless, the climate change impact will be more severe in the Valencia DO site, also due to its present hot climate conditions. The predictions by the year 2100 reveal a shift of HI to the hottest level (Very hot class), "no heliothermal constraint for grapes to ripen". WI has already reached the hottest region (Region 5) suggesting grape varieties with high level of heat resistance, such as Primitivo, Nero d'Avola, Palomino and Fiano. By the year 2050, roughly estimated, will Valencia DO reach the level of 2800 WI points (under RCP8.5), beyond which viticulture is not suggested anymore. In contrast with the Goriška Brda site, where HI and WI indices indicate more favorable climate conditions for viticulture, although the increase was higher than at Valencia DO site. According to future predictions, the HI will reach Warm (RCP4.5) and Hot class (RCP8.5) with suggested grape varieties Grenache, Mourvèdre and Carignan. WI increase by 2100 will reach Region 3 (RCP4.5) and Region 4 (RCP8.5), suggesting Grenache, Barbera, Tempranillo Syrah, Carignan, Cinsault, Mourvedre and Tempranillo by the year 2100. The shift by 2100 will be less intense at the Valencia DO site, however, the future climate conditions will create serious limitations for viticulture. In contrary, Goriška Brda will face higher shifts of regions/classes of bioclimatic indices and will still not be limited by climate conditions by the year 2100. Moreover, the future warming trends will consequently bring positive characteristics in viticulture to the Brda region.

Using modelized data causes a certain level of uncertainty, since future climate models do not present the future with 100% certainty. A climate model is a simplified representation of future climate (Boé, 2007). To achieve a more precise future temperature tendency, there should be a higher number of weather stations with homogenic spatial distribution. Moreover, in the future, more climate data will be available, hence more precise future climate models can be created.

Nevertheless, the computer technology advances, along with the research progress. Downscaling methodology will contribute to higher spatial resolution and more precise future climate data. By having more future climate data, there will be more available data to respond to the future impact of climate change.

Literature

Arso, 2019. Slovenian Environment Agency. Retrieved June 10, 2019. URL: http://www.arso.gov.si/en/

Benavent Aleixander J. L., & Crespo Díaz F., 2005. *Geografía vitivinícola nacional e internacional*. Valencia: Librería gastronómica, 360p.

Boé J., 2007. *Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France*. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 256p.

Drnovšček J., 1994. Briški vinorodni okoliš. In Vodnik po slovenskih vinorodnih okoliših. Prunk J. (ur.). Ljubljana, Založba Grad: 24-41.

Flexas J., Escalona J. M., & Medrano H., 1999. Water stress induces different levels of photosynthesis and electron transport rate regulation in grapevines. *Plant Cell and Environment*, 22, 39–48.

Gladstones J., 1992. *Viticulture and Environment*. Adelaide, Australia: Winetitles, 320p.

Gorjak R., 2017. *Slovenija vinska dežela*. Mengeš: Narodna in univerzitetna knjižnica Ljubljana, 214p.

Huglin P., 1978. Nouveau Mode d'Évaluation des Possibilités Héliothermiques d'un Milieu Viticole. *Proceedings of the Symposium International Sur L'Ecologie De La Vigne,* Paris, 89–98.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018. Summary for Policymakers. In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. Geneve: World Meteorological Organization, 24p.

IVIA (Instituto valenciano de investigaciones agrarias), 2019. IVIA - *Generalitat Valenciana.* Retrieved May 18, 2019.URL: http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos

Jacob D., *et al.*, 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578.

Magalhães N., 2008. *Tratado de Viticultura – A Videira, a Vinha e o Terroir*. Lisboa: Chaves Ferreira Publicações, 608p.

Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C., & Quénol H., 2012. Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Climate Research,* 53(2), 89–101.

Nesbitt A., 2016. *A climate for sustainable wine production: Modelling the effects of weather variability and climate change on viticulture in England and Wales*. University of East Anglia, 208p.

Peel M. C., Finlayson B. L., & McMahon T. A., 2006. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.

Resco P., 2015. *Viticultura y Cambio Climático en España: Vulnerabilidad en las distintas regiones y estrategias de adaptación frente al desarrollo de nuevas políticas*. Universidad Politécnica de Madrid, 194p.

Tonietto J., & Carbonneau A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology,* 124(1–2), 81–97.

Vršič Stanko, Šuštar V., Pulko B., & Šumenjak T. K., 2014. Trends in climate parameters affecting winegrape ripening in northeastern Slovenia. *Climate Research,* 58(3), 257–266.

White R. E., 2003. Soils for Fine Wines. Oxford press, New York, 279p.

Winkler A. J., Cook J., Kliewer W., & Lider L., 1974. *General Viticulture*. Berkeley, Los Angeles, London: University of California Press, 710p.

PROFIL THERMIQUE NOCTURNE A TRÊS LAGOAS - MS (BRÉSIL)

SOARES DA SILVA M.H., ORTIZ PORANGABA G.F.O., PEREIRA DE FREITAS J.C.

Laboratoire de Biogéographie et Climatologie Géographique, Université fédérale de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, Brésil (mauro.soares@ufms.br)

Résumé : *Dans l'optique de contribuer aux études de climatologie urbaine, nous cherchons dans le présent travail à analyser la différence de température d'air nocturne à Três Lagoas (Mato Grosso do Sul – Brésil). La ville compte environ 121 000 habitants (estimation IBGE, 2019) et se situe dans la portion Est de l'État, caractérisée par un climat tropical continental, avec un été chaud et humide et un hiver doux et sec. Les procédés méthodologiques utilisés ont consisté en des mesures de température de l'air en des points fixes, via des capteurs installés entre le 6 et 28 février 2019 de 20h à 6h, en raison qu'au cours de la saison d'été dans l'hémisphère sud, il s'agit de la période la plus chaude pour cette zone d'étude. Quatre points ont été retenus pour l'installation des capteurs thermiques, dont un localisé dans le centre-ville, deux dans les quartiers caractéristiques de forte densité de construction comprenant des fragments de végétation arbustive dense à proximité et le dernier en zone rurale. Les résultats ont montré que le point le plus chaud a été enregistré dans le centre-ville que contribue à la formation d'îlots de chaleur de forte ampleur (entre 4 et 6°C) et très forte (au-dessus de 6°C), en conformité avec le profil thermique classique des îlots de chaleur urbain.*

Mots clés : *climat urbain ; ilots de chaleur ; environnement tropical*

Summary: ***Night thermal profile at Três Lagoas - MS (Brazil).*** *Aiming to contribute to studies on urban climatology, this paper aims to analyze the night air temperature difference in Três Lagoas (Mato Grosso do Sul - Brazil). The city has approximately 121,000 inhabitants (IBGE estimate, 2019) located in the eastern portion of the state of Mato Grosso do Sul, with the continental tropical climate, with hot and humid summer and mild and dry winter. The methodological procedures used in this investigation were air temperature measurements through fixed points, installed on, between February 06 and 28, 2019 from 20h to 06h. Four points were selected for the installation of the sensors, one in the central area of the city, two in neighborhoods with characteristics of high constructive density with the presence of forest fragments of dense tree vegetation nearby and another rural environment. The results revealed that the hottest point refers to the city center in accordance with the classic urban heat island profile.*

Key words: *urban climate; heat islands; tropical environment*

Introduction

Les villes représentent la forme la plus radicale de transformation du paysage à travers l'action anthropique, qui, par la même, s'acquittent du respect de l'environnement naturel pour la construction de l'environnement artificiel, entrainant des changements climatiques et environnementaux conséquents (Garcia, 1995). Les changements des conditionnant climatiques dans les villes sont définies par Monteiro (1976, p. 95) comme étant le climat urbain, « un système qui englobe le climat d'un espace terrestre et son urbanisation ».

Dans ce cadre, la ville de Três Lagoas, localisée dans la région Est de l'État de Mato Grosso do Sul (Brésil), est caractérisée par une structure urbaine marquée par une récente et abrupte évolution, en raison d'une rupture dans le cycle économique de la région, basé sur la croissance industrielle, qui a par la même apporté des impacts significatifs dans la structure urbaine de la ville (Bustamante, *et. Al.*, 2017).

Le présent travail a pour objectif central d'analyser la différence spatiale de température nocturne à Três Lagoas. La ville comptabilise environ 121 000 habitants (estimation IBGE, 2019) et est dotée d'un climat tropical continental, avec des étés chauds et humides et des hivers doux et secs (Zavattini, 1996). La tropicalité rend ainsi propice les hautes températures de la zone d'étude durant les mois les plus chauds, enregistrant ainsi des situations d'inconfort thermique récurrents vécues par la population locale.

1. Données et Méthodes

1.1. Procédés méthodologiques pour l'acquisition des données

Les procédés méthodologiques utilisés pour ce travail ont reposé sur des mesures de températures de l'air à travers des points fixes, installés entre le 6 et le 28 février 2019, de 20h à 6h, en raison qu'au cours de la saison d'été dans l'hémisphère sud, il s'agit de la période la plus chaude pour cette zone d'étude.

Plusieurs critères ont été retenus pour le choix des points de collectes. Un premier critère a été la localisation, entre le centre-ville et la zone rurale et un second, celui de la constitution des éléments du paysage en observant les différences entre la présence et l'absence de végétation et la densité des constructions.

Ainsi, quatre points ont été retenus pour l'installation des thermomètres : un dans le centre-ville (Point 2), deux dans des quartiers aux caractéristiques de haute densité constructive avec la présence de fragments forestiers de végétation arborée dense aux alentours (Point 3 et 4) et un autre dans la zone rurale (Point 1), comme il est possible de visualiser sur la Figure 1.

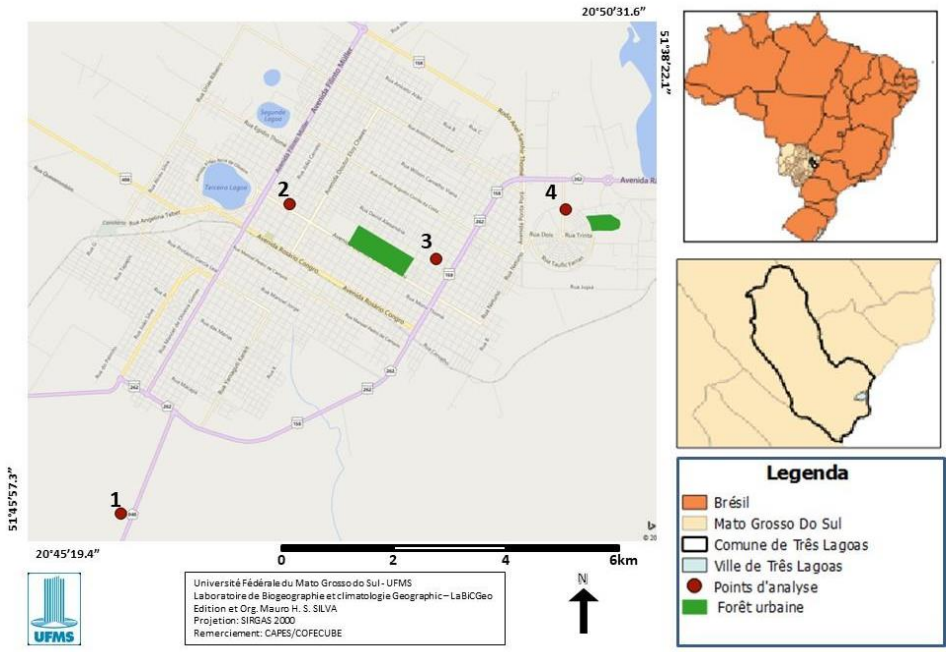


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des points de collectes des données

1.2. Analyses et organisation des données

Les données ont été traitées sous Excel où il a été possible d'obtenir l'intensité des îlots de chaleur à travers l'équation suivante (Sobrino; Oltra-Carrió, 2012):

ΔTu-r = Tu – Tr

ΔTu – r = intensité des îlots de chaleur.

Tu = température de l'air dans la zone urbaine.

Tr = température de l'air en milieu rural.

Après l'obtention des données d'intensité des îlots de chaleur, une représentation de l'intensité des températures (de 20h à 6h) a été élaborée, grâce au programme *Surfer*, pour l'ensemble des points de mesure durant les jours retenus pour l'étude.

Pour l'analyse de l'intensité de la formation des îlots de chaleur, nous avons retenu, compte tenu de son ampleur, la classification de Garcia (1995) où les écarts de 0°C à 2°C sont considérés des îlots de chaleur de faible ampleur, de 2,1°C à 4°C des îlots de chaleur d'ampleur modérée, de 4,1°C à 6°C des îlots de chaleur de forte ampleur et au-dessus de 6°C des îlots de chaleur de très forte ampleur. Il convient de noter que dans cette recherche, les mêmes valeurs, négatives, ont été considérées pour la classification d'ampleur des îlots de fraîcheur urbaine.

Pour l'analyse des systèmes atmosphériques actifs, nous avons eu recours aux cartes synoptiques du Centre d'Hydrographie de la Marine Brésilienne[1], en plus des informations disponibles dans le Bulletin Technique[2] de l'Institut National de Recherches Spatiales (INPE).

2. Résultats

Les résultats obtenus dans cette recherche ont montré que la dynamique thermique nocturne du mois de février 2019 dans la ville de Três Lagoas, est caractérisée par la présence de plages horaires où se forment des îlots de chaleur tous les soirs du mois étudié. Cependant, l'ampleur de ces îlots de chaleur urbain identifiés dans la ville varie en fonction de l'influence des éléments constitutifs de la superficie urbaine, tout autant que l'action des contrôleurs atmosphériques.

La zone centrale de la ville (Point 2), constituée d'éléments constructibles urbains, de grand albédo (immeubles, bitume, béton), en plus d'être une zone de flux importants de véhicules et de personnes, a enregistré une importante occurrence de formation d'îlots de chaleur urbain, en comparaison des points se trouvant à proximité des fragments forestiers (Point 3 et 4), comme nous pouvons l'observer à partir de la Figure 2.

La dynamique thermique nocturne dans le centre-ville, contribue à la formation d'îlots de chaleur de forte ampleur (entre 4 et 6°C) et très forte (au-dessus de 6°C) les nuits des périodes allant du 6/02 au 10/02 et du 16/02 au 18/02, enregistrant moins d'occurrences lors des nuits du 22/02 au 25/02. On observe alors que la plus forte ampleur d'îlots de chaleur à Três Lagoas (MS) a eu lieu le 7 février 2019 à 23h, enregistrant un écart de 6,5°C dans le centre-ville (Fig.2).

[1] Disponible sur : https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas. Consulté le 5 décembre 2019.
[2] Disponible sur : http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt. Consulté le 4 décembre 2019.

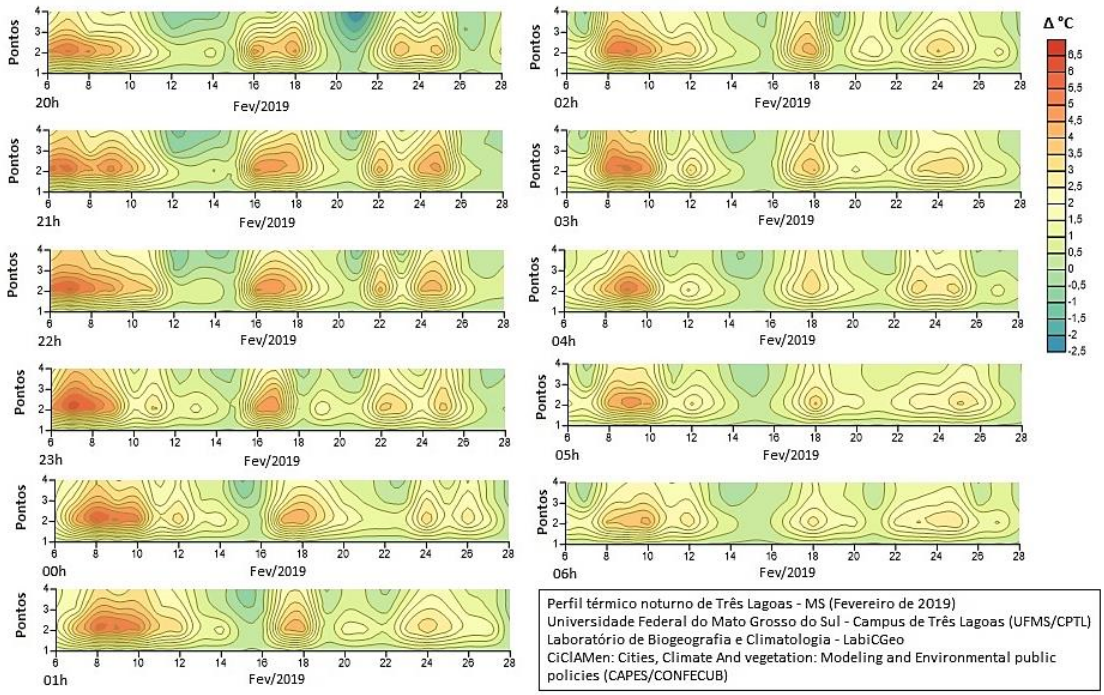


Figure 2. Représentation de l'intensité des températures en février 2019 à Três Lagoas

La présence des îlots de fraîcheur, moment où la ville enregistre des températures de l'air plus basses que dans ses alentours, n'a pratiquement pas été identifiée dans le centre-ville (Point 2), à l'exception près du 21 février à 20h, lorsqu'il a été enregistré un îlot de fraîcheur de faible ampleur. Aux Points 3 et 4, localisés à proximité de fragments forestiers urbains, toutes les nuits du 13, 14, 15 et 20, 21 et 27, montrent l'influence des éléments du paysage urbain pour le rafraîchissement thermique nocturne de la ville.

Nous avons également pu observer que les îlots de fraîcheur ont été plus fréquents et plus intenses au Point 4, où le fragment forestier à proximité est une composante de l'Unité de Conservation d'Usage Durable[3], et où l'agriculture familiale exercée dans cette portion a pour but de protéger l'environnement d'importantes espèces végétales du biome cerrado présent dans cette région, en plus de garantir la qualité de vie de la population locale. (Fig.3)

[3] D'après la Loi brésilienne n°9.985/2000, qui institue le Système National des Unités de Conservation de la Nature – SNUC, les Unités de Conservation d'Usage Durable sont des zones visant la conciliation entre la conservation de la nature avec l'usage durable des ressources naturelles dans ce groupe, les activités qui englobent la collecte et l'usage des ressources naturelles sont permises, si elles sont pratiquées de façon à ce que les ressources environnementales et renouvelables et les processus écologiques soient respectés. Disponible sur https://www.mma.gov.br/areas-protegidas/unidades-de-conservacao. consulté le 12 décembre 2019 - 21h15min..

Figure 3. Vue aérienne partielle de l'Unité de Conservation « Aire de Protégée du Jupia

Il convient de remarquer que l'îlot de chaleur au Point 4 enregistrait un écart de -2,5°C à 20h le 21 février. De tels résultats sont dus à l'action des éléments constitutifs de son paysage, prédominés par la végétation, qui agisse comme un fossé, ce jour-là sous l'influence de la Masse Tropical Atlantique qui pénétrait dans la région Est du territoire brésilien, s'opposant de cette manière à l'action de la Masse Équatoriale Continentale en vigueur depuis le 19 février, accentuant l'instabilité et permettant la progression des contrôleurs atmosphériques liés à la masse Polaire Atlantique active dans le Sud du continent. Ceci ayant pour effet la baisse des températures de la région où se trouve Três Lagoas, principalement le 21 février. Une telle dynamique est aussi marquée par la présence de précipitations engendrées par l'action de la Zone de Convergence d'Humidité (ZCOU) et de la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS).

Conclusions et Discussion

Les résultats ont révélé un écart maximum de température de l'air nocturne à Três Lagoas de 6,5°C, entre le centre-ville et la zone rurale le 7 février 2019 à 23h. Dans les périodes décrites de plus fortes occurrences d'îlots de chaleur, il peut être vérifié l'influence de la masse d'air Tropical Continental, agissant dans la région responsable de l'augmentation de la température de l'air. Zavatini (2009) explique qu'en raison de la position géographique de Três Lagoas dans la région centre-sud du Brésil, elle subit l'influence des mécanismes atmosphériques agissant plus au sud et sud-est, bien que la masse d'air Tropical Continental participe effectivement à l'échelle de tout l'État.

De plus, il est observable l'influence des différents types de couverture et usage de la superficie urbaine sur les températures nocturnes de l'air, dans la mesure où, les zones à proximité des fragments forestiers existants dans la ville enregistrent des températures nocturnes plus basses que la zone centrale, pauvre en couverture végétale.

Shams *et. al.,* (2009) observe qu'en implantant l'arborisation du tissu urbain, des bénéfices évidents se révèlent en ce qui concerne l'amélioration de la qualité de vie de la population, favorisant l'intensification de l'usage et des fonctions dans ces espaces, dans la mesure où les choix pour la réalisation des activités se tournent vers les zones arborisées. Nabucet (2019)

corrobore en expliquant que la grande diversité de l'usage du sol urbain ne laisse qu'un espace limité à la végétation, qui occupe des zones entre les superficies constructibles et les infrastructures des réseaux de transports. Une telle configuration doit s'observer lors de l'aménagement urbain en recherchant à augmenter les zones de couvert végétal en milieu urbain.

Les résultats mettent en évidence que le Point le plus chaud est celui se trouvant en centre-ville, corroborant ainsi avec le profil classique de l'îlot de chaleur urbain.

Remerciements

A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pelo apoio instituicional à pesquisa; À Capes pelo apoio financeiro ao projeto CAPES/COFECUB "CiClAMEn: Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies" (2019-2022).

Bibliographie

Bustamante N., Silva W.M., Silva R.W., & Gomes L., 2017. Sustentabilidade Urbana e Crescimento Acelerado em Três Lagoas (MS). *Rev. Conexão Eletrônica – Três Lagoas*, MS , Volume 14, Número 1, Ano 2017.

Garcia F., 1995. *Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Madrid, Síntesis, 288p.

Monteiro C. A. de F., 1976. *Teoria e Clima Urbano*. São Paulo, IGEOG/USP, 181p.

Oke T., 1974. *Review of urban climatology: 1968-1973*. Geneva, Wold Meteorological Organization (WMO Technical note, n. 134), 132p.

Shams J. C. A., Giacomeli D. C., & Sucomine N.M., 2009. Emprego da Arborização na Melhoria do Conforto Térmico nos Epasços públicos. *REVSBAU*, Piracicaba, SP, v.4, n.4, 1-16.

Sobrino J. A., Olstra-Carrio R., 2012. La campaña DESIREX en Madrid. Determinación de la isla de calor. In: Fernández García F.; Galán Gallego E.; Cañada Torrecilla R. (eds.). Clima, ciudad y ecosistemas: Ponencias y conferencias invitadas al VII Coloquio de la Asociación Española de Climatología. Asociación Española de Climatología (AEC), serie B, 141-164.

Zavattini J. A., 2009. *As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudos geográficos com vista à regionalização climática.* São Paulo, Cultura Acadêmica, 214p.

Nabucet J., 2019. Télédétection & Nature En Ville. *Les GÉOgraphics de LETG*. (LETG-Renness), 2019. URL : https://www-iuem.univ-brest.fr/wapps/geographics_LETG/2019/geographics_2019/#p=2>

LE NOUVEAU JEU DE SIMULATIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES SUR LA FRANCE POUR LE SERVICE DRIAS

SOUBEYROUX J.-M.[1], BERNUS S.[1], CORRE L.[1], GOUGET V.[1], KERDONCUFF M.[1], SOMOT S.[2], TOCQUER F.[1]

1 Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France (jean-michel.soubeyroux@meteo.fr)
2 Météo-France, Centre National de Recherche Météorologique, France

Résumé : *Cet article présente la démarche de mise à jour d'un jeu de scénarios climatiques régionalisés et débiaisés sur la France, pour diffusion sur le service climatique DRIAS. Comme pour le précédent jeu de 2014, les projections climatiques de référence s'appuient sur l'ensemble Euro-Cordex dont les contenus se sont fortement enrichis au cours des six dernières années. Différents critères de sélection ont été définis pour parvenir à un ensemble robuste et synthétique (8 à 12 simulations pour chacun des trois scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5) représentant au mieux les incertitudes du changement climatique en France. Les simulations climatiques sélectionnées ont été corrigées par la nouvelle méthode Adamont, développée initialement pour les territoires de montagne. Cette méthode permet de disposer sur le portail DRIAS d'un nouveau jeu de données dénommé DRIAS 2020 cohérent de plusieurs variables météorologiques (température, précipitation, neige, humidité, vent, rayonnement) dont quelques premiers diagnostics sur l'évolution attendue des températures et précipitations en France sont présentés.*

Mots clés : *projections climatiques ; Euro-Cordex ; Adamont ; DRIAS ; France*

Summary: ***The new regional climate projections dataset over France for the DRIAS climate service***. *This article presents the process of updating a set of regionalized and debiased climate scenarios over France for dissemination on the DRIAS climate service. As for the previous set for 2014, the baseline climate projections are based on the Euro-Cordex ensemble, whose contents have been greatly enriched over the past six years. Different selection criteria were defined to build a robust and synthetic set (8 to 12 simulations for each of the three scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5) that best represents the uncertainties of climate change in France. The selected climate simulations were corrected by the new Adamont method, initially developed for mountain territories. This method provides the DRIAS portal with a new coherent dataset of several meteorological variables (temperature, precipitation, snow, humidity, wind, radiation), named DRIAS 2020. Some first diagnostics on the expected evolution of temperature and precipitation in France are presented.*

Key words: *climate projections; Euro-Cordex; Adamont; DRIAS; France*

Introduction

Le service climatique DRIAS[1] (Lemond *et al.*, 2011), développé dans le cadre du projet éponyme soutenu par le Ministère de l'Environnement, vise la diffusion libre et gratuite des projections climatiques régionalisées et corrigées sur la France, sous différentes formes : jeux de données, indices climatiques ou représentations graphiques (cartes, séries temporelles, horizons proche, moyen et lointain). Il assure également le support des utilisateurs à travers un « Espace Accompagnement » très complet et une hotline. Ce service, géré par Météo-France et fruit de la collaboration des centres de recherche climatique français CNRM[2], IPSL[3] et CERFACS[4], a été régulièrement enrichi au cours des dix dernières années en fonction de la disponibilité des projections climatiques sur la métropole et Outre-mer.

Depuis 2014, une des sources principales de simulations climatiques sur la France métropolitaine provient de l'ensemble Euro-Cordex[5] (Jacob *et al.*, 2014), qui contient une sélection de couples GCM/RCM (Global Climate Model / Regional Climate Model) visant à représenter de la manière la plus complète possible les incertitudes du climat futur sur le

[1]http://www.drias-climat.fr/
[2]CNRM : Centre National de Recherche Météorologique de Météo-France
[3]IPSL : Institut de Physique Simon Laplace
[4]CERFACS ; Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul
[5]https://euro-cordex.net/

continent européen à une résolution spatiale de 12 km. Une mise à jour importante de DRIAS avait eu lieu en 2014 pour prendre en compte les premières simulations disponibles de cet ensemble Euro-Cordex (onze simulations), à la base du 4e rapport publié par l'ONERC[6] sur le climat de la France au XXIème siècle[7].

Au cours des six dernières années, le nombre de simulations disponibles sur l'ensemble Euro-Cordex a fortement augmenté, dépassant à ce jour une quarantaine de couples GCM/RCM pour trois scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) d'évolution de la concentration de gaz à effet de serre (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Par ailleurs, il s'avère que plusieurs des anciennes simulations Euro-Cordex actuellement disponibles sur le service DRIAS ont été rejouées à la suite d'une détection d'anomalies. Dans ce contexte, un nouveau projet dénommé « Convention Services Climatiques »[8] porté par le Ministère de l'Ecologie a décidé d'engager la mise à jour des simulations climatiques régionalisées sur la métropole de la base DRIAS.

Le présent article décrit les différentes étapes de mise à jour de ce jeu de données, dénommé DRIAS 2020 par la suite, qui constituera la nouvelle référence pour les études d'impacts du changement climatique et l'adaptation en France au XXIème siècle. Afin de réduire les traitements pour les utilisateurs, un sous-ensemble de simulations climatiques Euro-Cordex a été sélectionné pour être représentatif des incertitudes du climat futur sur la France. Une méthode de correction statistique a ensuite été appliquée, ici la méthode Adamont (Verfaillie *et al.*, 2017) sur l'ensemble des simulations. Enfin, le nouveau jeu de données a fait l'objet d'une analyse pour documenter le diagnostic attendu du changement climatique en France.

1. Sélection des simulations climatiques régionalisées Euro-Cordex

1.1. Etat des lieux des simulations Euro-Cordex 2014

Les simulations climatiques disponibles sur le portail DRIAS depuis 2014 proviennent de l'ensemble Euro-Cordex et sont fondées sur onze couples GCM/RCM[9]. Elles ont été corrigées et régionalisées sur une grille de 8 km de résolution sur la France. Deux simulations spéciales du CNRM et de l'IPSL viennent compléter l'ensemble précédent.

Ces dernières années, ces simulations ont fait l'objet de travaux d'évaluation ces dernières années qui ont mis en évidence des anomalies de portée générale, locale ou limitée à une variable. Il s'agit par exemple de problèmes liés à la non prise en compte de l'évolution régionale des gaz à effet de serre, à des erreurs d'interpolation ou à des incohérences entre les différents forçages appliqués aux RCM. Ces erreurs ont été documentées dans l'espace d'accompagnement DRIAS (http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/186). Pour la plupart, elles ont été corrigées et les projections climatiques rejouées (parfois avec une nouvelle version du modèle). La production de notre nouveau jeu de données a d'abord visé à remettre à jour toutes les simulations connaissant des problèmes de qualité des données.

1.2. Critères de sélection des nouvelles simulations Euro-Cordex

L'ensemble Euro-Cordex disponible en 2019, candidat à la base DRIAS, est fondé sur une quarantaine de couples GCM/RCM composés de projections globales (GCM) provenant de l'exercice d'inter-comparaison de modèles couplés CMIP 5 (Taylor *et al.*, 2012) et de modèles régionaux (RCM) de l'exercice international Cordex. Cependant le nombre d'expériences

[6]Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique
[7]https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF.pdf
[8]https://convention-services-climatiques.lsce.ipsl.fr/
[9]Global Climate Model / Regional Climate Model

réalisées à partir des différents GCM ou RCM, fonction des stratégies et financements disponibles dans les différents centres de modélisation climatique, ne sont pas régulièrement répartis dans l'ensemble Euro-Cordex et cette différence peut affecter les caractéristiques de l'ensemble du jeu de données considéré dans sa globalité.

Par ailleurs, les utilisateurs des services climatiques disposent souvent de moyens informatiques limités et souhaitent l'optimisation du nombre de simulations climatiques à traiter, en garantissant de bien couvrir la gamme de variations en température et précipitation du signal climatique (appelée dispersion par la suite) de l'ensemble total (Dalelane *et al.*, 2017). Cet objectif a été pris en compte dans la sélection du nouveau jeu DRIAS 2020, qui ne donnera accès qu'à une sous-sélection du jeu de l'ensemble Euro-Cordex, représentant au mieux la dispersion des modèles climatiques sur la France.

La sélection de cette liste s'est notamment appuyée sur des études réalisées dans le cadre du projet Copernicus C3S_34b (Copernicus Climate Change Service production of European climate projections). Huit critères de sélection, numérotés de c1 à c8 ont été définis :

c1 : la sélection totale d'environ 12 couples GCM/RCM (c1) ;

c2 : la prise en compte des GCM jugés les plus réalistes sur l'Europe (Mc Sweeney *et al*., 2015) ;

c3: la prise en compte d'une diversité de RCM ;

c4 : la disponibilité de simulations pour au moins deux scenarios d'émissions RCP ;

c5 : le rejet des couples GCM/RCM concernés par une erreur connue ;

c6 : la sélection préférentielle des modèles issus des laboratoires climatiques français ; c7 : l'optimisation de la dispersion du changement climatique simulé par les couples sélectionnés ; c8 : la sélection préférentielle des couples avec une cohérence dans la physique entre les modèles GCM et RCM.

L'application de la méthode ainsi décrite a conduit aux principaux résultats suivants :

Le critère c2 permet la sélection de six GCM (CNRM-CM5 r1, IPSL-CM5A-MR r1, MPI-ESM-LR r1, EC-EARTH r12, HadGEM2-ES r1,NorESM1-M r1). Il a été proposé de répartir les douze couples GCM/RCM recherchés de manière équilibrée sur ces six GCM. Les critères c3 et c4 identifient 8 RCM pour 12 simulations soit 4 RCM forcés par 1 seul GCM, 4 RCM forcés par 2 GCM.

Le critère c6 impose le choix de certains RCM seulement disponibles pour les GCM choisis : CNRM-CM5 avec ALADIN63 et RACMO22E, IPSL-CM5A-MR avec WRF381 et RCA4

Le critère c7 conduit à inclure dans la sélection la simulation CCLM4-8-17 forcé par HadGEM2-ES, dont les projections montrent le plus fort réchauffement et assèchement de l'ensemble Euro-Cordex.

Les autres simulations ont été sélectionnées en fonction de leur disponibilité, en cohérence avec les 8 critères ci-dessus. Au final, 42 simulations ont été sélectionnées : 12 simulations sur la période historique, 12 projections avec scenario RCP 8.5, 10 pour le RCP 4.5 et 8 pour le RCP 2.6.

1.3. Couverture de la dispersion des différentes projections climatiques

La dispersion du signal du changement climatique de la température moyenne et des précipitations a été évaluée sur la France à partir de différentes sources : l'ensemble des GCM de l'exercice CMIP5, les GCM utilisés pour forcer les simulations Euro-Cordex, l'ensemble Euro-Cordex et enfin le jeu DRIAS. Le changement climatique est calculé entre deux périodes

de 30 ans : fin du siècle (2071-2100) par rapport à la période historique (1976-2005), dans le cas du scénario RCP 8.5, pour les saisons estivale (JJA pour juin juillet août) et hivernale (DJF pour décembre janvier février), respectivement. Toutes les données ont été interpolées sur une grille régulière de 8 km de résolution couvrant l'ensemble de la France.

On observe (Fig.1) une bonne cohérence entre le jeu DRIAS et l'ensemble Euro-Cordex pour les deux paramètres et saisons étudiés. En revanche, il est noté des évolutions différentes entre les ensembles fondés sur des simulations régionales (Euro-Cordex et DRIAS) d'une part, et sur des simulations globales (CMIP5) d'autre part, notamment en matière de températures estivales ou de précipitations hivernales. Ces différences, observées sur d'autres zones que la France ont été analysées dans plusieurs études (Sorland *et al.*, 2018 ; Schwingshackl *et al.*, 2019 ; Boë *et al.*, 2020), sans possibilité de conclusion claire à ce jour sur la meilleure qualité respective des modèles globaux ou régionaux. Cette question restera donc ouverte dans l'utilisation du nouveau jeu DRIAS sur la France.

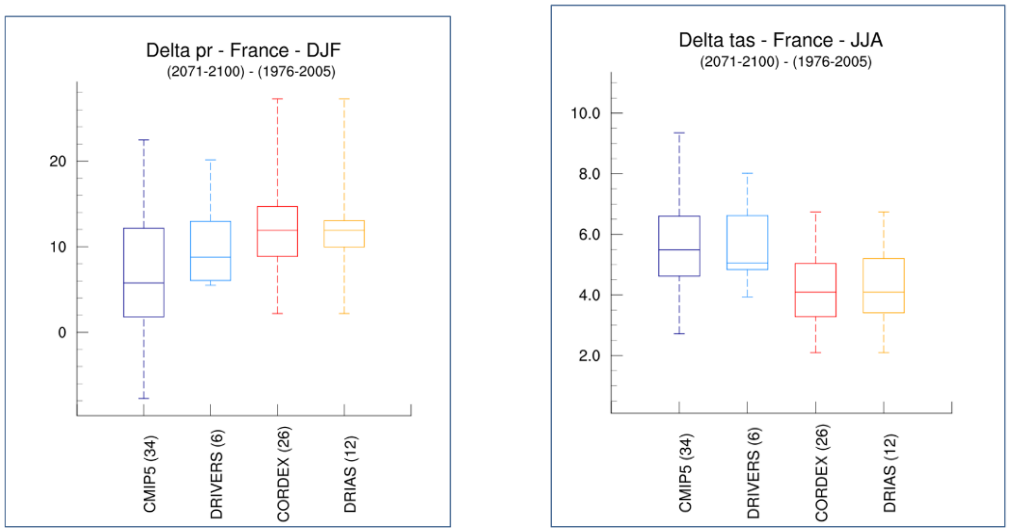


Figure 1. Comparaison de la dispersion des simulations issues de 4 sources de données différentes (Tous GCM de CMIP5, GCM utilisés par Euro Cordex, ensemble Euro-Cordex, jeu DRIAS), pour 2 paramètres température et précipitations et 2 saisons (hiver et été).

2. La méthode de désagrégation Adamont et la base de référence Safran

2.1. La base de référence Safran

Les données de la base Safran à résolution 8 km et au pas de temps horaire sur la France depuis 1958 (Le Moigne, 2002) sont utilisées comme référence pour la désagrégation des simulations climatiques. La base Safran utilisée pour notre interpolation est la version de 2016, intégrant la mise à jour du modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour définir l'altitude de chaque maille.

2.2. La méthode de descente d'échelle Adamont

Adamont est une méthode de descente d'échelle et d'ajustement de biais des scénarios climatiques régionaux (Verfaillie *et al.*, 2017). Elle constitue une consolidation de la méthode d'ajustement statistique dite quantile-quantile (Q-Q) développée par Déqué (2007). Elle est appliquée au pas de temps quotidien par rapport à un jeu d'observations (ici la ré-analyse Safran), indépendamment pour chaque saison et chaque régime de temps sur le domaine

Europe/Atlantique Nord. La prise en compte des saisons et des régimes de temps permet de mieux prendre en compte en climat futur les évolutions de la distribution des paramètres, selon les périodes de l'année et la circulation générale.

À la correction Q-Q au pas de temps quotidien s'ajoute une désagrégation horaire des données par une technique de recherche de journée analogue. Celle-ci permet d'obtenir des scénarios débiaisés continus au pas de temps horaire pour les variables : température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire (direct et diffus) et infrarouge, pluie et neige. Elle est une des rares méthodes de désagrégation multivariées qui permettent de générer des séries chronologiques horaires, résolution temporelle indispensable pour les études d'impact (hydrologie ou nivologie) assurant la cohérence inter-paramètre.

La méthode Adamont, initialement appliquée sur les massifs montagneux des Alpes et des Pyrénées, a été adaptée à l'échelle de la France sur la grille Safran 2016. Les régimes de temps ont été calculés à partir de la réanalyse ERA Intérim sur la période 1979-2011.

Une étude de comparaison[10] entre la méthode CdfT (Vrac *et al.*, 2010), précédemment utilisée pour la désagrégation du jeu Euro-Cordex 2014, et la méthode Adamont, a été menée sur deux simulations régionales. Elle a montré des écarts possibles dans l'évolution attendue des paramètres météorologiques jusqu'à +1°C sur la température et 5 % sur les précipitations, sans remise en cause de structures spatiales des anomalies.

3. Discussions et perspectives

Les données du nouveau jeu DRIAS, corrigées par la méthode Adamont à partir de la référence Safran (version 2016) seront fournies sur une grille régulière sur la France à 8 km de résolution à partir de l'été 2020. Au-delà des données et indicateurs climatiques proposées en ligne dans l' « Espace Données » (à fréquence quotidienne, mensuelle ou annuelle), l'Espace Découverte offrira un outil cartographique permettant des visualisations personnalisées. La mise en ligne de ces nouvelles données sera aussi associée à une rénovation de l'ergonomie et du graphisme du site internet DRIAS. En particulier, le nouvel « Espace Découverte » de DRIAS permettra un accès simplifié et plus rapide aux projections climatiques en proposant la visualisation de produits de distribution (différents percentiles dont la médiane) issus du nouvel ensemble Euro-Cordex, en plus des modèles individuels.

La mise en ligne de ce nouveau jeu de données climatiques sur la France est prévue d'être accompagnée d'un rapport portant sur l'analyse des changements climatiques attendus en France au XXIème siècle selon les différents scénarios RCP. Avec le nouveau jeu de référence de DRIAS et par référence à la période 1976-2005, l'évolution de la température moyenne annuelle en fin de siècle sous le scénario RCP 8.5 en France est prévue autour de +4°C (entre +3,2°C et +4,9°C)[11] tandis que le cumul de précipitation annuelle se situe autour de +2% (entre -6,4% et +15%)[12]. Il est noté également que la simulation la plus chaude (CLM-Hadgem) est aussi quasiment la plus sèche et inversement pour la simulation la plus fraîche (REMO-MPI).

Ce nouveau jeu de référence sur le climat futur en France, disponible sur DRIAS, a vocation à être utilisé pour les études d'impact, de vulnérabilité et d'adaptation des écosystèmes et activités économiques en France. Certains de ces travaux sont déjà lancés comme les simulations hydrologiques visant à remettre à jour les scénarios utilisés dans les projets Explore2070[13] ou ClimSec[14]. Au-delà de 2021, ce jeu de données devra aussi évoluer pour

[10]http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/13
[11]Valeur médiane, percentiles 5 et 95 de l'ensemble
[12]Valeur médiane, percentiles 5 et 95 de l'ensemble
[13]https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44
[14]https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article605

prendre en compte les nouvelles simulations issues de l'exercice d'inter-comparaison CMIP6 appuyant le 6e rapport du GIEC.

Bibliographie

Lémond J., *et al*., 2011. DRIAS: a step toward Climate Services in France. *Advances in Science and Research*. 6. 179-186. 10.5194/asr-6-179-2011.

Jacob, D., *et al*., 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563-578.

McSweeney C.F., Jones R.G., Lee R.W., *et al*., 2015. Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Clim Dyn* 44, 3237–3260. Doi : https://doi.org/10.1007/s00382-014-2418-8.

Le Moigne P., 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN.

Verfaillie D., Déqué M., Morin S., & Lafaysse M., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geosci. Model Dev*., 10, 4257–4283. Doi: https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017.

Déqué M.,Rowell D. P., Lüthi D., Giorgi F., Christensen J.H., Rockel B., Jacob D., Kjellström E., de Castro M. & Van den Hurk B., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70.

Dalelane C., Früh B., Steger C., Walter A. (2017). A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57. 10.1175/JAMC-D-17-0141.1.

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design, Bull. *Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Boé J., Somot S., Corre L. *et al*., 2020. Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Clim Dyn* 54, 2981–3002. Doi: https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1.

Schwingshackl C., Davin E.L., Hirschi M., Sørland S.L., Wartenburger R. & Seneviratne S., 2019. Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO2 response. *Environ. Res. Lett*. 14, 114019. Doi: https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Fab4949

Sørland S.L., Schär C., Lüthi D. & Kjellström E., 2018. Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environ. Res. Lett*. 13, 074017. Doi: https://doi.org/10.1088%2F1748-9326%2Faacc77

ANALYSE DU RISQUE DE BASE DANS L'ASSURANCE PLUVIOMETRIQUE INDICIELLE AU SENEGAL

SOW O.C.[1], SAMBOU P.C.[2], DOREGO G.S.[3], KONTE O.[4], TOURE K.[5], DUBREUIL M.[6], FALL M.M.[1]

1 Compagnie Nationale d'Assurance Agricole du Sénégal (CNAAS), Dakar, Sénégal (zocissesow@hotmail.com ; Moustapha.Fall@cnaas.sn)
2 Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE/ UCAD), Dakar, Sénégal (pierrecorneille.sambou@ucad.edu.sn)
3 Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA/ ISRA), Bambey, Sénégal (raphdo@gmail.com)
4 Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), Dakar, Sénégal, (konte.oumar7@gmail.com)
5 Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA/ Université de Thiès), Thiès, Sénégal (agrotoure@yahoo.fr)
6 Programme Alimentaire Mondiale (PAM), Rome, Italie (mathieu.dubreuil@wfp.org)

Résumé : *Cette étude analyse le risque de base observé dans l'assurance pluviométrique indicielle. Pour ce faire 113 producteurs qui y ont souscrit depuis 2012 ont été enquêtés dans 11 sites à Kaolack. Les cultures les plus assurées sont le maïs et l'arachide avec 46 et 36 % contre 18 % pour le mil. Les échecs de semis, déficits et longues pauses pluviométriques notés entre 2012 et 2016 ont entraîné des indemnisations de près de 90 millions de francs CFA aux sinistrés. Ces derniers ont été plus nombreux en 2014 qui a connu un déficit pluviométrique prononcé. Le risque de base est surtout lié à la différence existant entre les données des pluviomètres des producteurs et celles des pluviomètres authentiques. Si les quantités de pluie mesurées au niveau des pluviomètres des producteurs sont inférieures à celles des pluviomètres authentiques et si les rendements sont de -60 % alors que les producteurs ont semé dans les 5 jours qui ont suivi la pluie utile, le risque de base est avéré. Il décroît au fur et à mesure que les producteurs mettent du temps à semer.*

Mots clés : *assurance indicielle ; gestion des risques ; risque de base ; sécheresse ; sinistres ; Sénégal*

Summary: ***Basic risk analysis in indicial rain insurance in Senegal.*** *This study analyzes the basic risk observed in index rain gauge insurance. To do this, 113 producers who have subscribed to it since 2012 were surveyed at 11 sites in Kaolack. The most assured crops are maize and groundnuts with 46 and 36% against 18% for millet. Sowing failures, deficits and long rain breaks noted between 2012 and 2016 resulted in compensation of nearly 90 million CFA francs to the victims. The latter were more numerous in 2014, which experienced a pronounced rainfall deficit. The basic risk is mainly linked to the difference between the data from the producers' rain gauges and those from the authentic rain gauges. If the amounts of rain measured at the producers' rain gauges are lower than those of the authentic rain gauges and if the yields are -60% while the producers have sown within 5 days of the useful rain, the basic risk is proven. It decreases as the producers take time to sow.*

Key words: *index insuranc; risk management; basic risk; drought; claims; Senegal*

Introduction

Le Sénégal fait partie des zones climatiques sahéliennes et nord et sud-soudaniennes (Sagna P., 2007). Il est encore vulnérable à l'irrégularité de la pluviométrie qui se manifeste par une baisse des rendements et productions agricoles (Sagna P. *et al.*, 2015). Pour y faire face, depuis 2011, l'Etat, à travers la Compagnie Nationale d'Assurance Agricole du Sénégal (CNAAS) a mis en place une assurance climatique indicielle pour couvrir les sinistres des producteurs liés au déroulement de l'hivernage. A Kaolack, l'une des principales régions du bassin arachidier où 63,7 % de la population est rurale (ANSD, 2018), les risques climatiques sont couverts à travers un indice utilisant les pluies au sol. Toutefois, il se trouve qu'on observe parfois une différence entre les sinistres déterminés par cet indice et les sinistres réels des producteurs assurés. C'est cette situation qu'on considère comme un risque de base. Il est défini par Mapfumo S. *et al.* (2017, p. 275), comme « La corrélation imparfaite entre les pertes réelles subies par une entité ou un individu et les paiements reçus d'un instrument de transfert de risques destiné à couvrir ces pertes. En d'autres termes, le risque que les mesures d'indice de la perte soient différentes des pertes individuelles réelles ». C'est ce que cette étude tente d'analyser en proposant *in fine* un modèle de gestion du risque de base.

1. Méthodologie

La démarche méthodologique adoptée est tout d'abord basée sur une collecte des données de terrain du 05 septembre au 20 octobre 2015 pour avoir la perception des producteurs sur les produits d'assurance indicielle proposés. Pour cela, un guide d'entretien a été administré, au travers de groupes de discussion à 12 % des producteurs assurés depuis 2012 à Kaolack soit au total 113 enquêtés répartis sur 11 villages (Fig.1).

Les données pluviométriques couvrent la période 1921-2016 et ont été collectées au niveau de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) et des archives de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM). Ce sont les données moyennes des stations synoptiques du Sénégal qui disposent des données les plus anciennes et les plus complètes, telles que décrites par Sagna P. *et al.* (2015) et qui sont au nombre de 11. Elles ont été analysées à partir du calcul de l'indice standardisé de précipitation qui permet d'identifier les années humides et les années sèches à partir de la formule employée par Balme *et al.* (2006) : $Pi - Pmoy)/\sigma$, avec *Pi* la pluviométrie de l'année *i*, *P*moy la pluviométrie moyenne sur la période 1921–2016, et σ l'écart-type sur cette même période. Les données d'indemnisation, de la période 2012-2016, sont tirées de la CNAAS.

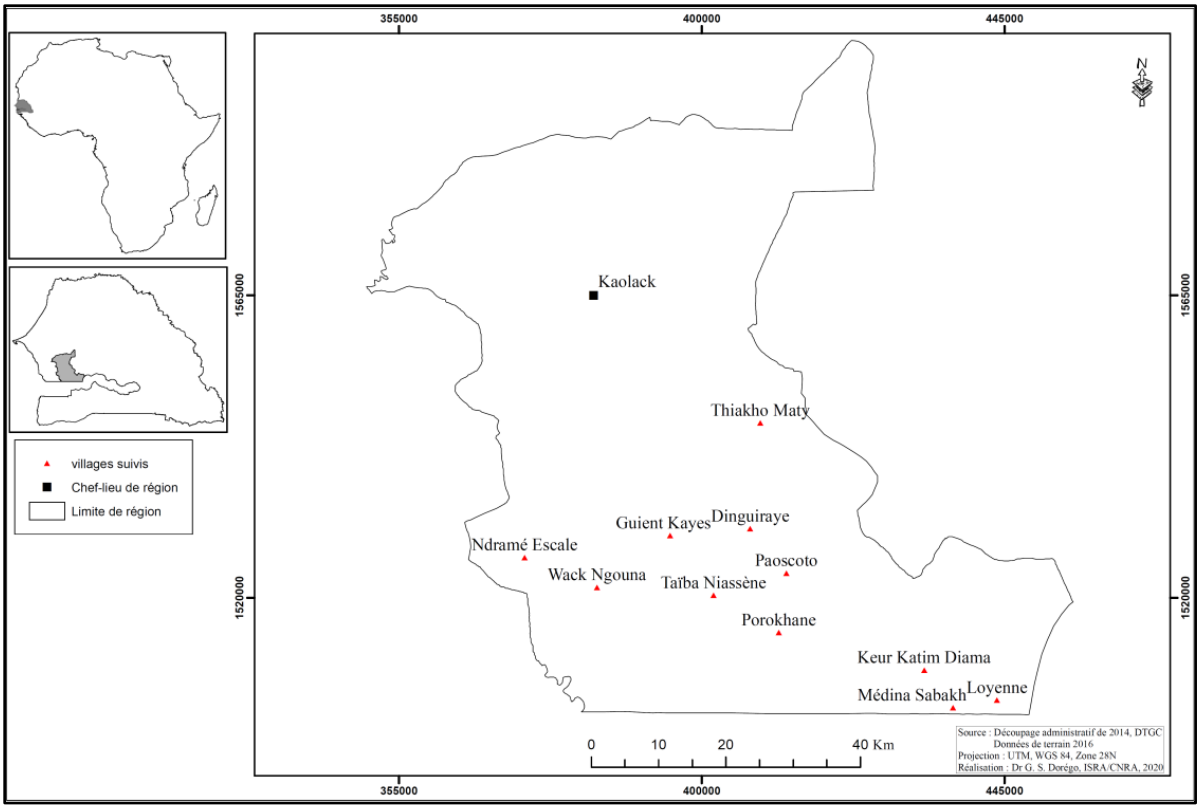


Figure 1. Localisation des sites de l'étude

Pour déterminer les situations de risque de base une matrice a été réalisée à partir des dates de semis après réception de la pluie utile (PU), des données des pluviomètres manuels des producteurs (PM) comparées à celles des pluviomètres authentiques suivis par l'ANACIM (PA)et du niveau moyen de rendement considéré à un seuil de 60 % obtenu à partir des données de rendements moyens de la Direction de l'Analyse de la Prévision et des Statistiques agricoles (DAPSA) à l'échelle départementale sur les cinq années précédant l'étude.

Le fonds de gestion du risque de base a été calculé à partir des projections tirées des plans d'affaire de la CNAAS et en tenant compte de la fréquence d'apparition des phénomènes extrêmes comme les sécheresses et de leur niveau de sévérité. Selon Dick *et al.* (2011) et

Hazell P. *et al.* (2010), les phénomènes extrêmes comme les sécheresses modérées à sévères qui ont un degré de covariance modéré à élevé en affectant un nombre important de producteurs en même temps ont une fréquence d'apparition moyenne à faible, soit une année sur cinq à sept ans. Puisque des enquêtes, il est ressorti qu'au moins 20% (1/5) des villages assurés ont réclamé un paiement entre 2013 et 2014, il a été donc adopté, pour la compensation de la perte, une fréquence d'occurrence d'une mauvaise année sur 5. La compensation du risque de base annuel a été déterminée avec la formule suivante : 1/5 * 25 % * Montant du fonds annuel. 1/5 étant le taux de prévalence du risque de base et 25% étant le montant de la compensation suite à une situation de risque de base. Le montant du fonds annuel désigne la prime affectée au fonds en année (n) + le montant du fonds restant de l'année (n-1).

2. Résultats

2.1. Répartition des cultures assurées

Les cultures qui ont été les plus couvertes sont le maïs et l'arachide avec 46 et 36 % des producteurs. Le mil n'est assuré qu'à hauteur de 18 %. Les variétés assurées ont généralement un cycle de 90 jours à part l'arachide qui connaît également des variétés à cycle long dépassant 100 jours.

2.2. Intervalles entre dates de pluie utile et dates de semis des cultures assurées

La pluie utile (PU) a été reçue le9 juillet 2015. Les semis du maïs et de l'arachide ont été le plus souvent réalisés durant les 10 jours après réception de la pluie utile et cela par 86 et 68 % des producteurs enquêtés (Fig.2). Ces derniers ont semé le mil surtout entre le 11^{e} et le 15^{e} jours après la pluie utile avec 41,5 % contre 53 % qui ont semé avant cette période. 14 et 31,5 % des producteurs ont semé le maïs et l'arachide entre le 11^{e} et le 20^{e} jours après la pluie utile.

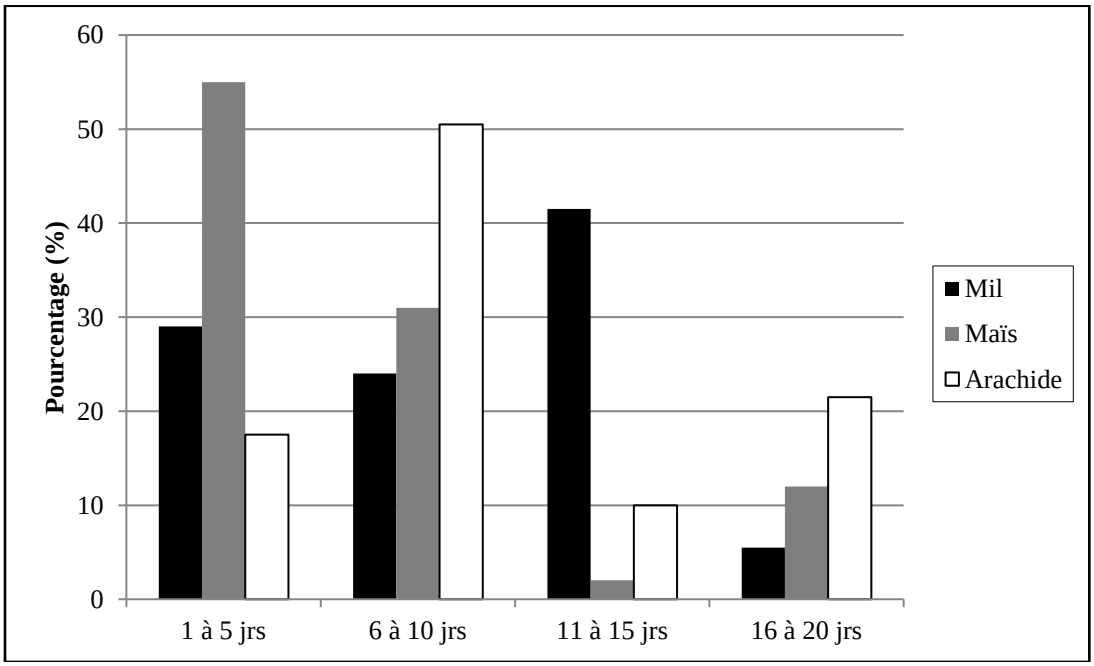


Figure 2. Dates de semis après la PU à Kaolack

2.3. Analyse de la pluviométrie et des sinistres récemment induits

L'évolution de la pluviométrie, essentiellement déficitaire depuis la fin des années 60, est sujette à une variabilité malgré sa reprise hésitante dès la fin des années 90 (Sagna P. *et al.*, 2015, Sambou P. C., 2015, Bodian *et al.*, 2020) (Fig.3).

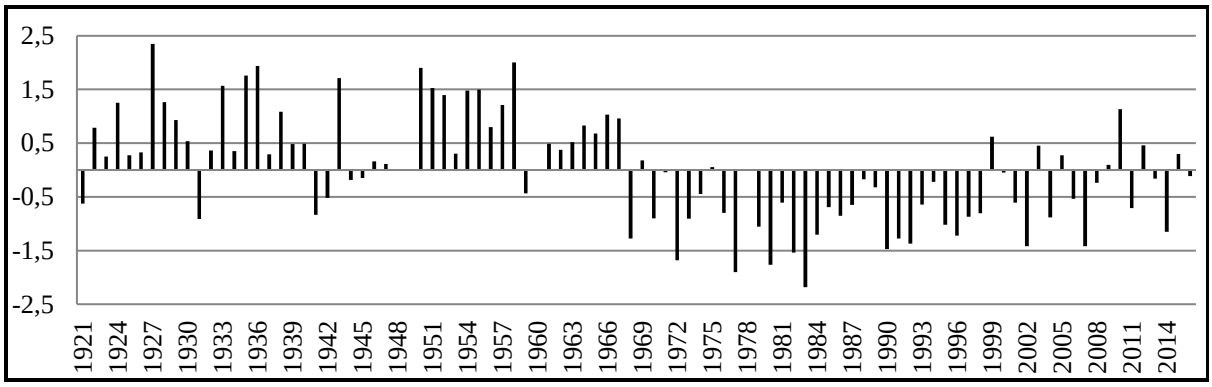


Figure 3. Evolution de l'indice standardisé de précipitation de 1921 à 2016

Depuis l'instauration effective de l'assurance pluviométrique indicielle en 2012 et jusqu'en 2016 les échecs de semis, déficits pluviométriques et longues pauses pluviométriques (Tab.1) ont causé une indemnisation de 92 546 669 francs CFA (140 675,38 euros) en faveur des producteurs sinistrés. Ces sinistres ont été notés durant les années où les indices standardisés pluviométriques ont été déficitaires, soit en 2013, 2014 et 2016(Fig.3, 4). Le nombre de sinistrés a été plus important en 2014 avec 1937 producteurs soit un peu plus de la moitié des assurés (53 %) contre 1536 et 816 en 2016 et 2013 (28 et 35 % des assurés). En 2016, les indemnisations ont été surtout dues aux échecs de semis et aux décades sèches consécutives (Fig.5).

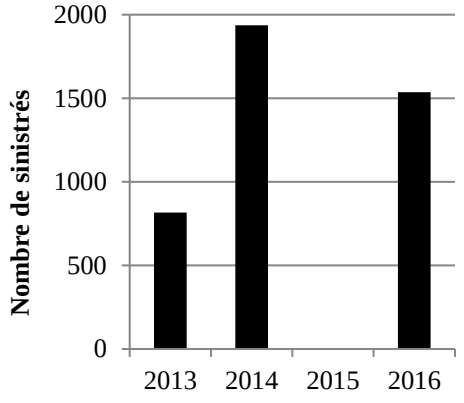


Figure 4. Le nombre de sinistrés de 2013 à 2016

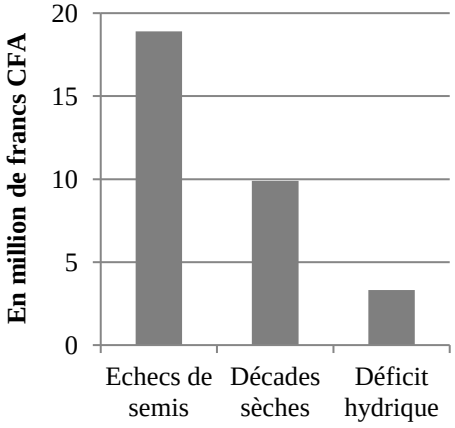


Figure 5. Les indemnisations des risques en 2016

Tableau 1. Caractéristiques des risques agroclimatiques couverts

Risque	Description
Echec de semis	Si 15 ou 20 mm de pluie ne sont pas reçus en 1 ou 2 jours consécutifs dans une fenêtre de semis qui a été identifiée pour le mil et l'arachide et le maïs.
Déficit hydrique	Il est évalué par phase et par culture. Ce sont trois phases qui sont prises en compte et pour chacune est déterminé un premier niveau de quantité d'eau en mm (déclenchement) à partir duquel la plante commence à souffrir de manque d'eau et un dernier seuil où le manque d'eau est sévère (sortie). Ces deux seuils dépendent des coefficients culturaux des plantes et de l'évapotranspiration maximale (ETM).

Décades sèches	Quand la quantité de pluie reçue est inférieure aux besoins en eau durant deux décades successives dans une phase.

2.4. Analyse de la perception par les populations du risque de base

La perception du risque de base par les populations a été analysée en prenant en compte les trois types de risques de base définis par Dick *et al.* (2010) : spatial, temporel et lié à l'indice lui-même. La principale cause du risque de base est le rayon de couverture qui est jugé trop large par 83 % des producteurs (Fig.6). En effet dans le cadre de l'assurance climatique, il existe un réseau de pluviomètres mécaniques et automatiques suivis par l'ANACIM et qui collectent la pluviométrie des localités qui se trouvent dans un rayon de 5 km de ceux-ci. D'où les réactions des producteurs qui notent une irrégularité pluviométrique spatiale (69 %) et une différence entre les données de pluie mesurées par ces pluviomètres authentiques et leurs pluviomètres (65 %). Enfin, il y a souvent un décalage entre le moment où sèment les agriculteurs et celui où on enregistre la pluie utile.

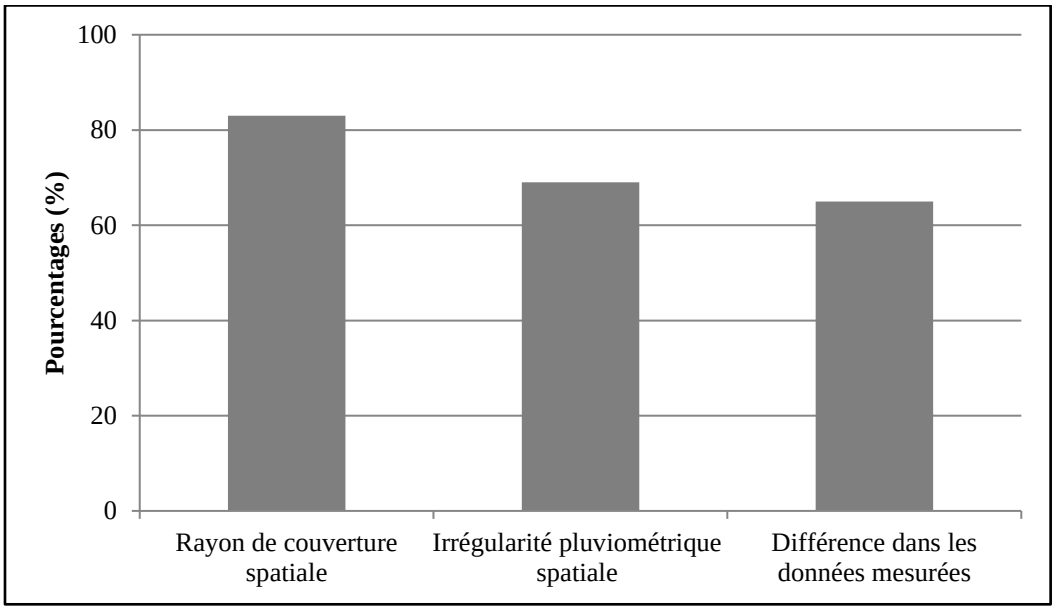


Figure 6. Perceptions des producteurs sur les causes du risque de base

2.5. Matrice de détermination du risque de base

La matrice révèle que quels que soient le niveau de rendement et le moment où sèment les producteurs après réception de la pluie utile, si la pluie relevée au niveau du pluviomètre des producteurs est supérieure ou égale à celle relevée au niveau du pluviomètre suivi par l'ANACIM, il n'y aura pas de risque de base. Par contre si ces situations se présentent mais avec une quantité de pluie du pluviomètre paysan inférieure à celle du pluviomètre authentique et un niveau de rendement de – 60 %, il y aura un risque de base (Tab.2). Ce dernier va varier de 100 à 25 % du capital assuré si les producteurs sèment dès réception de la PU et successivement jusqu'au 20[e]jour suivant. Au-delà il n'y a plus de risque de base.

Tableau 2. Matrice de gestion du risque de base

Nombre de jours après la PU	Données PM/données PA	Niveau de rendement	Niveau du risque de base par rapport au capital assuré
[0-5[	PM<PA	-60%	100% du capital assuré
[5-10[	PM<PA	-60%	75% du capital assuré
[10-15[	PM<PA	-60%	50% du capital assuré

[15-20[	PM<PA	-60%	25% du capital assuré
[20-plus[	Pas de risque de base		

2.6. Le fonds de gestion du risque de base

Le fonds de gestion du risque de base est de 77 269 500 francs CFA en 2015 et 89 703 137 francs CFA en 2016. Cependant il n'est mobilisé qu'en cas de non déclenchement de l'indice ou si les agriculteurs dans un village jugent insuffisantes les indemnisations reçues de la compagnie d'assurance parce qu'ils ont connus un déficit important des précipitations et/ou de longues pauses pluviométriques. En outre, il faut qu'ils aient respecté les fenêtres de semis, les bonnes pratiques culturales et que la perte de rendement soit importante au sein du village.

Conclusion

Les données de terrain ont permis de caractériser le risque de base qui est surtout lié à une différence entre les données des pluviomètres authentiques et celles des pluviomètres des producteurs. Ces différences sont surtout liées au rayon de couverture qui est large, ce qui accroît l'irrégularité pluviométrique spatiale. Le risque de base est maximal dans les cinq jours après la pluie utile si les rendements sont de -60 % et si la quantité de pluie des pluviomètres des producteurs est inférieure à celle des pluviomètres authentiques. Le fond de gestion permet de compenser les pertes liées à l'existence de cette situation de risque de base. Dans un contexte d'évolution climatique récente où la pluviométrie est sujette à une importante variabilité, la réduction du risque de base permettra de rendre plus efficiente l'assurance indicielle climatique qui constitue un outil fondamental de stratégie d'adaptation pour les populations sahéliennes.

Bibliographie

Agence Nationale de la Statistique de la Démographie (ANSD), 2018. Situation économique et sociale du Sénégal en 2015. Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan, République du Sénégal, 350p.

Balme M., Lebel T., Amani A., 2006. Années sèches et années humides au Sahel : quo vadimus?. *Hydrological Sciences – Journal–des Sciences Hydrologiques,* 51(2),254-271.

Bodian A., Diop L., Panthou G., Dacosta H., Dème A., Dezetter A., Ndiaye, P. M., Diouf I. & Vischel T., 2020. Recent Trend in Hydroclimatic Conditions in the Senegal River Basin. *Water*, 12, 436, 12p.

Dick W., Stoppa A., Anderson J., Coleman E., & Rispoli F., 2011. *Weather Index-based Insurance in Agricultural Development. A technical guide.* WFP, IFAD, 66p.

Hazell P., Anderson J., Balzer N., Hastrup Clemmensen A., Hess U. & Rispoli F., 2010. L'assurance basée sur un indice climatique: potentiel d'expansion et de durabilité pour l'agriculture et les moyens de subsistance en milieu rural. *FIDA,* PAM, Rome, 2010, 151p.

Mapfumo S., Groenendaal H. & Dugger C., 2017. *Risk modeling for appraising named peril index insurance products. A guide for practitioners*. Directions in development. Washington DC, World Bank Group, 285p.

Malouin C., 2013. *Une analyse du risque de base et du risque de contrepartie présents dans les ILW*. Essai effectué dans le cadre de la M. Sc. Ingénierie Financière, FSA ULaval, France, 86p.

Sagna P., 2007. Caractéristiques climatiques. *Atlas du Sénégal*. Paris, Les éditions J.A., p.66-69.

Sagna P., Ndiaye O., Diop C., Niang A. D., Sambou P. C., 2015. Les variations récentes du climat constatées au Sénégal : sont-elles en phase avec les descriptions données par les scenarios du GIEC ? *Pollution atmosphérique,* n° 227. URL : http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5320.

Sambou P.C., 2015. *Évolution climatique récente, impacts et stratégies d'adaptation des populations dans les arrondissements de Sakal et de Ndande, dans la région de Louga*. Thèse de doctorat unique, département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, école doctorale, études sur l'homme et la société (ET.HO.S), Dakar, 456p.

MESO-CLIMATE STUDY AND ITS EFFECT ON BERRY COMPOSITION IN THE ATLANTIC EMERGING WINE REGION OF URUGUAY: PRELIMINARY RESULTS

TACHINI R., FOURMENT M., FERRER M.

Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Montevideo, Uruguay (ramirotachini1@gmail.com)

Summary: *Temperature is one of the main environmental components that determines the growth and development of plants. The objective of the study was to evaluate the temperature spatial variability of the Atlantic wine region of Uruguay and its influence on the Tannat and Albariño berry compounds. As preliminary results for the 2018-2019 growing season, bioclimatic indices for viticulture showed differences, between plots at different topographic and exposition conditions within short distances. Altitude was the most decisive factor determining thermal amplitude and cool night index and, in turn, the cultivar responses, i.e. final accumulation of organic acids in the case of Albariño and, concentration of anthocyanins in the case of Tannat. Meso-climate characterization in the Atlantic wine region of Uruguay helps in improving knowledge on its impact on cultivar development.*

Key words: *vitis vinifera; tannat; Albariño; temperature; topography; Uruguay*

Résumé : ***Etude du méso-climat et de ses effets sur la composition des baies dans la région viticole atlantique de l'Uruguay : résultats préliminaires.*** *La température est l'une des principales composantes environnementales qui déterminent la croissance et le développement des plantes. L'objectif de ce travail a été d'évaluer la variabilité spatiale de la température de la région viticole atlantique de l'Uruguay et son influence sur les composés de baies de Tannat et Albariño. Comme résultats préliminaires sur la saison végétative 2018-2019, les indices bioclimatiques ont montré des différences entre les parcelles à différentes conditions topographiques et d'exposition sur de courtes distances. L'altitude était le facteur le plus décisif déterminant l'amplitude thermique ainsi que l'indice de fraîcheur des nuits et en retour sur la réponse des cépages ; c'est-à-dire sur l'accumulation finale d'acides organiques dans le cas d'Albariño, et sur la concentration d'anthocyanines dans le cas du Tannat. La caractérisation du méso-climat de la région viticole atlantique de l'Uruguay permet d'améliorer les connaissances sur son influence sur le développement des cépages.*

Mots clés : *vitis vinifera ; tannat ; Albariño ; température ; topographie ; Uruguay*

Introduction

Vitis vinifera L. responds strongly to the environmental conditions provided by the site where the crop is established (Deloire *et al.*, 2005). Within them, temperature is one of the main elements that determine the growth and development of plants (Bergqvist *et al.*, 2001). At a region scale, the plant-environment interaction can be modified by topography (slope and altitude) and the proximity and exposure to large bodies of water that influence on the thermal behavior of the region where grapevine is grown (Fourment *et al.*, 2017).

The new coastal wine region of eastern Uruguay is influenced by the Atlantic Ocean, with lower maximum temperatures, higher wind and cloudiness events than the rest of the country. The wineries in the area mention the importance of the ocean and the local sea breeze air circulation as a differentiating factor of their wines. This phenomenon is widely studied by different authors throughout the world (Bonnardot *et al.*, 2005; Planchon *et al.*, 2006), as well as in Uruguay through the main wine-growing area of the country, influenced by the Rio de la Plata (Fourment *et al.*, 2014, 2017). During summer when its occurs most frequently in coastal regions, the sea breeze prevents from extreme maximum temperatures that may hinder grapevine functioning (Bonnardot *et al.*, 2005). This provides a ripening period for the berry that is more conducive to less acidity degradation (Sweetman *et al.*, 2014), as well as a greater accumulation of anthocyanins (Mori *et al*. 2007).

The description of the meso-climate of the area is fundamental to accurately understand the behavior of the grapevine for the design of sustainable management practices. The objective of

this work is to characterize the meso-climate of the eastern region of Uruguay and its influence on the production of grapes for wine, with main emphasis on the Tannat and Albariño cultivars.

1. Data and Method

1.1. Site description and geographic information

The study site was located in commercial vineyards near to Pueblo Garzón (Maldonado Department), located in eastern Uruguay (34.57º S; 54.60º W). Twenty plots were selected; nine with Tannat red grape cultivar and ten with Albariño white grape cultivar growing in different topographical environment (altitude, slope and exposure; Fig.1), within a radius of 2 km and at an average distance of 20 km in a straight line from the Atlantic Ocean. The topographic information was collected through Geographic Information Systems (GIS), based on a virtual altitude layer (DEM) created by the Ministry of Livestock, Agriculture and Fisheries (MGAP) of Uruguay, and subsequently verified in the field. Altitude ranges from 70 m to 138 m above sea level, slope varied from 1.8 % to 10.4 % with various slope aspects. The soil type where the vineyard is located corresponds to Regosols according to USDA soil classification.

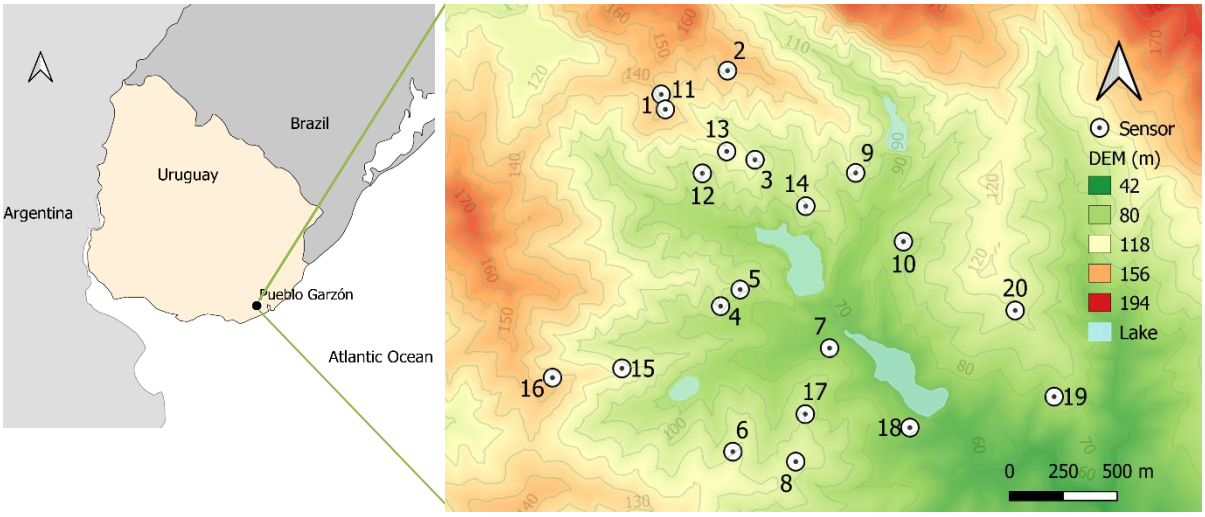


Figure 1. Location of the study site and selected plots in Maldonado Department, south east of Uruguay.

1.2. Berry composition analysis

For each selected plot, the composition parameters of the primary and secondary compounds of berries were determined at harvest. The variables analyzed were: soluble solids by refractometry, pH by potentiometry, acidity by titration under the rules of the OIV protocol (1990), organic acids by liquid chromatography and polyphenols and anthocyanins by Glories and Agutin method (Glories and Agutin, 1993).

1.3. Climate analysis

In each plot, temperature sensors (Tinytag data loggers) were set up on the vineyard trellis system. Sensors recorded air temperature every 15 minutes during the 2018-2019 vegetative cycle (1st September to 15th March). From the observed data, bioclimatic indices adapted to grapevine were calculated: Growing degree days (GDD) (Winkler *et al.*, 1974), Huglin Index (HI) (Huglin, 1978), Cool Night Index (CNI) (Tonietto and Carbonneau, 2004), thermal amplitude (TA), number of days with temperatures above 30 and 35°C (ND30 and ND35) (Hunter and Bonnardot, 2011) and number of fifteen minute-periods with temperatures above 30 and 35°C (N15min30 and N15min35).

1.4. Statistical analysis

Correlations were established between topographic parameters, berry composition and climate data. For that purpose, linear regressions and matrix correlations were performed with the statistical software INFOSTAT® (Di Renzo *et al.*, 2017).

2. Results and discussion

2.1. Climate spatial variability

Based on the multi-criteria classification (Tonietto and Carbonneau, 2004), the value of the plots analyzed for HI corresponds to temperate to warm climate for the period under study (Tab.1). This is in line with the work developed by Ferrer *et al.* (2007), which analyzes the regions at a macro scale using data for the 1961-1990 period. However, the CNI value for the plots under study is identified as temperate nights differing from study by Ferrer *et al.* (2007), which threw warm nights.

Table 1. Bioclimatic indices adapted to grapevine for the 20 selected plots.

Variable	**Average**	**CV (%)**	**Min**	**Max**
GDD	1806	0.65	1785	1824
HI	2296	0.97	2263	2347
CNI	16.46	2.51	15.54	17.09
TA	11.54	5.71	10.66	12.92
ND30	26	13.36	21	35
N15min30	479	11.4	384	595
ND35	6	43.26	1	9
N15min35	23	66.99	1	54

The indices that presented the greatest coefficient of variation were those referring to extreme temperatures (temperatures greater than 30°C and temperatures greater than 35°C). These are the thermal threshold of physiological activity for grapevine, where temperatures above these values can inhibit the production of photo-assimilated by the plant (Bergqvist *et al.*, 2001) and greater degradation of acids in the grape, mainly malic acid (Jackson and Lombard, 1993). On the other hand, the HI and CNI values presented low coefficients of variation, although the extreme values differed at the study site by 84 HI units and 1.55°C for CNI.

Regarding the climatic relationship with the topography, the thermal amplitude was correlated with the altitude of the plots (-0.65; p-value < 0.005; Fig.2a). The sites located in lower areas (less slope and sheltered from the ocean breeze) presented greater thermal amplitude compared to the plots located in the top of the terrain. This is due to accumulation of cold air in lower areas at night and the effect of the altitude and ocean-facing slope lowering the maximum thermal values.

Night temperatures during the ripening period play a major role in the berry quality. The characterization of the ripening period can be done through the Cool Night Index (CNI) (Tonietto and Carbonneau, 2004). Fig.2b shows the relationship between CNI and altitude (0.67; p-value < 0.005), marking in the same vineyard differences of 1.55°C of CNI between plots with 68 m of difference in altitude. This information could be useful when designing the vineyard, i.e. prioritizing cultivars in cooler locations.

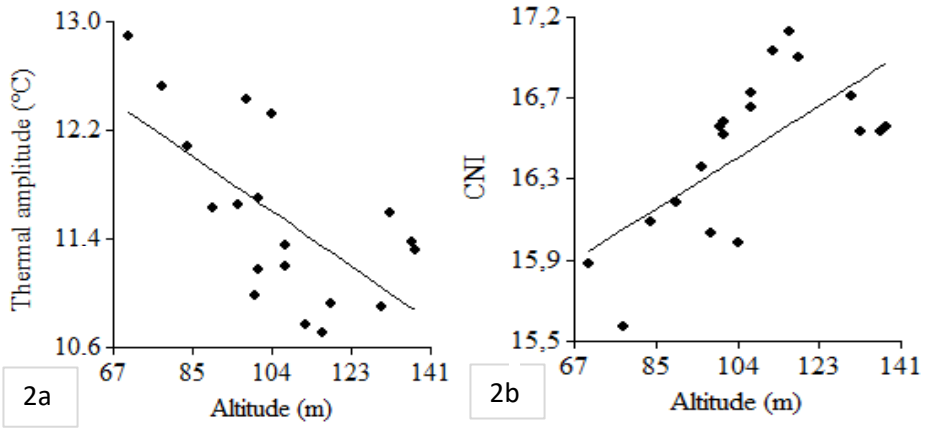


Figure 2. a) Thermal amplitude (ºC) versus altitude (m) (-0.65; p-value < 0.005); b) Night-time freshness index versus altitude (m) of the plots (0.67; p-value < 0.005).

2.2. Grape composition in relation to meso-climate

Albariño had a positive correlation between total acidity and altitude (0.7; p-value < 0.02; Fig.3a), where malic acid was the main compound involved (0.64; p-value < 0.04; Fig.3b). The greatest difference in acidity reached 2.7 (g/L) between plots situated at altitudes of 70 m and 138 m (3.85 to 6.55 g/L respectively). The altitude would be affecting the degradation of acids through different thermal situations. The effect of temperature on acidity is reported by several authors (Jackson and Lombard, 1993; Sweetman *et al.*, 2014), where a greater thermal accumulation generates a greater consumption of acids during ripening, mainly malic acid (Martínez-Esteso *et al.*, 2011; Sweetman *et al.*, 2014).

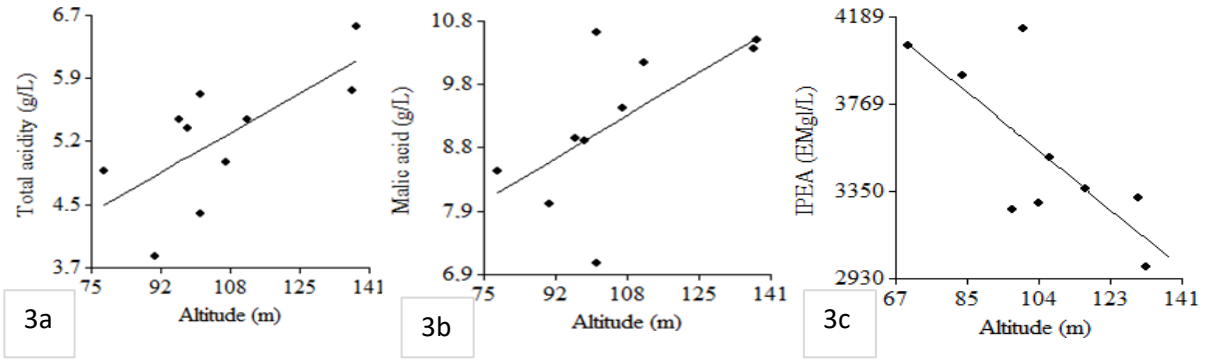


Figure 3. a) Correlation between Altitude (m) and Total acidity (g/L) in Albariño (0.7; p-value < 0.02). b) Correlation between altitude (m) and Malic acid (g/L) in Albariño (0.64; p-value < 0.04). c) Correlation between altitude (m) and Index of Potentially Extractable Anthocyanins (EMgl/L) in Tannat (-0.7; p-value < 0.02)

Tannat cultivar showed a strong negative correlation with the Index of Potentially Extractable Anthocyanins (IPEA) (-0.7; p-value < 0.02; Fig.3c). The IPEA was 28% lower in the upper plots. This is due to plots in lower altitude recording higher temperature during the day compared to those at greater altitudes. Also, the plots in the lower areas had the lowest temperature during the night due to the accumulation of cold air in the base of watershed (Tab.2). This correlates with several authors, who mentioned the importance of temperature in

gene expression and enzymatic activity responsible for anthocyanin biokinetics. They describe temperatures no higher than 30°C (Mori *et al*. 2007; Spayd *et al.*, 2002) and accompanied by cool nights (15°C) (Mori *et al.*, 2005) for a greater accumulation of anthocyanins.

Table 2. Comparison of recorded temperatures for the months of berry ripening and optimal accumulation of anthocyanins.

	$\bar{x}$ *maxJan*	$\bar{x}$ *minJan*	$\bar{x}$ *maxFebr*	$\bar{x}$ *minFebr*
Highest plot (132m)	28.4	17.7	29.2	16.6
Lowest plot (70m)	29.4	16.9	29.3	15.9
Bibliography threshold by anthocyanins accumulation	30	15	30	15

Goto-Yamamoto *et al.* (2009) mentioned that excess temperature (above 30°C) can paralyze the accumulation of anthocyanins by inhibiting the metabolic process. For the studied vintage no average thermal values were recorded above the threshold, marking for the region under study a site conducive to the accumulation of this compound.

Conclusions

Even though the study is based on a single year data analysis, the preliminary results for the 2018-2019 vegetative cycle of Tannat and Albariño plots, allowed thermal characterization at mesoscale of the Atlantic region of Uruguay. It is showed that the temperature at the fine scale varies in relation to the topography, behaving differently to previous macro-scale studies carried out in the region. Altitude was one of the most decisive topographic features in the thermal regime of the region with different effect depending on the cultivars under study. For Albariño, the acidity showed to be the most influenced. For Tannat, the IPEA showed to be the compound more affected by the meso-climate.

The study provided a first understanding of the mesoscale thermal conditions of the eastern region of Uruguay and its influence on the two mains cultivars of the region. The sea breeze influence and/or the influence of the ocean facing slopes or ocean non-facing slopes need to be investigated.

Literature

Bergqvist J., Dokoozlian A., Ebisuda N., 2001. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the central San Joaquin Valley of California. *Am J Enol Vitic*, 52 (1), 1-7.

Bonnardot V., Planchon O., Cautenet S., 2005. Sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South-Western Cape and implications for the Stellenbosch wine-producing area. *Theor Appl Climatol*, 81(3-4), 203-218.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W., 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: http://www.infostat.com.ar.

Deloire A., Vaudour E., Care V., Bonnardot V., van Leeuwen C., 2005. Grapevine Responses To Terroir : A Global Approach Les Réponses De La Vigne Au Terroir : Une Approche Globale. *J Int Des Sci La Vigne Du Vin*, 39(4), 149–162.

Ferrer M., Pedocchi R., Michelazzo M., González-neves G., Carbonneau A., 2007. Delimitación y descripción de regiones vitícolas del Uruguay en base al método de clasificación climática multicriterio utilizando índices bioclimáticos adaptados a las condiciones del cultivo. *Agrociencia*, 11(1), 47-56.

Fourment M., Ferrer M., Bonnardot V., Quenol H., 2014. Preliminary results of fine scale temperature variability in a wine region of Uruguay. *WCRP Conf Lat Am Caribb Dev Link Appl Clim Knowl*, (88).

Fourment M., Ferrer M., González-Neves G., Barbeau G., Bonnardot V., Quénol H., 2017. Tannat grape composition responses to spatial variability of temperature in a Uruguay's coastal wine region. *Int J Biometeorol*, 61(9), 1617-1628.

Glories Y., Augustin M., 1993. Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques : application aux millésimes 1991 et 1992. *Proceedings of the Compte Rendu Colloque Journée Techn. CIVB, Bordeau.*

Goto-Yamamoto N., Mori K., Numata M., Koyama K., Kitayama M., 2010. Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition in the skin of red-wine grapes. *J Int Sci Vigne Vin (Special Issue Macrowine)*, 75–80.

Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Proceeding Symp. Int. sur l'ecologie la Vigne. Ministère l'Agriculture l'Industrie Aliment*., Contança.

Hunter J., Bonnardot V., 2011. Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. *S Afr J Enol Vitic*, 32, 137–154.

Jackson D., Lombard P., 1993. Environmental and Management Practices Affecting Grape Composition and Wine Quality - A Review. *Am J Enol Vitic*, 44(4), 409-430.

Mori K., Goto-Yamamoto N., Kitayamam M., Hashizume H., 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J Exp Bot*, 58(8), 1935–1945.

Mori K., Sugaya S., Gemma H., 2005. Decreased anthocyanin biosynthesis in grape berries grown under elevated night temperature condition. *Sci Hortic (Amsterdam)*, 105, 319–30.

Martínez-Esteso M., Sellés-Marchart S., Lijavetzky D., Pedreño M., Bru-Martínez R., 2011. A DIGE-based quantitative proteomic analysis of grape berry flesh development and ripening reveals key events in sugar and organic acid metabolism. *J Exp Bot* , 62(8), 2521-2569.

Office international de la vigne & du vin., 1990. Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts. OIV.

Planchon O., Dubreuil V., Gouery P., 2006. A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing. *Meteorol Appl*, 13(3), pp.225-234 .

Spayd S., Scagel C., Tarara M., Lee J., 2008. Berry Temperature and Solar Radiation Alter Acylation, Proportion, and Concentration of Anthocyanin in Merlot Grapes. *Am J Enol Vitic*, .59(3), 235-247.

Sweetman C., Sadras V., Hancock R., Soole K., Ford C., 2014. Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening Vitis vinifera fruit. *J Exp Bot* , 65(20), 5975-5988.

Tonietto J., Carbonneau A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agric For Meteorol*, 124(1-2), 81-97.

Winkler J., Cook A., Kliewer M., Lider A., 1974. *General viticulture*. Univ. of California. Pres, Berkeley. 633p.

SIMULATION DU CLIMAT FUTUR ET DES RENDEMENTS AGRICOLES EN REGION SOUDANO-SAHELIENNE EN REPUBLIQUE DU BENIN

TENTE A.B.H.

Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université d'Abomey Calavi, Calavi, Bénin (tentebrice@gmail.com)

Résumé : *La présente étude a été initiée pour déterminer les caractéristiques des rendements des principales spéculations agricoles de la région soudano-sahélienne de l'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement la Commune de Banikoara à l'horizon 2050. La méthodologie adoptée regroupe la collecte des statistiques agricoles et des données météorologiques sur le long terme, le calcul d'indices agro-climatiques et la simulation des rendements au moyen de DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfert) et Crop-Model. Les résultats, montrent que les températures de la région soudano-sahélienne connaîtront une hausse comprise entre 1° et 3°C en référence aux valeurs de la période 1971-2010. La pluviométrie de la saison agricole baissera par rapport à la période de référence selon les scénarios d'augmentation de la température moyenne (de 1°C, 1,5°C et 2°C). Outre le sorgho pour lequel une amélioration de 9,3% du rendement a été observée, les rendements des spéculations agricoles baisseront à l'horizon 2050. La modification du calendrier agricole et plus précisément l'adaptation des périodes de semis aux perturbations climatiques constatées apparaît comme une urgence pour garantir la sécurité alimentaire dans la région soudano-sahélienne.*

Mots clés : *indices agro-climatiques ; DSSAT ; prédiction ; Sorghum bicolor*

Summary: ***Simulation of future climate and agricultural yields in the sudano-sahelian region in the Republic of Benin.*** *The present study was initiated to determine the yield characteristics of the main agricultural speculations in the Sudano-Sahelian region of West Africa and more particularly the Commune of Banikoara by 2050. The methodology adopted includes the collection of agricultural statistics and long-term meteorological data, the calculation of agro-climatic indices and the simulation of yields using DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) and Crop-Model. The results show that temperatures in the Sudano-Sahelian region will increase by between 1° and 3°C with reference to the values of the period 1971-2010. The rainfall during the agricultural season will decrease compared to the reference period according to the average temperature increase scenarios (by 1°C, 1.5°C and 2°C). Apart from sorghum for which a 9.3% improvement in yield has been observed, yields from agricultural speculation will decline by 2050. The modification of the agricultural calendar and more specifically the adaptation of sowing periods to the climatic disturbances observed appears to be urgent to guarantee food security in the region.*

Key words: *agro-climatic indexes; DSSAT; prediction; Sorghum bicolor*

Introduction

L'Afrique subsaharienne est l'une des régions les plus vulnérables au changement climatique (IPCC, 2011). Elle est soumise à d'intenses variabilités des paramètres climatiques qui se manifestent par une inégale répartition dans le temps et dans l'espace des précipitations et par une hausse des températures (McCarthy *et al*., 2010). Le changement climatique aurait comme conséquences la baisse des rendements agricoles et une augmentation des risques d'insécurité alimentaire et nutritionnelle (Newman, 2016.).

Au Bénin, le secteur agricole est affecté par les effets de la variabilité climatique du fait du caractère essentiellement pluvial de l'agriculture (Sarr *et al.*, 2012). La commune de Banikoara, combine productions vivrières et de rente. Il s'avère nécessaire d'établir des projections futures du niveau de vulnérabilité du système de production agricole au changement climatique afin d'anticiper sur les mesures adaptatives à apporter pour pallier les effets néfastes futurs. C'est dans ce contexte que cette commune a été choisie, pour simuler à l'horizon 2050, les rendements agricoles des principales cultures vivrières (maïs, sorgho, manioc, riz, l'arachide, l'igname, soja, niébé) et une culture de rente (coton).

1. Données et méthode

1.1. Milieu d'étude

La Commune de Banikoara est située au Nord-Ouest du Département de l'Alibori, entre les latitudes 11º02' et 11º34' Nord et les longitudes 2º05' et 2º46' Est (Fig.1). Elle couvre une superficie de 4397,2 km² dont environ 49 % de terres cultivables et 50 % d'aires protégées (Parc National du W du Niger et la zone cynégétique de l'Atacora). Elle compte environ 246 575 habitants. La densité de population est estimée à 34,7 hab km-² (INSAE, 2015). L'agriculture et l'élevage sont les principales activités économiques exercées par les populations de Banikoara.

1.2. Collectes des données

Les données climatiques (précipitation, humidité relative, températures) sur la période allant de 1971 à 2010, ont été collectées à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (ASECNA) de Cotonou pour la Commune de Banikoara. Les statistiques annuelles des productions agricoles des spéculations retenues entre 1971 et 2010, ont été obtenues au Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP), à l'Institut National de Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE) et à l'Office Nationale d'Appui à la Sécurité Alimentaire (ONASA). Ces statistiques sont relatives aux productions (en tonnes), superficies emblavées (en ha) et rendements (en kg ha-1).

1.3. Analyse des données

1.3.1. Scénarios utilisés et suppositions de base

Dans la présente étude, douze (12) scénarios de base (Tab.1) composites issus des variables de températures (augmentation de la température moyenne de 1°C, 1,5°C et 2°C) et de la durée de la saison de croissance (en lieu et place de la pluie) ont été formulés et retenus en fonction des considérations : (i) des amplitudes de changement simulées par les modèles climatiques ; (ii) des tendances générales des variables climatiques observées par les stations météorologiques du milieu d'étude et (iii) du choix raisonnable d'approcher l'analyse du risque alimentaire par les scenarii pessimistes (principe de précaution).

Par la suite, trois types de sols : (i) sol ferrugineux à sesquioxydes et à concrétions sur granito-gneiss avec pH neutre à basique (7-8), désigné par S1 dans la présente étude; (ii) sol formé d'une superposition de S1, de sol ferralitique à concrétions et cuirasses de texture argilo-sableux et horizons évolués, caractérisé par un drainage interne et un pH neutre à basique (7-8), désigné par S2 dans la présente étude; (iii) sol hydromorphe peu humifère sur alluvions, à pseudogley à tâches, désigné par S3 ont été déterminés.

La tendance de l'état de référence du facteur pédologique dans la simulation du rendement futur est construite comme dans le Tableau 2.

Après la combinaison des scénarios climatiques de base et des suppositions pédologiques, trente-six (36) scénarios de rendements possibles par culture ont été générés.

1.3.2. Détermination de la saison de croissance.

La détermination des caractéristiques de la saison de croissance (durée, début et fin) dans le Crop-Model s'est faite à travers le calcul de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) mensuelle selon Sumner et Jacobs (2005). Les valeurs mensuelles de l'ETP ont été extrapolées en valeurs journalières utilisable par le Crop-Model. Il en est de même des hauteurs des précipitations.

Tableau 1. Scénarios climatiques dans la zone agro-pastorale de production cotonnière à l'horizon 2050

	Scénarios thermiques		
Scénarios Durée de la Saison de Croissance	+1°C	+1,5°C	+2°C
-10 %			
-15 %			
-20 %			
-25 %			

Légende

: Scénario certain
: Scénario probable
: Scénario critique
: Scénario extrême

Tableau 2. Suppositions de l'état de la qualité des sols pour la simulation des rendements des cultures. (FSC = Situation future sans amélioration des conditions du sol ; FAC = Situation future avec amélioration des conditions du sol)

		S1	**S2**	**S3**
Potentialités agronomiques	***Actuelles***	Moyenne à bonne	Excellent milieu de croissance, bonne pour toute culture	Très fertile bonne pour toute culture
	FSC	Infertile	Moyenne	Moyenne à bonne
	FAC	Bonne	Bonne à très bonne	Très bonne
Indice cultural	***Actuel***	0,75	1,00	1,00
	FSC	Moins de 0.5	0,75	0,75 – 1,00
	FAC	0,75 – 1,00	1,00	1,00

NB : Un sol amélioré équivaut à un sol ayant bénéficié des apports en engrais organiques ou chimiques

1.3.3. Détermination de la biomasse et du rendement par culture.

La production de biomasse nette tient compte du taux maximum de production de biomasse brute pendant la saison de croissance en kg ha-1 J-1 ; du coefficient de transpiration de la plante et de la longueur de la saison de croissance en jour. En raison de la difficulté à quantifier la plupart des contraintes agro-climatiques qui réduisent les rendements des cultures, le logiciel Decision Support System for Agrotechnology Transfert (DSSAT) V4.0 a été utilisé pour n'estimer que trois d'entre elles à savoir le stress hydrique; la contrainte de travail et la qualité du sol. La projection des paramètres climatiques à l'horizon 2050 s'est faite en tenant compte de scénarios empiriques (analogues sec et humide) et des données extraites du HadCM2 et du CSIRO-Tr sur la base des scénarios SRESA2.

2. Résultats

2.1. Climat futur et évolution des indices agroclimatiques à Banikoara.

Les statuts des températures mensuelles de Banikoara à l'horizon 2050 (Fig.1) ont montré une augmentation des températures minimales (0,5°C-2°C) et maximales (1,5°C-3°C) selon les scénarios. Les indices des températures minimales et maximales à l'horizon 2050 (Fig.3) ont montré que la magnitude des anomalies de température minimale moyenne sera de -2,08° à +2,5°C et celle des anomalies de température maximale moyenne sera de -1,76° à 2,12°C. Les statuts de précipitations (Fig.2) révèlent une grande fluctuation. Les pluies des mois de la saison culturale (avril-octobre) connaîtront des modifications. Les hauteurs des précipitations de la saison culturale diminueraient de 17% par rapport à la période de référence (1971-2010). Un tel contexte affectera les indices agro-climatiques dans la Commune de Banikoara. Excepté le nombre de jours intermédiaires (NJI) qui a connu une augmentation de quatre (04) jours, les autres indices agro-climatiques généraux de la Commune de Banikoara (Tab.3) se

déprécieraient à l'horizon 2050 en référence aux valeurs de la période 1971-2010. Ces réductions sont susceptibles d'impacter le développement des cultures et par conséquent les rendements agricoles.

Tableau 3. Variation des indices agro-climatiques (1971-2010 et 2050) à Banikoara

	Climat 1971-2010	Climat futur (2050)	Ecart en jours
NJS	206	199	-7
NJI	63	67	+4
NJH	126	116	-10
DSC	17 mai	11 mai	-6
FSC	19 oct	10 oct	-9
DuSC	190	173	-17

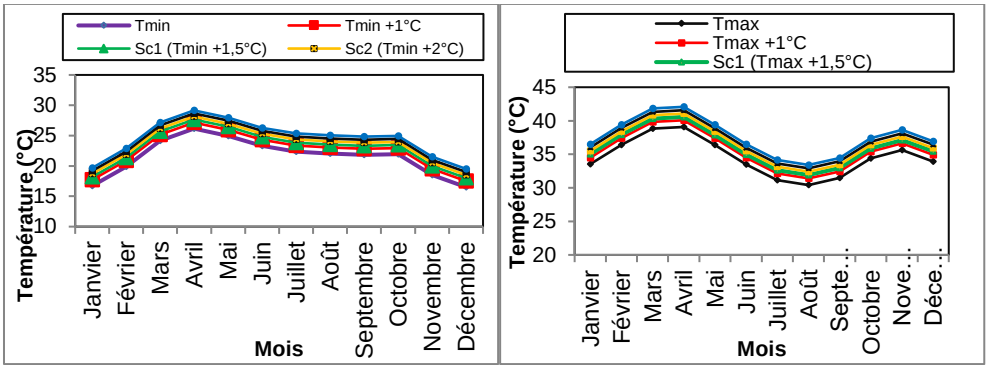


Figure 1. Evolution future des températures mensuelles dans la Commune de Banikoara à l'horizon 2050 par rapport à celles de la période 1981-2012

Tmin = Température minimale de la période de référence 1981-2012 ; **Tmax** =Température maximale de la période de référence 1981-2012 ; Sc = scénario

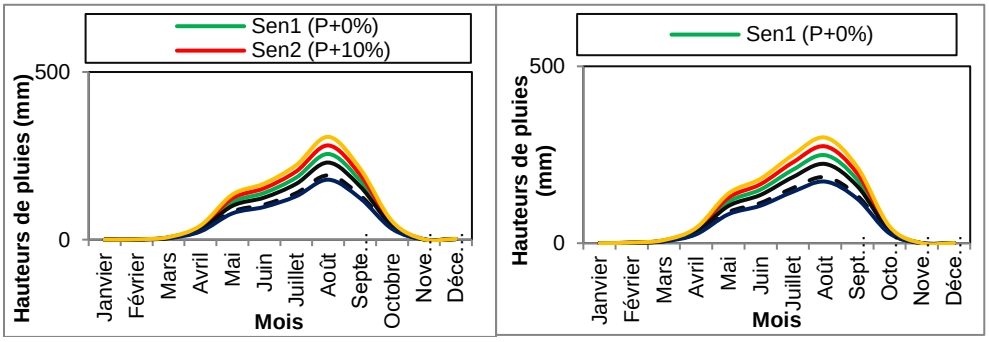


Figure 2. Scénarios pluviométriques saisonniers dans le milieu d'étude

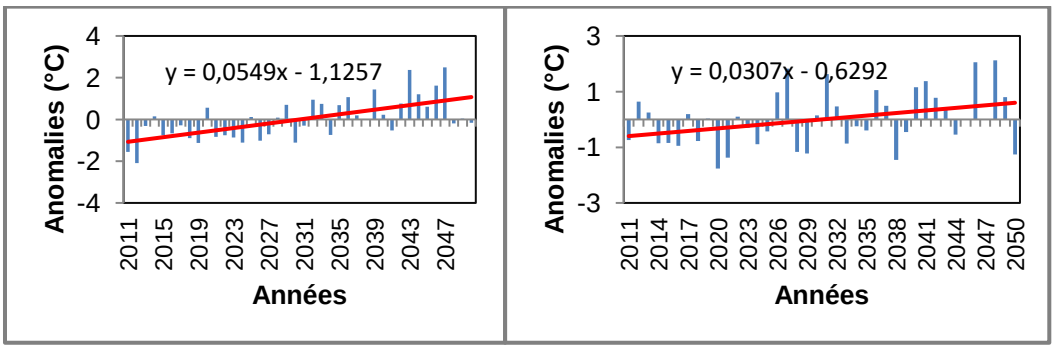


Figure 3. Indices des températures minimales (1) et maximales (2) à l'horizon 2050.

2.2. Rendements moyens simulés à l'horizon 2050 selon les scénarios climatiques les plus optimistes

Les rendements des cultures ont été très fluctuants suite aux conditions agro-climatiques futures (Tab.4) conséquemment à la variabilité des indices agro-climatiques (Fig.4).

Tableau 4. Rendements (kg/ha) des cultures en 2050 dans la Commune de Banikoara selon le scénario pédoclimatique le plus optimiste (''-10 % DuSC, +1,5°C, S3'') (Source des données : Résultats d'analyse des données)

Cultures	Rendement actuel		Rendement futur		Ecart	% de variation
	Valeur	Niveau	Valeur	Niveau		
Arachide	1159,4	Très fort	1042,15	Fort	-17,25	-1,5
Coton	1192	Fort	1029,02	Fort	-162,98	-13,7
Niébé	923,6	Très fort	864,96	Très fort	-58,64	-6,3
Manioc	6409	Faible	4696,84	Très faible	-1712,16	-26,7
Igname	8178,5	Moyen	8162,81	Moyen	-15,69	-0,2
Riz	2891,6	Très fort	2557,85	Très fort	-333,75	-11,5
Maïs	1185	Fort	1000,05	Moyen	-184,95	-15,6
Sorgho	959,6	Très fort	1048,89	Très fort	89,29	+9,3
Soja	634,2	Fort	563,5	Moyen	-70,7	-11,1

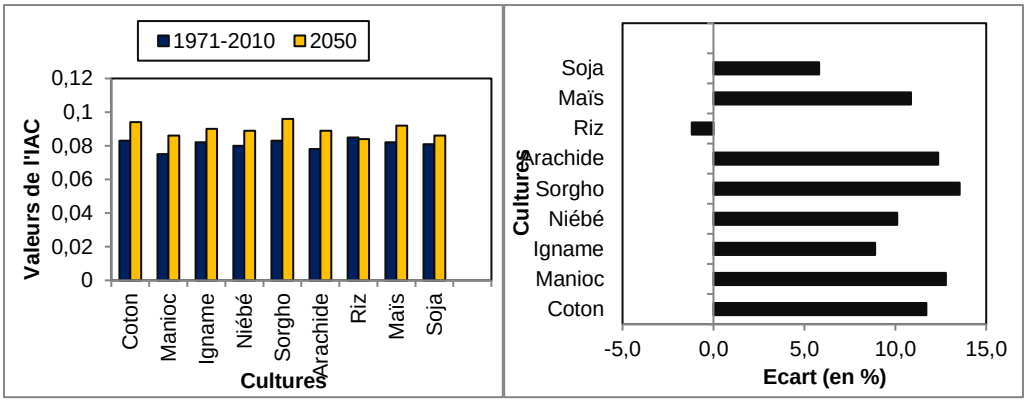


Figure 4. Indices agro-climatiques pour la période 1971-2010 et projection en 2050 et écart entre 1971-2010 et 2050 en pourcentage

Outre le sorgho qui connaîtrait une amélioration de 9,3% de son rendement, les rendements des autres cultures baisseraient systématiquement (de -26,7% pour le manioc à -0,2% pour l'igname). Toutefois, les rendements resteraient très élevés pour le niébé (923,6-864,96 kg ha-1), le sorgho (959,6- 1048,89 kg ha-1) et le riz (2891,6-2557,85 kg ha-1). L'évolution des rendements serait élevée pour l'arachide (1159,4-1042,15 kg ha-1) et le coton (1192-1029,02 kg ha-1) tandis qu'elle serait modérée pour le maïs (1185-1000,05 kg ha-1), l'igname (8178,5-8162,81 kg ha-1) et le soja (634,2-563,5 kg ha-1).

Conclusion et discussion

La présente étude a mis en exergue la variabilité climatique et ses probables conséquences sur les rendements agricoles à l'horizon 2050 dans la Commune de Banikoara au Bénin.

La hausse des températures dans le milieu devrait rester dans une certaine limite en fonction des types de plantes (cultures) pour permettre une activation des réactions physico-chimiques du métabolisme (Garau *et al.*, 2007). Trop élevée, la hausse de température engendrerait une détérioration des structures vivantes dans lesquelles s'effectuent lesdites réactions chimiques (Abou-Arab *et al.*, 2010).

Les régimes pluviométriques futurs ne connaîtront pas de modification profonde puisque le régime uni-modal sera maintenu. Les hauteurs de pluie pourraient baisser, phases sensibles de développement des cultures. Les variations des paramètres climatiques sont alors susceptibles d'agir sur les rendements et la qualité des récoltes. Le manioc est la culture dont le rendement sera le plus impacté négativement par le processus de variabilité climatique dans le milieu d'étude. Par ailleurs, les conditions agro-climatiques futures ont été identifiées pouvant être très favorables pour le sorgho avec une amélioration du rendement de l'ordre de 9,3% (diminution de 10 % avec une augmentation thermique de 1,5°C). Il apparaît nécessaire d'adapter les périodes de semis des différentes spéculations aux perturbations climatiques constatées dans la Commune de Banikoara pour garantir dans le futur la sécurité alimentaire dans la région.

Bibliographie

Abou-Arab A.E., Abou-Arab A.A. & Abu-Salem M.F., 2010. Physico-chemical assessment of natural sweeteners steviosides produced from Stevia rebaudiana Bertoni plant. *African Journal of Food Science* 4(5): 269-281.

INSAE., 2015. Que retenir des effectifs de population en 2013? Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Direction des Etudes Démographiques/Ministère du Développement, de l'Analyse Economique et de la Prospective. Bénin, 37p.

IPCC., 2011. Mitigation, Climate change. IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation.

Jones P.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J. & Ritchie J.T., 2003. DSSAT cropping System Model. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.

McCarthy M.P., Best M.J. & Betts R.A., 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters* 37: L09705. Doi: 10.1029/ 2010GL042845.

Newman T.P. 2016., Tracking the release of IPCC AR5 on Twitter: Users, comments and sources following the release of the Working Group I Summary for Policy makers. Public Understanding of Science, 0963662516628477.

Sarr B, Atta S, & Kafando L., 2012., Revue des indices climatiques utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indicielles en Afrique. *Sécheresse* 23: 255-60.

LA VITICULTURE LITTORALE ET INSULAIRE DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

THIBAULT J.[1], TISSOT C.[1], QUENOL H.[2]

1 UMR 6554 LETG Brest, Institut Universitaire Européen de la Mer, Plouzané, France (jeanne.thibault@univ-brest.fr)
2 UMR 6554 LETG Rennes, Université Rennes 2, Rennes, France

Résumé : *Plusieurs études ont abordé la question du changement climatique sur la viticulture dans de nombreuses régions viticoles dans le monde, mais peu se sont intéressées aux potentialités des vignobles insulaires et littoraux. Pourtant, au vue de leurs caractéristiques climatiques, ces vignobles pourraient constituer des zones d'adaptation particulièrement convoitées, notamment dans des régions soumises à d'importantes augmentations des températures. A partir d'une méthode comparative à l'échelle mondiale, cette contribution tend à caractériser les différentes configurations agroclimatiques et à documenter les pratiques agronomiques qui ont permis d'adapter la culture de la vigne à ces espaces particuliers.*

Mots clés : *viticulture ; insularité ; changement climatique ; adaptation ; typologie*

Summary: ***Island and coastal viticulture in the context of climate change.*** *Several studies have adressed the issue of climate change on viticulture in many wine-growing regions of the world, but only few have focused on the potential of island and coastal vineyards. However, considering their climatic characteristics, these vineyards could become coveted areas for adaptation, especially in regions subject to significant temperatures' increases. Based on a worldwide comparative method, this contribution tends to characterize the different agroclimatic characteristics and to describe the agronomic practices that have contributed to adapt vine cultivation to these particular areas.*

Key words: *viticulture; insularity; climate change; adaptation; typology*

Introduction

Selon l'Organisation Internationale de la Vigne et du vin (OIV), la notion de terroir regroupe les propriétés climatiques, pédologiques et physiologiques, ainsi que les pratiques culturales et vinicoles de l'environnement local sous lesquelles le vin est produit. Cette notion permet d'attribuer des caractéristiques distinctives aux vins originaires d'une même région. Plusieurs travaux basés sur l'adaptabilité climatique de la vigne en fonction des scénarios du changement climatique, montrent que l'on peut s'attendre à d'importants bouleversements à l'échelle de la planète. La perspective du changement climatique soulève des enjeux quant au maintien de la qualité et du style des vins à court terme, et à plus long terme, sur la durabilité économique des régions viticoles (Schultz et Jones, 2010; Quénol, 2014). Certaines régions viticoles ont déjà dépassé leur optimum thermique pour la culture de la vigne, alors que d'autres sont dans des conditions beaucoup plus favorables qu'il y a quelques décennies. Pour faire face à ces enjeux, les viticulteurs sont amenés à reconsidérer leurs pratiques, leurs stratégies de production voire de délocaliser leurs zones de production.

Les espaces viticoles insulaires et littoraux s'avèrent dans ce contexte particulièrement intéressant à étudier au regard de leurs caractéristiques climatiques spécifiques. La régulation thermique associée à l'influence océanique peut notamment permettre de limiter les extrêmes de températures, ce qui pourrait constituer un atout majeur pour des régions soumises à un réchauffement important. Afin de mieux comprendre les spécificités agro-climatiques de ces vignobles, une approche comparative entre les différentes régions insulaires a été réalisée.

1. Matériel et méthode

1.1. Données

Si plusieurs études ont observé les effets du changement climatique sur la viticulture dans de nombreuses régions viticoles, très peu se sont intéressées aux vignobles insulaires. Sur 41 151 documents répertoriés[1] comme traitant de la viticulture, vignoble ou vignes entre 1900 et 2020, seulement 309 font référence aux îles, archipels d'îles, ou à l'insularité en général. La viticulture insulaire représente donc à peine 2% des publications sur la viticulture en général. A partir des années 2000, le nombre d'étude sur la viticulture insulaire augmente, avec une moyenne de 23 références/an entre 2000 et 2019.

1.2. Méthode

Une approche bibliographique a permis de réaliser un état des lieux général et de faire ressortir différentes variables, qu'il était possible d'obtenir sur la majorité des régions viticoles insulaires mondiale. Ainsi, les caractéristiques climatiques et leurs particularités, les caractéristiques du vignoble, celles du cultivar et son système de conduite ainsi que des données économiques ont été documentées pour mieux comprendre les spécificités insulaires et établir une typologie de ces vignobles.

1.2.1. Caractéristiques climatiques

Le climat est l'une des composantes les plus importantes de la notion de terroir, et surtout la température qui joue un rôle majeur dans la détermination des caractéristiques régionales de la viticulture (van Leeuwen *et al.*, 2004; Hall et Blackman, 2019). Les facteurs météorologiques et climatiques quotidiens sont très importants en viticulture, et notamment le rayonnement solaire, l'accumulation de chaleur, les températures extrêmes, les plages de températures diurnes, le vent, les précipitations, et les évènements climatiques comme les sécheresses ou la grêle (Jones, 2006). Dans des régions soumises à des températures élevées, le gradient thermique d'altitude permet aussi de limiter les extrêmes chauds ; la température diminuant en moyenne de 0,6°C tous les 100 mètres (Le Roux, 2017; Heras-Roger *et al.*, 2018). Pour les régions littorales et insulaires, la proximité de l'océan, ou autre grande masse d'eau, joue un rôle important dans le régime climatique où l'air frais de la brise marine empêche des températures diurnes trop élevées (Bonnardot *et al.*, 2001; Fourment *et al.*, 2017), et permet aussi de limiter les extrêmes de températures (Koufos *et al.*, 2014; Koufos *et al.*, 2018).

1.2.2. Caractéristiques du vignoble

Les sols constituent un des éléments fondamentaux des terroirs viticoles car ils possèdent des propriétés différentes qui vont influencer la vigne. De ces propriétés, on peut citer la texture et la composition du sol qui influencent la porosité du sol et ses réserves en eau (Duchaufour, 1970) ou encore, la profondeur qui joue sur le développement racinaire (Deloire *et al.*, 2001; Le Roux, 2017). La notion d'espace est souvent problématique dans les espaces littoraux et insulaires (Hochedez et Leroux, 2018; Scherrer *et al.*, 2009), et la surface des vignobles permet de suivre leur variation sur un temps long. Les caractéristiques économiques tels que le nombre d'exploitations, le marché de commercialisation visé ou encore la présence d'appellations permettent de traduire un peu de l'attractivité du vignoble.

1.2.3. Caractéristiques du cépage et système de conduite

L'identité des terroirs est souvent associé à un cépage emblématique issu le plus souvent d'une sélection variétale visant à s'adapter aux contraintes locales comme la température (Van

[1]Source : SCOPUS

Leeuwen et Seguin, 2006). Dans le contexte du changement climatique, des comparaisons peuvent être faites entre des régions aux températures historiques similaires afin de sélectionner des variétés appropriées (Van Leeuwen *et al.*, 2016; Hall et Blackman, 2019). Du fait de leur caractéristiques géographiques et de conditions climatiques particulières, certaines îles ou archipels ont pu conserver des variétés anciennes et rares (Scherrer *et al.*, 2009; Gristina *et al.*, 2017).

Concernant les modes de conduite, les vignobles littoraux et insulaires conservent souvent des pratiques traditionnelles permettant de gérer le déficit hydrique sans recourir à l'irrigation (Drumonde-Neves *et al.*, 2017) ou d'atténuer les effets asséchants du vent (Madruga *et al.*, 2015; Heras-Roger *et al.*, 2018). Dans cette approche traditionnelle et généralement peu mécanisées de la viticulture, les densités de plantations et les productions sont plus faibles que pour les régions moins contraintes (Scherrer *et al.*, 2009).

2. Résultats

Au regard de ces éléments, une grille plus synthétique a été établie pour chaque région viticole. Le but est de pouvoir qualifier à l'aide d'indicateurs génériques les vignobles littoraux et insulaires. En proposant une typologie globale l'objectif est également de pouvoir comparer différentes zones viticoles sur la base d'une grille de lecture commune. Appliquée à l'archipel des Açores cette démarche permet de décrire de manière synthétique les éléments structurants de ces vignobles ultra marins. Les Açores sont un archipel composé de 9 îles, situées au Nord de l'océan Atlantique. Dans cette région, aux conditions climatiques océaniques, des cultivars de vigne autochtones et des pratiques viticoles locales se sont mis en place depuis le XVe siècle. L'île Pico est caractéristique de cette culture où le paysage côtier est dominé par des champs de lave.

2.1. Caractéristiques climatiques

Tableau 1. Caractéristiques climatiques de l'archipel des Açores

Type de climat		Climat tempéré à majorité océanique : chaud mais sans saison sèche
	Températures annuelles moyennes	18,0°C, avec une moyenne mensuelle minimale en février (10,5°C) et maximale en août (26,0°C)
	Amplitude annuelle moyenne diurne	6,0°C
	Heures d'ensoleillement annuelle moyennes	1875 h/an
	Précipitations moyennes annuelles	1000 mm
	Vents	Constant, avec une moyenne annuelle de 17 km/h : 20km/h en hiver, et autour de 10 km/h pendant la saison estivale

L'archipel des Açores est caractérisé par un climat relativement humide avec des précipitations moyennes annuelles de près de 1000 mm entre 1943 et 2012 ; environ 75% de ces précipitations sont enregistrées entre octobre et mars (Hernández *et al.*, 2016). Du fait de l'influence marine, les températures sont relativement douces et les nuits supérieures à 14°C sont très courantes (Madruga *et al.*, 2015; Bento Elias *et al.*, 2016; Drumonde-Neves *et al.*, 2017). Le vent est constant dans cette région, puisque l'archipel est située dans une zone de transition entre les masses d'air des tropiques et les masses d'air froids en provenance du Nord (Madruga *et al.*, 2015).

2.2. Caractéristiques du vignoble

Tableau 2. Caractéristiques du vignoble de l'archipel des Açores

Topologie		
	Altitude	Jusqu'à 150 mètres
	Distance à l'océan	Entre 50 et 300 mètres
	Pente	Sur les bases du volcan, sur des pentes douces de 5 à 15 degrées
Caractéristiques du sol		
	Composition	Andisol, lave basaltique noire, sol volcanique
	Porosité	Présence de théra → poreux
Caractéristiques économiques		
	Surface	926 ha en 2014
	Production en hl.	12913 hl en 2014
	Producteurs	250 producteurs
	Marché visé	Vente locale (tourisme)
	Présence appellations	1 308 hl appellation d'origine (2014) 1 118 hl IGP (2014) Vignobles de l'île Pico classé à l'UNESCO

Les vignobles açoréens sont généralement implantés dans des champs de basalte noire, lave qui possède une importante capacité d'accumulation thermique (Heras-Roger *et al.*, 2018). Cette capacité calorifique combinée au courant chaud du golfe du Mexique, permet de restituer un peu de chaleur aux plants tout en diminuant l'humidité ambiante, surtout au moment de la maturation du raisin (Madruga *et al.*, 2015; Drumonde-Neves *et al.*, 2017). De plus, le sol des Açores (Andisol) est d'origine volcanique, fertile, et dont le matériau original (*téphra*) est très poreux (Madruga *et al.*, 2015). Cette porosité du matériau permet un bon enracinement des plants. La particularité d'implantation des vignes ont permis aux vignobles de l'île Pico, d'être classées au patrimoine mondial de l'UNESCO (Madruga *et al.*, 2015; Drumonde-Neves *et al.*, 2017). Cette inscription a notamment permis un soutien financier et a suscité un regain d'intérêt des propriétaires de terres et/ou producteurs de vins, mais également pour l'économie viticole de la région (Madruga *et al.*, 2015; Biagiolo *et al.*, 2013).

2.3. Cultivars et mode de conduite

Tableau 3. Caractéristiques du cultivar et mode de conduite des vignobles de l'archipel des Açores

Cépages principaux		
	Variétés	Verdehlo, Arinto et Terrantez do Pico
	Porte greffe	Américains
	Maladies	Oïdium, mildiou, phylloxera
Mode de conduite		
	Implantation	Dans des fissures de lave basaltiques, entourés de murs de pierres volcaniques (*currais*)
	Système de conduite	Taille basse, sans treillis
	Espacement	Fonction de la topographie
	Densité	Fonction de la topographie
	Mécanisation	Non
	Irrigation	Non

Au vue des caractéristiques climatiques de l'archipel, les cépages les plus présents dans les Açores sont des cépages autochtones blancs comme le Verdhelo dos Açores, l'Arinto da Terceira et le Terrantez do Pico (Drumonde-Neves *et al.*, 2017). Les cépages rouges sont moins

répandus et correspondent à des cépages plus connus comme le Syrah, le Merlot ou le Cabernet Sauvignon (Heras-Roger *et al.,* 2018). Les ceps sont traditionnellement implantés dans des fissures de champs de lave basaltique, et entourés de murs de pierres volcaniques (*currais*). Ces murets permettent de protéger la vigne des vents et des embruns ; comme ils sont constitués de roche volcanique, les *currais* restituent aussi de la chaleur aux ceps durant la nuit (Heras-Roger *et al.,* 2018).

Conclusion et perspectives

Le descriptif des caractéristiques communes aux vignobles insulaires et littoraux est la première étape dans l'identification des critères d'adaptation de ces espaces au changement climatique. Cette grille de lecture commune permet de pouvoir comparer les différents vignobles entre eux, mais également de faire ressortir les différentes contraintes et adaptations de ces espaces et d'alimenter l'étape d'optimisation spatiale. Les différentes caractéristiques seront, par la suite, exploitées comme des indicateurs de fonction et/ou d'implantation, afin de trouver les meilleures solutions d'adaptations des vignobles littoraux et insulaire au changement climatique.

Bibliographie

Bento Elias R., Gil A., Silva L., José Maria F.P., Azevedo E. de, & Vieira Reis F., 2016. Natural Zonal Vegetation of the Azores Islands: Characterization and Potential Distribution. *Phytocoenologia,* 46, 107-123. Doi: https://doi.org/10.1127/phyto/2016/0132.

Biagiolo G., Prats M., & Bender J., 2013. Guide européen pour la protection et la mise en valeur des paysages culturels viticoles, notamment en ce qui concerne les zones viticoles menacées.

BonnardotV., Carey V.A., Planchon O., & Cautenet S., 2001. Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area. *Wynboer* 10-14: 107-13.

Deloire A., Lopez F., & Carbonneau A., 2002. Réponses de la vigne et terroir : éléments pour une méthode d'étude, *Progrès Agricole Viticole*, 4, 78-86.

Direction générale des politiques internes., 2015. L'agriculture des Açores, agriculture et développement rural [en ligne], URL: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/567667/IPOL_STU(2015)567667_FR.pdf

Drumonde-Neves Franco-Duarte J., R., Lima T., Schuller D., & Pais C., 2017. Association between Grape Yeast Communities and the Vineyard Ecosystems. *PLOS ONE.* Doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169883.

Duchaufour P. 1970. *Précis de pédologie*. Masson et cie., Paris, France, 481p.

Fourment M., Ferrer M., González-Neves G., Barbeau G., Bonnardot V., & Quénol H., 2017. Tannat Grape Composition Responses to Spatial Variability of Temperature in an Uruguay's Coastal Wine Region. *International Journal of Biometeorology,* 61, 1617-1628. Doi: https://doi.org/10.1007/s00484-017-1340-2.

Gristina A.S., De Michele R., Garfì G., La Mantia T., Fontana I., Spinelli P., Motisi A., & Carimi F., 2017. Urgent need for preservation of grapevine (Vitis vinifera L. subsp. vinifera) germplasm from small circum-Sicilian islands as revealed by SSR markers and traditional use investigations. *Genetic Resources and Crop Evolution,* 64, 1395-1415. Doi: https://doi.org/10.1007/s10722-016-0444-6.

Hall A., & Blackman J., 2019. Modelling Within-Region Spatiotemporal Variability in Grapevine Phenology with High Resolution Temperature Data. *OENO One,* 53(2). Doi: https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2450.

Heras-Roger J., Díaz C., Darias-Martín J., & Rios-Mesa D., 2018. Characterization of Red Wines from Macaronesia., In : Jordão A.M, & Cosme F. Grapes and Wines - Advances in Production, Processing, Analysis and Valorization, *IntechOpen*, 253-271. Doi: https://doi.org/10.5772/intechopen.71795.

Hernández A., Kutiel H., Trigo R. M., Valente M. A., Sigró J., Cropper T., & Espírito Santo F., 2016. New Azores Archipelago Daily Precipitation Dataset and Its Links with Large-Scale Modes of Climate Variability. *International Journal of Climatology,* 36, 4439-4454. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.4642.

Hochedez C., & Leroux B., 2018. " After Xynthia… I am not worried. The sea doesn't scare me ". From denial to adaptation: wine growers on the Island of Ré in the face of environmental change. France. *Développement durable et territoires.* Doi: https://doi.org/10.4000/developpementdurable.12392.

Jones G.. 2006. Climate and terroir: Impacts of climate variability and change on wine. *Geoscience Canada Reprint Series*.

Koufos G., Mavromatis T., Koundouras S., Fyllas N.M., & Jones G.V., 2014. Viticulture-climate relationships in Greece: The impacts of recent climate trends on harvest date variation. *International Journal of Climatology*. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.3775.

Koufos G.C., Mavromatis T., Koundouras S., & Jones G.V., 2017. Response of viticulture-related climatic indices and zoning to historical and future climate conditions in Greece. *International Journal of Climatology*. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.5320.

Le Roux R., 2017. *Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique*. Thèse, Université Rennes 2, Rennes, France. Doi: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01710012.

Madruga J., Azevedo E. B., Sampaio J. F., Fernandes F., Reis F., & Pinheiro J., 2015. Analysis and Definition of Potential New Areas for Viticulture in the Azores (Portugal). *SOIL*., 1, 515-526. Doi: https://doi.org/10.5194/soil-1-515-2015.

Quénol H.. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier Tec&Doc, 460p.

Scherrer P., Alonso A., & Sheridan L., 2009. Expanding the Destination Image: Wine Tourism in the Canary Islands. *International Journal of Tourism Research*., 11, 451-463. Doi: https://doi.org/10.1002/jtr.713.

Schultz Hans R., & Gregory V. J., 2010. Climate Induced Historic and Future Changes in Viticulture. *Journal of Wine Research*., 21, 137-145. Doi: https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530098.

Van Leeuwen C., & Destrac-Irvine A., 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. OENO One, 51(2), 147-154. https://doi.org/10.20870/o*eno-one.*2017.51.2.1647

Van Leeuwen C., Friant P., Choné X., Tregoat O., Koundouras S., & Dubourdieu D., 2004. Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55, 207-217.

Van Leeuwen C., & Seguin G., 2006. The Concept of Terroir in Viticulture. *Journal of Wine Research*., 17, 1-10. Doi: https://doi.org/10.1080/09571260600633135.

COMMENT LA RECHERCHE ENTRE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SANTE HUMAINE EN MILIEU URBAIN EST-ELLE MENEE ? RESULTATS PRELIMINAIRES D'UNE REVUE EXPLORATOIRE DE LA LITTERATURE

THOMAS M.-F.[1], BARBOSA H.P.[1], ROUE-LE GALL A.[2]

1 Université Rennes, EHESP, Inserm, Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail), UMR_S 1085, Rennes, France (marie-florence.thomas@ehesp.fr)
2 Université Rennes, EHESP, CNRS, ARENES – UMR 6051, Rennes, France

Résumé : *Le changement climatique et l'urbanisation croissante constituent des préoccupations majeures dont les effets engendrent une menace plus ou moins directe pour la santé des populations, le bien-être humain et l'accroissement des inégalités de santé à l'échelle des territoires. L'objectif de cette communication est d'analyser la dynamique temporelle et spatiale des revues de littérature publiées entre 1990 et 2019 et d'identifier les principales thématiques de recherche sur les liens entre changement climatique et santé humaine en milieu urbain. Le présent travail repose sur une démarche de revue de littérature de type scoping review. Les résultats montrent que si les études sur les effets du changement climatique sur la santé ont considérablement augmenté depuis 2004, les travaux sur d'une part, l'aménagement et l'urbanisme et d'autre part, les déterminants sociaux restent aujourd'hui plus rares.*

Mots clés : *changement climatique ; santé humaine ; urbanisation ; déterminants de santé ; revue de littérature*

Summary: ***How is research between climate change and human health in urban areas conducted? Preliminary results of an exploratory literature review.*** *Climate change and increasing urbanization are major concerns, the effects of which pose a more or less direct threat to the health of populations, human well-being and increasing health inequalities at the territorial level. The purpose of this paper is to analyze the temporal and spatial dynamics of the literature reviews published between 1990 and 2019 and to identify the main fields of research on the links between climate change and human health in urban areas. The Scoping Review methodological framework proposed by Arskey and O'Malley guides this study. The results show that while studies on the effects of climate change on health have increased considerably since 2004, research on land-use and urban planning, and social determinants of health is still scarce today.*

Key words: *climate change; human health; urbanization; determinants of health; literature review*

Introduction

Parmi les grands changements environnementaux issus des activités humaines, le changement climatique et l'urbanisation croissante sont une des préoccupations majeures dont les effets constituent une menace plus ou moins directe pour la santé des populations, le bien-être humain et l'accroissement des inégalités de santé à l'échelle des territoires (Satterthwaite *et al.*, 2007 ; Watts *et al.*, 2018). Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit dans des zones urbaines, et ce chiffre devrait passer à 68 % d'ici 2050 (United Nations, 2018). Les effets du changement climatique sont particulièrement ressentis à l'échelle locale, notamment dans les centres urbains (Grimmond, 2007). Les espaces urbains sont de plus en plus exposés à des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations et les tempêtes violentes (Wigley, 2009) qui impactent la santé des populations dans ses différentes dimensions (santé physique, bien-être et santé mentale) (Lane *et al.*, 2013), et plus spécifiquement les populations urbaines les plus défavorisées (Fagliano et Diez Roux, 2018).

L'objectif de cette communication est d'analyser la dynamique temporelle et spatiale des revues de littérature publiées entre 1990 et 2019 et d'identifier les principales thématiques de recherche sur les liens entre changement climatique et santé humaine en milieu urbain.

1. Méthodes et données

1.1. Définition d'une Scoping Review

Le présent travail repose sur une démarche de revue de littérature de type *scoping review*. Une *scoping review*, revue des concepts ou revue exploratoire en français est un outil qui permet de synthétiser des connaissances à propos d'une question de recherche exploratoire afin d'examiner la façon dont la recherche est menée, de cartographier les concepts clés, les types de données probantes ou d'identifier les lacunes dans la littérature. Elle a ainsi pour objectif d'apporter une vue d'ensemble des données disponibles à partir d'une synthèse d'articles publiés dans une thématique spécifique (Arskey et O'Malley, 2005).

1.2. Bases de données, définition des mots-clés et critères d'éligibilité

La recherche des références bibliographiques a été effectuée à partir de bases de données variée[1], en recherchant deux mots-clés *climate change* et *health* dans les titres. Elle a couvert la période de janvier 1990 à juillet 2019. La date de début de cette recherche fait référence à la publication du premier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les articles ont ensuite été sélectionnés selon la pertinence de leur titre et résumé en fonction de différents critères, tels que : 1) études sur les liens entre changement climatique et santé humaine dans les domaines des sciences politiques, sociales, de la vie et de l'environnement ; 2) articles en langue anglophone, révisés par les pairs, incluant les études de cas et le développement de modèles conceptuels ; 3) études menées en milieu urbain sans population ciblée et hors populations autochtones, insulaires ou zones polaires. Les publications antérieures à 1990 y compris les revues de littérature, communications, résumés, rapports, thèses et mémoires, etc. n'ont pas été incluses.

2. Résultats

La recherche initiale effectuée en août 2019 a conduit à 3179 citations potentiellement pertinentes. Après déduplication, 1415 citations ont été conservées dont 208 ont été identifiées comme des revues de littérature. 84 citations ont répondu aux critères d'éligibilité et ont été incluses dans notre analyse.

2.1. Evolution du nombre de revues au cours du temps

La figure 1 compare l'évolution du nombre de revues de littérature avec celle du nombre total d'articles (hors revues). Cette figure montre une augmentation des publications sur les liens de changement climatique et santé entre le premier et le cinquième rapport du GIEC. Dans ce sens, Verner *et al.* (2016) ont constaté une augmentation significative du nombre de références liées au mot *health* entre le premier et le cinquième rapport du GIEC et un nombre plus important de pages contenant le mot *health* dans l'ensemble de ces rapports.

On constate que cette augmentation s'est surtout faite à partir de 2004, ce qui peut s'expliquer par la publication de l'ouvrage de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), *Climate change and human health – Risks and response* de 2003 (McMichael *et al.*, 2003). Cet ouvrage définit les étapes nécessaires pour la poursuite des recherches scientifiques dans ce domaine et pour l'élaboration de stratégies et de politiques publiques visant à aider les populations à s'adapter au changement climatique. Le nombre total de publications des revues

[1] PUBMED (United States National Library of Medicine, Bethesda, MD, EUA) ScienceDirect (Elsevier B.V., Amsterdam, Pays Bas), Web of Science Core Collection (Thomson Reuteurs, New York, NY, EUA), GreenFILE and Information Science & Technology Abstracts (via EBSCOhost Information Services, Birmingham, AL, EUA).

de littératures sur les liens entre changement climatique et santé humaine dans le milieu urbain (Fig.1) a également augmenté pendant la période considérée dans cette étude.

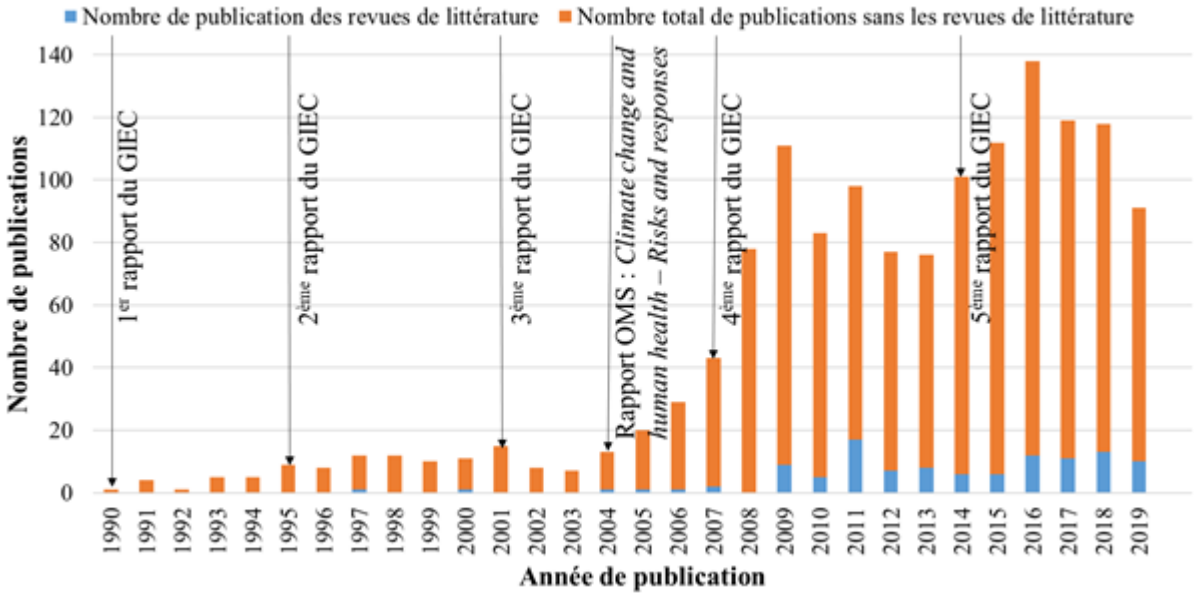


Figure 1. Nombre total de publications (1415) (rouge) et de revues de littératures (bleu) (208) sur changement climatique et santé durant la période 1990-2019.

2.2. La recherche en santé et changement climatique : origine géographique des auteurs et disciplines des journaux scientifiques

L'origine géographique des premiers auteurs dans les revues de littérature analysées (Fig.2a) montre une forte prédominance de ceux issus de l'Amérique Anglo-saxonne (Etats-Unis et Canada), l'Océanie (Australie et Nouvelle-Zélande) et l'Europe (notamment Royaume-Uni). Ainsi, dans les pays anglophones, les questions de changement climatique et santé sont étudiées de manière importante soit à l'échelle du pays mais également à l'échelle mondiale. Ces résultats peuvent s'expliquer en partie par le choix de ne retenir que les articles rédigés en anglais, ce qui écarte tous les rapports et autres productions scientifiques en langue non anglophone d'où un certain biais dans l'analyse.

Une soixantaine de journaux intègrent des travaux sur santé et changement climatique. En analysant le champ disciplinaire des journaux choisis pour la publication de ces revues de littératures (Fig.2b), on peut constater une prédominance du domaine de la santé publique.

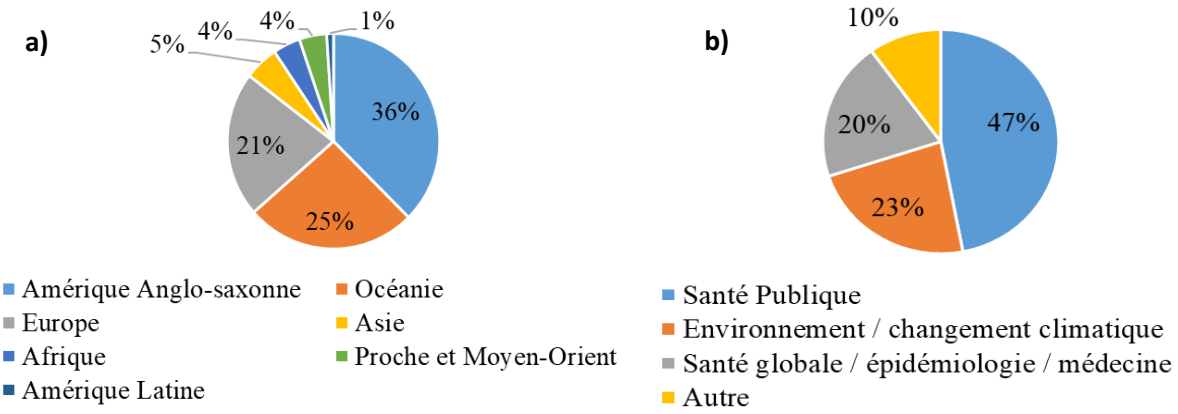


Figure 2. a) Nombre de publications total des revues de littératures (84) selon l'origine géographique des premiers auteurs. b) Répartition des revues de littérature (84) selon les champs disciplinaires.

2.3. La recherche en santé et changement climatique : les thématiques de recherche

L'analyse des différentes revues (Fig.3, Tab.1) montre que les effets du changement climatique via les déterminants environnementaux (tels que la chaleur, la pollution de l'air, la qualité et quantité d'eau, etc.) sur la santé, sont essentiellement focalisés sur les pathologies respiratoires et cardiovasculaires, les maladies mentales (liées notamment au stress lors des évènements extrêmes) et celles aggravées par les vagues de chaleur.

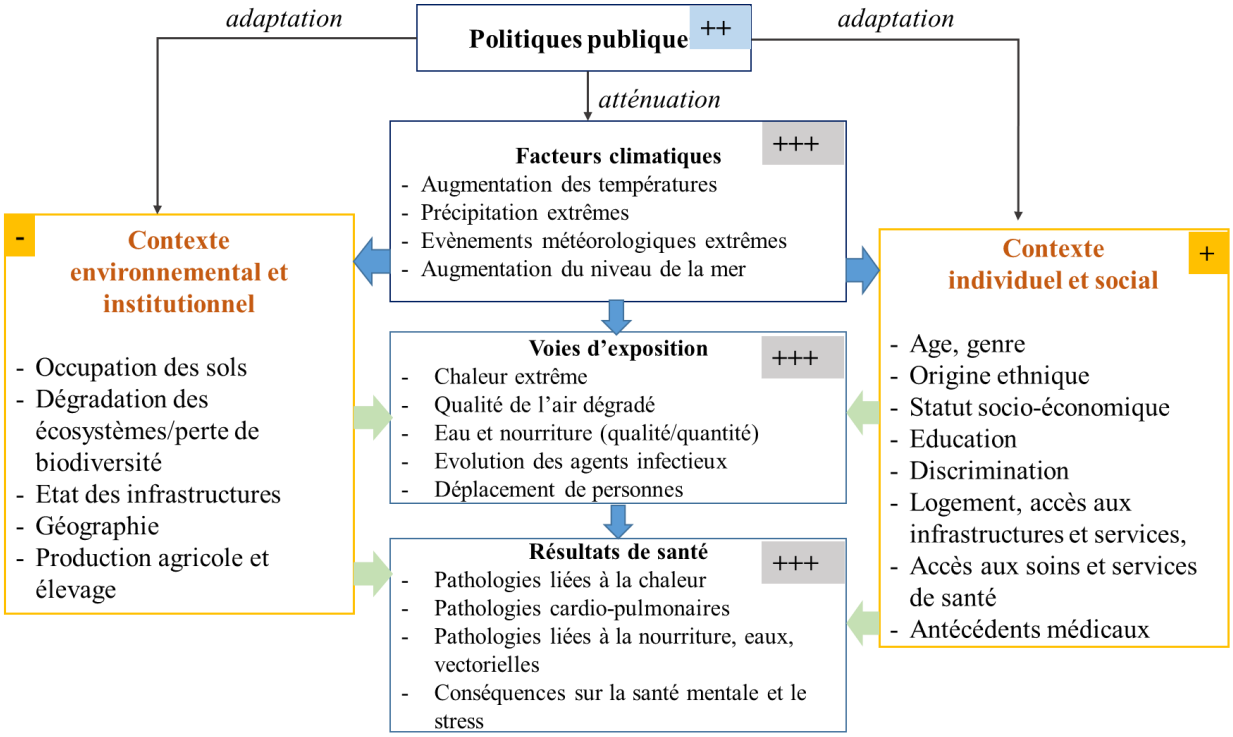


Figure 3. Schéma conceptuel illustrant les voies d'exposition par lesquelles le changement climatique affecte la santé humaine (adapté de Crimmins *et al.*, 2016) : avancement des travaux dans le domaine.

Les déterminants individuels et sociaux restent aujourd'hui peu approfondis. On note cependant une augmentation des travaux sur la question de l'accès aux soins et sur la question des environnements de travail. En revanche, les travaux de recherche sur l'aménagement du territoire, au regard de différentes déterminants environnementaux (dégradation des écosystèmes, perte de la biodiversité, agriculture, etc.) ou socio-économiques (accès à l'éducation, au logement adapté, etc.) restent très rares. Une seule revue (Rosenthal *et al.*, 2007) pose la question du lien entre environnement bâti, climat et santé, alors que plus de 50% de la population mondiale vit en ville. De la même manière, les déterminants sociaux de santé restent peu pris en compte. Si les travaux sur les politiques publiques permettent d'interroger les politiques de transport ou d'énergie (atténuation), les revues sur les politiques d'adaptation et sur l'évaluation de ces politiques ou des impacts sur la santé montrent l'importance de mettre en place des recherches interdisciplinaires et décloisonnées pour proposer des scénarios, mais également des indicateurs adaptés à différentes zones géographiques. Enfin, il s'avère important de soutenir les recherches de coopération internationale portant sur les effets du changement climatique sur la santé des populations les plus vulnérables et des habitants des pays à faible et à intermédiaire revenus (Watts *et al.*, 2018).

Tableau 1. Présentation des revues de littérature (84) analysées et classées par thématique abordée, année de publication, auteur(s) et journaux. Ces revues de littérature ne figurent pas dans la partie références.

Changement climatique et santé (généralités)		Systèmes de santé / soins primaires / médicaments		Déterminants environnementaux de santé		Déterminants sociaux de santé / inégalités sociales de santé	
				Pollution de l'air		2011-Team et Manderson	Advanced Review
1996-Lacroix	Royal College of Nursing Australia	2000-Beggs	Australian and New Zealand Journal of Public Health		Photochemical and Photobiological Sciences	2016-Brondízio et al.	Annals of Human Biology
2005-Watson et al.	Journal of Environmental Monitoring	2011-Walker et al.	Health Promotion Journal of Australia	2007-Norval et al.	Environmental Health Perspectives	2017-Paavola	Environmental Health
2009-Mills	Journal of Occupational and Environmental Medicine	2011-Mboera et al.	Tanzania Journal of Health Research	2009-Ebi et McGregor	Allergy and Asthma Proceedings	**Evaluation / indicateurs/ cadres conceptuels**	
2009-Byass	Global Health Action	2017-Curtis et al.	Environmental Health	2009-Schmier et Ebi	Asia-Pacific Journal of Public Health	2004-Kovats	Journal of the British Menopause Society
2009-Nichols et al.	Environmental Health Insights	2017-Leyva et al.	Journal of Nursing Scholarship	2011-Beggs et Bennett	Iranian Journal of nursing and midwifery research	2009-English et al.	Environmental Health Perspectives
2010-Habib et al	EcoHealth	2019-Chersich et Wright	Globalization and Health	2011-Poursafa et Kelishadi	Asia-Pacific Journal of Public Health	2009-Schulte et Chun	Journal of Occupational and Environmental Hygiene
2014-Gonzales et al.	Revista peruana de medicina experimental y salud publica	**Politiques publiques (adaptation / atténuation)**		2015-Hassan, et al.	Environmental Research Letters	2011-Myers et al.	The South Africa Medical Journal
2014-Kim et al.	Journal of Environmental Science and Health	**Décideurs politiques**		2018-Dean et Green	International Journal of Biometeorology	2011-Hambling et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health
2015-Khader et al.	Reviews on Environmental Health	2009-Ebi	Journal of Occupational and Environmental Medicine	2014-Sujaritpong et al.	**Eau**	2013-Bouzid et al.	PLoS One
2016-Herlihy et al.	The European Journal of Public Health	2011-Hutton	Globalization and Health		Environmental Sustainability	2014-Houghton et English	Journal of Environmental and Public Health
2016-Simane et al.	Ethiopian Journal of Health Development	2012-Hosking et Campbell-Lendrum	Environmental Health Perspectives	2011-Watt et Chamberlain	Journal of Water and Climate Change	2016-Berhane et al.	Ethiopian Journal of Health Development
2016-Hemono et al.	European Journal of Public Health	2015-Machalaba et al.	Annals of Global Health	2011-Beaudeau et al.	Water Quality, Exposure and Health	2017-Quam et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health
2018-Parise	The Royam Australian College of General Practitioners	**Co-bénéfices sanitaires**		2014-Khedun et al.	Journal of Nursing Scholarship	2018-Hayes et Poland	International Journal of Environmental Research and Public Health
2019-King et al.	Climatic Change	2013-Cheng et Berry	International Journal of Public Health	2017-Veenema et al.	**Rayonnement ultraviolet (UV)**	2018-Berry et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health
2019-Orimoloye et al.	Cities	2017-Shaw et al.	Journal of Transport and Health		Global Change Biology	**Sécurité alimentaire**	
2018-Butler	International Journal of Environmental Research and Public Health	2017-Erickson et Jennings	Public Health	2012-Thomas et al.	**Chaleur**	2012-Lake et al.	Environmental Health Perspectives
Résultats en santé		**Résilience**			Journal of Occupational and Environmental Medicine	2019-Cauchi et al.	Global Health Action
2010-Berry et al.	International Journal of Public Health	2019-Ardalan et al.	Human antibodies	2009-O'Neill et Ebi	International Journal of Occupational and Environmental Health	**Autres**	
2010-Kjellstrom et al.	International Journal of Public Health	**Adaptation**		2011-Kjellstrom et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health	2006-Diaz	Journal of Travel Medicine
2011-Bernstein et al.	Current Opinion in Pediatrics	2011-Huang et al.	American Journal of Prevention Medicine	2015-Yusa et al.	Geoforum	2012-McMichael et al.	Environmental Health Perspectives
2013-Takaro et al.	Expert Review of Respiratory Medicine	2012-Clarke et Berry	International Journal of Public Health	2016-Boeckmann	International Journal of Environmental Research and Public Health		
2013-De Sario et al.	European Respiratory Journal	2015-Martinez et al.	Climate	2017-Kuehn et McCormick	Climatic Change		
2014-Rahman et al.	Global Journal of Health Science	2018-Banwell et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health	2017-Oppermann et al.	La Medicina del Lavoro		
2016-Suk	Wiley interdisciplinary reviews	**Atténuation**		2018-Levi et al.	**Environnement bâti et qualité de l'air intérieur**		
2017-Giorgini et al.	Current Pharmaceutical Design	2011-Shonkoff et al.	Climatic Change	2007-Rosenthal et al.	Annals of the Academy of Medicine		
		2011-Wilson et al.	New Zealand Medical Association	2015-Fisk	Building and Environment		

Conclusion

Ce travail est une première étape permettant de comprendre comment la recherche est menée sur la santé humaine et les changements climatiques en milieu urbain. Depuis 2004, les revues de littérature dans cette thématique ont considérablement augmenté. Elles ont été réalisées principalement par d'auteurs d'institutions situées dans les pays de l'Amérique du Nord, de l'Océanie et de l'Europe. Ce travail permet également de montrer que les effets sur la santé des changements climatiques sont bien connus mais restent assez déconnectés des grands changements environnementaux associés à l'urbanisation croissante, à savoir la perte de biodiversité ou les changements d'occupation des sols. Afin de préciser ces résultats, la suite de ce travail se focalisera sur les articles de recherche (et non les revues de littérature) en examinant les méthodes, les données et les indicateurs mobilisés, les approches disciplinaires ainsi que les diverses dimensions de la santé humaine et du changement climatique impliqués dans ces recherches.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Réseau Doctoral en Santé Publique et l'Agence Régionale de Santé Bretagne (projet ALADINS) pour le financement de ces travaux de recherche.

Bibliographie

Arksey H., O'Malley L., 2005. Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8, 19–32. Doi:10.1080/1364557032000119616

Crimmins A., *et al.*, 2016. Executive Summary. *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment*. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, 24p. Doi: http://dx.doi.org/doi:10.7930/J00P0WXS

Grimmond S., 2007. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The geographical journal*, 173, 1, 83-88.

Fagliano J.A., Diez Roux A. V., 2018. Climate change, urban health, and the promotion of health equity. *PLoS Med*, 15, 7: e1002621. Doi: https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002621.

Lane K., Charles-Guzman K., Wheeler K. *et al.*, 2013. Health Effects of Coastal Storms and Flooding in Urban Areas: A Review and Vulnerability Assessment. *Journal of Environmental and Public Health*, 2013. Doi: https://doi.org/10.1155/2013/913064.

McMichael A. J., Campbell-Lendrum D.H., Corvalán C.F., *et al.*, 2003. *Climate change and human health - risks and responses*. World Health Organization, 2003, 322p. [E]. ISBN : 92 4 156248 X.

Rosenthal J. K., Sclar E. D., Kinney P. L., *et al.*, 2007. Links between the Built Environment, Climate and Population Health: Interdisciplinary Environmental Change Research in New York City. *Annals Academy of Medicine*, 36, 10, 834-846.

Satterthwaite D., *et al.*, 2007. Adapting to climate change in urban areas: the possibilities and constraints in low and middle income nations. *Human Settlements Working Paper Series Climate Change and Cities*, No. 1. IIED, London.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division., 2018. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* (ST/ESA/SER.A/420). New York, USA: United Nations 2019. URL: https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf

Verner G., Schütte S., Knop J., *et al.*, 2016. Health in climate change research from 1990 to 2014: positive trend, but still underperforming. *Global Health Action*, 9.

Watts N., Amann M., Arnell N., *et al.*, 2018. The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: shaping the health of nations for centuries to come. *The Lancet*, 392:2479–514. Doi:10.1016/S0140-6736(18)32594-7

Wigley T.M.L., 2009. The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events. *Climatic Change*, 97, 67. Doi: https://doi.org/10.1007/s10584-009-9654-7

EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS HUMAINES SUR LES PALMIERS ENDEMIQUES MALGACHES : CAS DE *TAHINA SPECTABILIS*

TOMBOANONA S.[1], TSIAVAHANANAHARY T.J.[1], RAMIANDRISOA B.A.[1], RANDRIAMIFIDON R.F.A.[2], RANARIJAONA H.[1]

1 Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels, Université de Mahajanga, Mahajanga, Madagascar (tomboanona@gmail.com)
2 Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Ambositra, Madagascar

Résumé : *Le changement climatique est un défi à surmonter dans l'ensemble du globe notamment à Madagascar. Le climat est un facteur régulateur de la dynamique de la ressource naturelle dans les zones tropicales et tempérées. La présente étude se focalise sur l'espèce Tahina spectabilis qui se trouve à Antsahanifera, Analalava dans le Nord-Ouest de Madagascar. L'objectif est de connaitre la situation actuelle de Tahina spectabilis face au changement climatique et aux nombreuses pressions humaines. Des relevés écologiques et enquêtes ethnobotaniques ont été effectués auprès de la population constituée de 28 hommes et 12 femmes. Des analyses statistiques ont également effectuées. Au total, 511 individus ont été recensées dont 25 (soit 4,89%) représentent les individus adultes,4 (soit 0,71%) sont les individus semenciers et 87 (soit 17,02%) des individus jeunes et 395 (soit 77,29%) sont des plantules. La population locale perçoit la hausse de température et une rareté de pluviométrie ainsi que l'intensité des pressions anthropiques notamment sur son habitat naturel. Des recommandations ont été avancées pour conserver et sauvegarder l'espèce et l'ensemble de la flore ainsi que pour l'atténuation du climat par l'application du programme REDD++.*
Mots clés : *palmiers ; Tahinaspectabilis ; changement climatique ; Analalava ; Madagascar*

Summary: ***Effects of climate change and human pressures on Malagasy endemic palms: case of*** **Tahina spectabilis.** *Climate change is a challenge is the most challenge in the world especially in Madagascar. The climate is one of the factors witch regulate the dynamic of the natural resources in the tropical and temperate zones. The present study focused in the Tahina spectabilis species. This species is found in Antsahanifera, Analalava in the north-western of Madagascar. The objective is to know the actual situation of population of Tahina spectabilis face climate change and in the many human pressures. Ecological surveys and ethnobotanical investigations were carried out on local population, constituted of 28 men and 12 women. Statistical analysis was also performed. In total of 511 individuals were recorded which 25 (4,89% represents the adults,4 (0.71%) are seeding, 87 (17.02%) are juvenile and 395 (or 77.29%) are the plants seedlings. The local population perceives the high temperature and the rarity of the rain, and the intensity of anthropogenic pressures such as their habitat. Recommendations were advanced for the conservation and safeguard of the species and the belong of the flour and the attenuation of the climate through the application of the REDD++ program.*

Key words: *palmtrees; Tahinaspectabilis; climate change; Analalava; Madagascar*

Introduction

Madagascar est un pays riche en biodiversité. Il possède une grande diversité floristique et faunistique importante avec un taux d'endémisme très élevé (Myers *et al*., 2000). Les travaux de Dransfield (2012) et Gardiner *et al.* (2017) mentionnent la diversité biologique et surtout les palmiers à Madagascar. De plus, les palmiers, plantes emblématiques, omniprésentes sur l'île et à croissance souvent rapideà Madagascar, se présentent comme le symbole par excellence des régions tropicales. La plupart des espèces de palmiers sont utilisées dans les domaines de la construction, ornementale, de l'artisanat, de la médecine et contribue ainsi au développement de l'économie locale et régionale.

Les changements climatiques ont induit une augmentation de la température globale moyenne de la surface de la terre. Les effets du changement climatique à Madagascar sont multiples, notamment sur la biodiversité et touchent aussi bien les écosystèmes que les espèces. D'après WWF (2018), avec une augmentation de température de 2°C et une capacité de dispersion adéquate, les plantes ont un risque d'extinction plus élevé. Dans la partie Nord-Ouest de Madagascar, *Tahina spectabilis* est une espèce de palmier qui a été découverte en 2006

(district d'Analalava). Ce genre *Tahina* signifie « qu'on aide » ou « qu'on secourt » si l'on traduit littéralement en langue malgache.*Tahina spectabilis* compte seulement 30 palmiers adultes dans la nature (UICN, 2012) et est classée menacée d'extinction, cela est dû surtout à des changements climatiques, feux de brousse, la conversion de son écosystème en terrain agricole, entraînant une fragmentation de l'écosystème naturel, mais aussi à cause de la biologie de *Tahina spectabilis* qui ne fleurit qu'au bout de 50 à 100 ans ; en effet, c'est une plante monocarpique, c'est-à-dire qui ne fleurit et ne fructifie qu'une seule fois avant de mourir. Une étude préliminaire, suivie de l'inventaire écologique et de la régénération de *Tahina spectabilis* a été faite en 2014 par Tomboanona dans son habitat naturel à Antsahanifera (District d'Analalava). La présente étude permettra de connaitre la situation actuelle des palmiers face au changement climatique dans leur habitat naturel, ainsi que l'influence du changement climatique sur cette espèce en évaluant son taux de survie.

1. Données et Méthodes

1.1. Sites d'étude

Cette étude a été effectuée au sein des sites naturels d'Antsingilava, fokontany Antsahanifera, District d'Analalava au NW de Madagascar. Il se situe entre 14°45.03-14°45' de latitude Sud et 47°25.89- 47°25.93 de longitude Est, s'étend sur une superficie de 3991 ha. Cette zone est délimitée à l'ouest par la baie de Narinda, au nord par la baie de Moramba et à l'Est par le canal de Mozambique (Fig.1). Ce site se trouve dans la zone périphérique de la société VERAMA (Société Vergers d'Anacarde de Masiloka), à 45km d'Analalava (à vol d'oiseau) vers l'Ouest, à 60 km d'Antonibe par la route et 40 km (Dransfield *et al*, 2008). Il s'agit d'une forêt à savane fragmentée munie de petits tsingy, sortes d'éperons calcaires d'origine karstique. Le site est géré par les Communautés locales de Base appelées « Vitazara ».

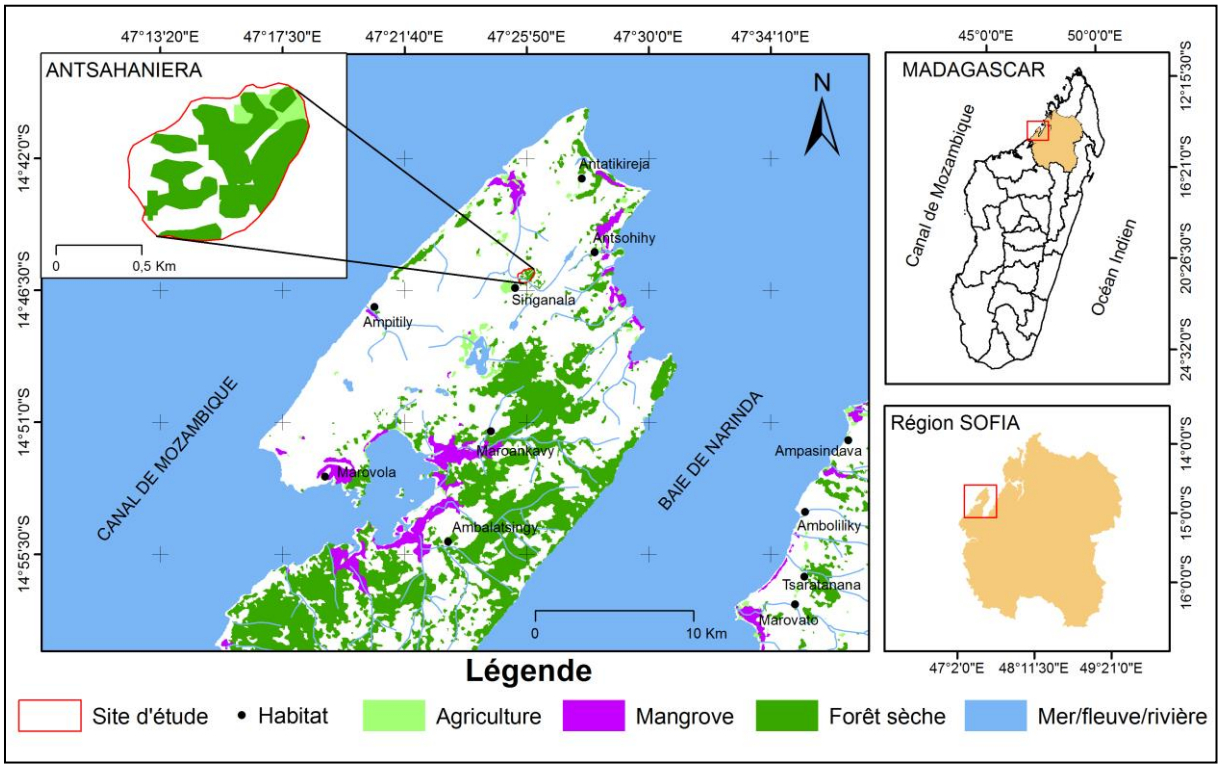


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (Tsiavahananahary, 2020)

1.2. Méthodes

Un entretien auprès de la population locale constitué des pêcheurs, agriculteurs, les comités de Base ont été déployés pour le recueil des données nécessaires pour cette étude. Les techniques de transects de Duvigneaud (1946) et de placeaux de Braun-Blanquet (1965) ont été utilisés afin de relever les différentes espèces de palmiers et aussi les espèces associées.

Des enquêtes se sont déroulées pendant trois mois (du mois d'août au mois de novembre 2019) auprès de 40 personnes dans le village d'Antsahanifera dont 28hommes et 12 femmes. La collecte des données a été faite à partir des questionnaires individuels, des guides d'entretien, des interviews semi structurés. Les questionnaires interrogent la perception de la population locale sur le changement climatique.

Des données climatiques mensuelles de température et de précipitation de la zone d'Antsahanifera sur la période 1970à 2020 ont été collectées. Elles proviennent du GHCN et de WMO (http://cip.csag.uct.ac.za/webclient2/datasets/africa-merged-cmip5). Ces données ont été analysées sous logiciel MS Excel et R en les soumettant à l'analyse de régression linéaire pour faire apparaitre la tendance de la variation climatique et de prévoir le changement à venir pour une meilleure solution d'adaptations et de résiliences à ce changement, et aussi pour montrer l'évolution pluri décennale de la température de l'air et des précipitations dans la zone d'étude.

1.3. Données des suivis écologiques

Trois espèces de palmiers (*Tahina spectabilis, Bismarckia nobilis, Hyphaene coriaceae*) et 52 espèces végétales ont été recensées dans la formation karstique d'Antsingilava, Antsahanifera. Au total, 511 pieds de *Tahinaspectabilis*ont été recensés dans leur habitat naturel. Parmi ces 511 individus, 25 sont des adultes soit 4,89%, 4 sont des semenciers soit 0,71%, 87 sont des jeunes individus soit 17,02 % et 395 individus sont des plantules soit 77,29%. Parmi ces 4 semenciers, l'un fructifie et donne presque 28 kg de graines (16900 graines) en janvier 2020.Par rapport à l'année 2013, un semencier produit 67 kg de graines. Dans l'ensemble des relevés effectués,33 familles comprenant 43 genres et 45 espèces de plantes vasculaires ont été rencontrées. 45 espèces ont été présentes dans le site Analalava dont la famille d'APOCYNACEAE, MORACEAE, EUPHORBIACEAE et ARECACEAE sont les plus fréquentes.

2. Résultats

2.1. Perceptions et représentations des données ethnoécologiques

Le résultat de l'enquête montre d'une part, que la majorité de la population d'Antsahanifera (90%) est consciente des perturbations climatiques et de ses effets et que seuls 10% ont constaté une stabilité (Fig.2). D'autre part, la perception de la baisse de précipitation est également frappante (88%) (dû au microclimat). Les activités générées par l'homme contribuent également à la perturbation de la population des palmiers notamment les feux de brousses, exploitation non rationnelle de la ressource (palmier).

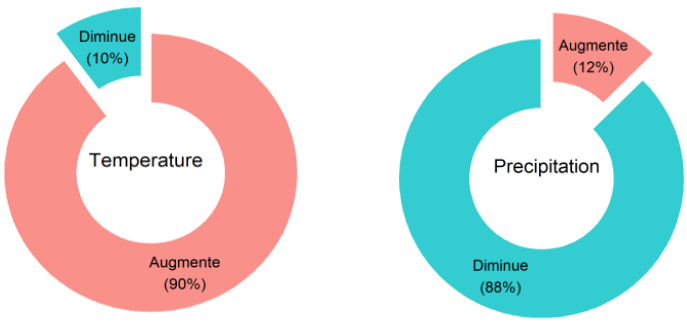


Figure 2. Part des Perceptions paysannes à Antsahanifera des changements de température (à gauche) et de précipitation (à droite).

2.2. Effets de la variabilité du climat à Antsahanifera sur les palmiers

Dans la station Antsahanifera, le climat moyen annuel a changé durant ces 5 dernières décennies (1970-2020) de façon non uniforme (Fig.3).

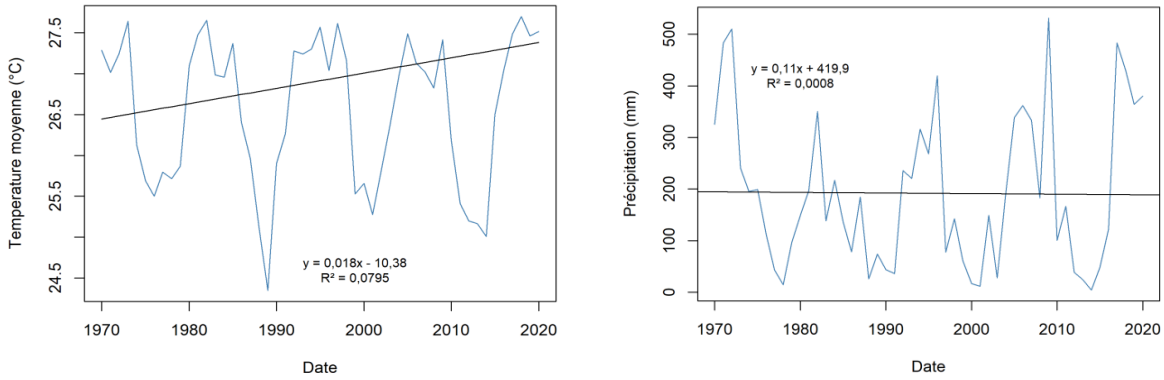


Figure 3. Variabilité pluriannuelle de la température de l'air (à gauche) et de la pluviométrie (à droite) dans la station Antsahanifera de 1970 à 2020. (Données source GHCN et OMM)

La température de l'air a augmenté sur cette période de 5 décennies (1970-2020), soit une augmentation moyenne de près de 1°C, plus précisément, 0,9°C en 50 ans. La droite de régression indique une pente positive dela température en fonction de la date (y = 0,018x – 10,38 ; R^2 = 7,95%).

Les précipitations totales annuelles ont peu évoluéen moyenne. La droite de régression des est stable (y = 0,11x + 419,9 ; R^2 = 0,08%) et ne montre pas de tendance sur la période étudiée. Cependant, la variabilité pluviométrique interannuelle est forte, la quantité de pluie variant de 500 mm à 50 mm selon les années. La saison des pluies estivale est courte (30 jours) ce qui explique ces pics séquentiels et l'allure concave de la courbe des précipitations. De plus, on constate un raccourcissement de la saison des pluies de 30 jours. Ce phénomène est marqué par le retard de la tombée des premières pluies et l'arrêt précoce de la saison pluvieuse.

Conclusions et discussion

Les palmiers sont essentiels aux communautés humaines des zones rurales qui en dépendent pour leur subsistance quotidienne. Les populations rurales les utilisent également pour leurs propriétés médicinales, par exemple pour soulager la toux ou les problèmes digestifs. Mais ces multiples usages sont souvent fatals aux arbres, car extraire le cœur des palmiers les fait périr (Gardiner *et al.*, 2017). Depuis la reconnaissance de ce palmier, la floraison de *Tahina spectabilis* vaut de l'or pour la population villageoise d'Antsahanifera. Mais cette récolte de graines n'est cependant pas toujours conduite de façon durable. Aujourd'hui, la majorité des

espèces de palmiers malgaches sont vendues à l'international et la majorité de leurs graines sont prélevées dans la nature (Gardiner *et al*., 2017). La population d'Antsahanifera exploite toute la partie des palmiers, pour le cas de *Tahina spectabilis* la population exploite les graines pour pouvoir vendre au gens de l'extérieur de la zone. La production des graines est moins fructueuse pour l'année 2020 par rapport à l'année 2013 respectivement 28kg et 67kg. Par rapport à l'étude faite en 2017 par Tomboanona, le nombre d'individus de *Tahina spectabilis* augmente, surtout les jeunes plantes ainsi que les plantules.

La température élevée a une influence sur l'assèchement rapide de l'air et cela entraine la disparition de quelques individus de *Tahina spectabilis* surtout dans son habitat naturel. Pour la phénologie, la période de floraison du *Tahina spectabilis se* manifeste au mois d'août et les graines se produisent de décembre à janvier.Les menaces viennent surtout des feux de brousse et de l'exploitation irrationnelle et, à part sa biologie, elle ne fleurit qu'au bout de 50 ans à 100 ans (Rakotoarinivo, 2008). De plus, c'est une plante monocarpique, c'est-à-dire qu'elle meurt après la floraison, d'où le nom commun « suicide palm » ou « palmier suicidaire ».

Par ailleurs, la population locale perçoit surtout l'augmentation de la chaleur vers la fin de la saison sèche et le début de la saison pluvieuse. D'après les villageois du district d'Antsahanifera, la hausse de température, ainsi que les inondations provoquées par une forte précipitation ont causé la disparition des individus de l'espèce *Tahina spectabilis*. La zone d'étude Antsahanifera est marquée par une variabilité importante de la pluviométrie, sans tendance cependant, et une tendance à la hausse dela température de près de 1°C en 50 ans.

Afin de rendre le « palmier » plus agréable ou plus attractif et pour limiter les impacts du changement climatique sur la biodiversité malgache, nous suggérons : 1/ de reboiser et restaurer des zones dégradées surtout après le passage du feu et l'étendre à tous le jardin ou dans le parc ; 2/ de collecter des graines des palmiers pour conserver le spécimen ; 3/ de valoriser et prioriser les espèces les plus menacées dans la lutte contre les effets néfastes du changement climatique.

Bibliographie

Braun Blanquet J., 1965. *Plant sociology. The study of plant communities.* Hafner publishing company - New York and London, 439p.

Duvigneaud P., 1984. *L'écosystème forêt. E.N.G.R.E.F.* Nancy, 159p.

Dransfield J., & Metz X., *et al*., 2008. Madagascar. *Botanical Journal of the Linnean Society,* 156, 79-91.

Dransfield J. & Rakotoarinivo M., 2012. The Palms of Tsitongambarika, Southeast Madagascar. *PALMS*, 56(4): 161-179.

Gardiner L.M, Rakotoarinivo M., Rajaovelona L.R., & Clubbe C., 2017. Population genetics data help to guide the conservation of palm species with small population sizes and fragmented habitats in Madagascar. *PeerJ* 5:e3248. Doi: 10.7717/peerj.3248 ; URL : https://peerj.com/articles/3248.pdf

Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., Kent J., 2000. Biodiversity hot spots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858. Doi: 10.1038/35002501.

Rakotoarinivo M., 2008. *Analyse de la distribution et de la conservation des palmiers (ARECACEAE) de Madagascar par l'utilisation du système d'information géographique*. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, Madagascar, 289p.

Tomboanona S., 2017. *Ethnopalmes de Madagascar, écologie et régénération : cas des savanes Analalava, Antrema et Antsanitia*. Thèse doctorat, Université de Mahajanga, Madagascar, 171p.

UICN., 2012. *The IUCN Red List of Threatened Species. Madagascar's palms near extinction.* URL: *www.iucnredlist.org*

WWF., 2018. *La vie sauvage dans un monde en réchauffement.* Rapport international, 1p. URL : https://www.cocolodgemajunga-madagascar.com/wwf-la-vie-sauvage-dans-un-monde-en-rechauffement/

FIABILITE DES PREVISIONS METEOROLOGIQUES DANS LE DOMAINE DU CLIMAT SUBSOUDANIEN AU NORD-BENIN

TOTIN VODOUNON S.H.[1,2], ALAO CHABI CHAFFA A.R.[1], AMOUSSOU E.[1,2], HOUNDENOU C.[2]

1 Laboratoire de Climatologie et d'Ethnoclimatologie Tropicale, Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Parakou, Bénin (sourouhenri@yahoo.fr ; rodriguealaoch11@gmail.com)
2 Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Cotonou, Université d'Abomey-Calavi, Bénin (ajernest@yahoo.fr ; constant500@yahoo.fr)

Résumé : *Cette étude porte sur la fiabilité des prévisions météorologiques dans le domaine du climat subsoudanien à la station synoptique de Parakou au Nord-Bénin. Les données journalières de prévisions et d'observations des températures et des précipitations de l'année 2017 ont été corrélées. Les biais et erreurs sont calculés pour apprécier la fiabilité des prévisions du modèle ARPEGE. La corrélation linéaire entre la prévision et les observations est de 0,69 avec un biais moyen de 0,4°C et des erreurs maximales de +4,5°C et -5°C pour les températures minimales et de 0,92 avec un biais de 0,8°C et des erreurs maximales de +5,0°C et -3,2°C pour les températures maximales. Les prévisions de températures sont moins fiables pendant la saison pluvieuse (mai à octobre). Par ailleurs, le coefficient de corrélation est de 0,76 entre l'intensité des pluies et la probabilité de précipitation. Pour les nombres de jours de pluie annoncé et ceux réalisés, elle est de 0,98. Le biais est notamment nul en pleine saison pluvieuse (juin à septembre) pour les événements pluviométriques.*

Mots clés : *Bénin ; climat soudanien ; prévision de temps ; Modèle ARPEGE ; erreur de prévision*

Summary: ***Weather forecast and reliability on the subsoudanian climate domain in northern Benin.*** *This study concerns the reliability of weather forecasts in the sub-Sudanian climate zone at the synoptic station of Parakou in North Benin. Daily forecast and observation temperature and precipitation for the year 2017 were correlated. Forecast errors are computed to assess reliability of ARPEGE model forecasts. Linear correlation between forecast and observations is 0.69 with a mean bias of 0.4°C and maximum error of +4.5°C and -5°C for minimum temperatures and 0.92 with a bias of 0.8°C and maximum error of +5.0°C and -3.2° C for maximum temperatures. Temperature forecasts are less reliable during the rainy season (May to October). In addition, correlation coefficient is 0.76 between rains intensity and probability of precipitation. The number of rainy days forecasted and realized is correlated at 0.98. Bias is notably zero during the rainy season (June to September) for rainfall events.*

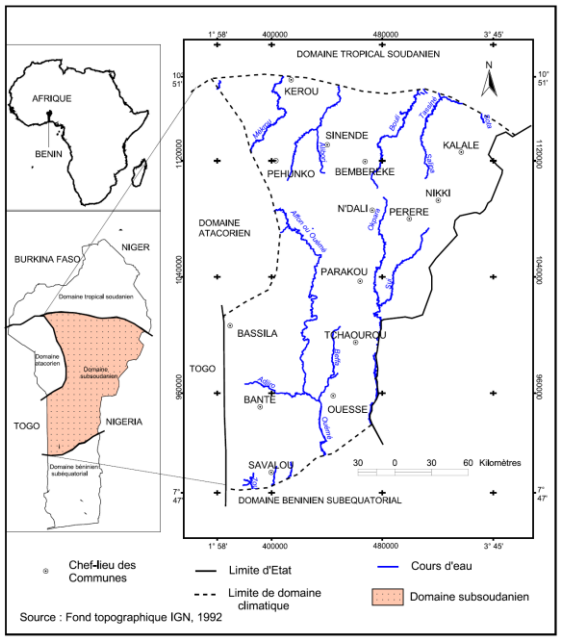
Key words: *Benin; Sudanian climate; weather forecast; ARPEGE model; forecast error*

Introduction

L'Afrique de l'Ouest est actuellement marquée par une incertitude des événements climatiques. Ainsi, la prévision est devenue un défi numérique majeur (Bocquet, 2014) pour la vie humaine au regard de la fréquence de plus en plus élevée des événements climatiques extrêmes. Des prévisions météorologiques, des analyses et des prévisions climatologiques à la fois exactes et diffusées en temps voulu permettront d'améliorer davantage la sécurité des personnes, la prospérité et les moyens de subsistance et de protéger les précieuses ressources naturelles pour le bien des communautés, notamment les plus vulnérables (OMM, 2012).

Si la prévision du temps s'est concrétisée dans le développement de l'art du prévisionniste à interpréter les cartes et à les extrapoler dans l'espace et le temps (Bocquet, 2014), faudrait-il aussi que l'ambiance climatique prévue se réalise parfaitement ou presque. Cette exactitude des conditions climatiques simulées dépend de l'erreur de prévision. L'étude des erreurs de prévisions permet d'évaluer leur qualité. Pour évaluer la fiabilité des prévisions, les données d'observations au niveau des stations synoptiques sont utilisées. La prévision du temps (Rochas et Javelle, 1993 ; Zhang et Hanby, 2007 ; Bocquet, 2014) est faite au Bénin par les services météorologiques nationaux. L'article se focalise sur la station synoptique de Parakou, représentative du domaine du climat subsoudanien tropical humide. Dans ce domaine à régime pluviométrique unimodal où les pluies de début de saison sont essentiellement dues à la thermoconvection locale et celles du cœur de la saison sont liées à la dynamique de la haute et

de la basse troposphère (Houndénou, 1999), la prévision du temps présente un intérêt pour mieux mener les activités socioéconomiques dans le temps et l'espace.



Le domaine du climat tropical humide (Fig.1) est situé dans la partie septentrionale du Bénin entre les domaines du climat tropical soudanien au Nord, du climat soudanien ''atacorien'' (atacorien en référence à l'influence orographique de la chaîne de montagne de l'Atacora dans le nord-ouest du Bénin) à l'Ouest et du climat guinéen subéquatorial au Sud. Ce type de climat est caractérisé par l'alternance d'une saison pluvieuse (mai à octobre) et d'une saison sèche (novembre à avril) (Boko, 1988 ; Houndénou, 1999), mais se distingue par son trait plus aride lié à l'influence de la continentalité. Cette structure tranchée des saisons influe dans une certaine mesure sur la fiabilité des prévisions météorologiques.

Figure 1. Localisation géographique du domaine climatique subsoudanien du Bénin

L'objectif de ce travail est d'évaluer la qualité de la prévision des températures minimales, maximales et des probabilités de précipitations dans le domaine du climat subsoudanien et au niveau de la station synoptique de Parakou (09°21' Nord ; 002°36' Est).

1. Données et Méthodes

1.1. Données

Les données journalières de prévision et d'observation des températures minimales, maximales et de la probabilité de pluie ont été utilisées. Il s'agit des données simulées par le modèle de prévision ARPEGE (sommairement présenté plus bas) et observées sur le terrain à la station synoptique de Parakou sur l'année 2017.

1.2. Méthodes

Pour mettre en évidence la fiabilité des prévisions météorologiques (Wilks, 1995), une relation graphique a été établie entre les données journalières de températures prévues et observées toute l'année 2017 et la corrélation linéaire de Bravais-Pearson (r) a été calculée. De fait, la part non-corrélée est égale 100 – r². En ce qui concerne le paramètre précipitation, les hauteurs de pluie simulées ne sont pas disponibles. Pour ce faire, les probabilités de précipitation (Susan *et al*., 2009) prévues et les hauteurs de pluie observées sont comparées, en se focalisant sur la période pluvieuse (avril à septembre). De plus, les nombres de jours de pluie prévus et observés ont été comparés à l'échelle mensuelle. En saison sèche, la probabilité de précipitation et les précipitations sont nulles étant donné que cette période est marquée, selon Houndénou (1999), par une sécheresse absolue.

Une mesure grossière de la fiabilité est le biais moyen (WHO, 2000) ou encore l'erreur moyenne de prévision météorologique (Mailier *et al*., 2006 ; Bouttier, 2014). Sa formule est :

$Biais = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(f_i - o_i)$, avec N prévisions f_i et observations correspondantes o_i pour $i = 1 \ldots N$.

La qualité de la prévision (Theis *et al*., 2005) météorologique est aussi appréciée à l'aide de l'erreur absolue moyenne : $MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(|f_i - o_i|)$ et de l'erreur quadratique moyenne : $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(f_i - o_i)^2}$ (OMM, 2010 ; WMO, 2000) qui évaluent leur précision globale (Mailier *et al*., 2006).

2. Résultats et discussion

2.1. Prévision du temps au Bénin

A la Météo-Bénin, les prévisions météorologiques sont élaborées suivant les quatre étapes fondamentales comme évoquées par Météo France (2015) : l'observation, l'assimilation des données observées pour obtenir une représentation du temps qu'il fait, la simulation de l'évolution de l'atmosphère au moyen de modèles numériques et l'analyse des résultats par les prévisionnistes.

Les données d'observation à la station de Parakou sont entre autres les précipitations et les températures mesurées en surface comme en altitude. Ces mesures sont effectuées chaque trois heures (3h) TU (00h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h), soit un total de huit mesures par jour. Pour la prévision opérationnelle du temps, le modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est utilisé. Il est caractérisé par une résolution horizontale de 7,5 à 36 km, un domaine de simulation global, 5 prévisions par jour, 60 à 114 heures d'échéances maximales et 1 comme nombre de membres (Stein *et al*., 2015). Les mêmes échéances sont retenues pour les résultats présentés au regard de l'affiliation des services météorologiques nationaux du Bénin à Météo-France.

Les variables pronostiques qui intéressent cette étude sont les températures minimales, maximales et les probabilités de précipitations. Les résultats des simulations provenant des modèles nécessitent enfin l'expertise des prévisionnistes pour l'analyse des résultats complexes et leur traduction en informations concrètes. Ils choisissent parmi les différents scénarii celui qui apparaît comme le plus probable et le déclinent en « produits de prévision » adaptés aux utilisateurs.

2.2. Vérification de la fiabilité des prévisions de températures et de précipitations

2.2.1. Corrélation entre températures minimales et maximales prévues et observées

Les figures 2 et 3 montrent la relation et la corrélation entre les données de prévision et d'observation de température minimale et maximale.

Les moyennes annuelles sont de 22,6°C en prévision et de 22,2°C en observation pour les minima et respectivement de 34,0°C et de 33,2°C pour les maxima. Cela montre une légère surestimation des températures prévues par rapport aux observations. Les coefficients de corrélation entre températures prévues et observées sont de 0,69 pour les températures minimales et de 0,92 pour les températures maximales.

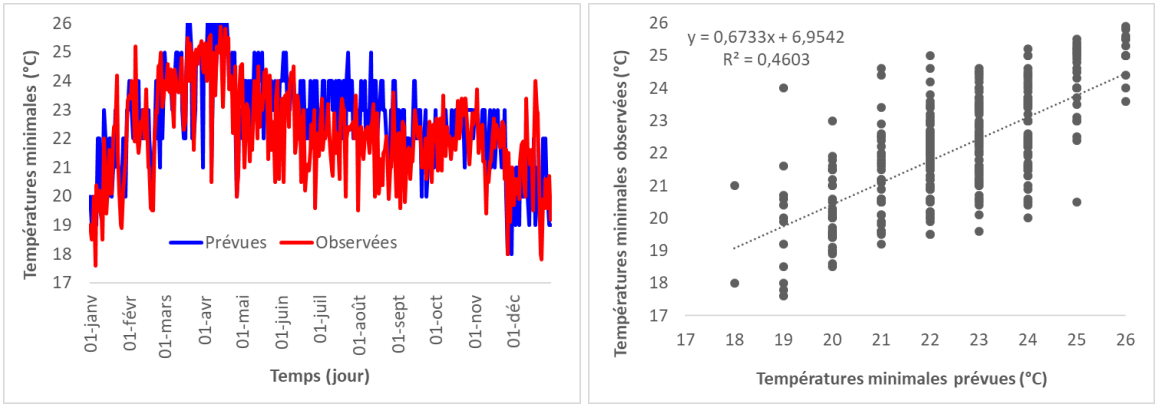


Figure 2. Corrélation entre les températures minimales prévues et observées à la station de Parakou en 2017

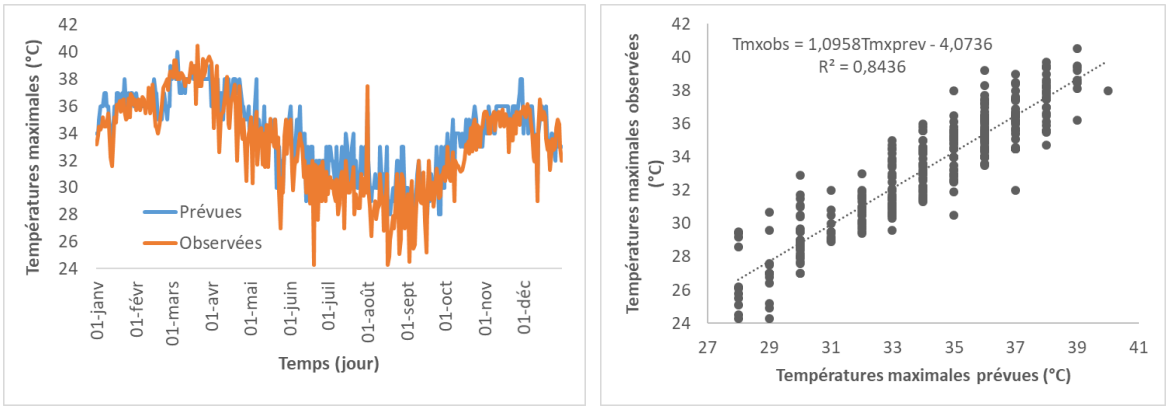


Figure 3. Corrélation entre les températures maximales prévues et observées à la station de Parakou

La part de variance non-corrélée (100 – r^2) est plus élevée pour les températures minimales (52 %) que pour les températures maximales (15 %). Les erreurs de prévision pour ces températures sont illustrées par la figure 4.

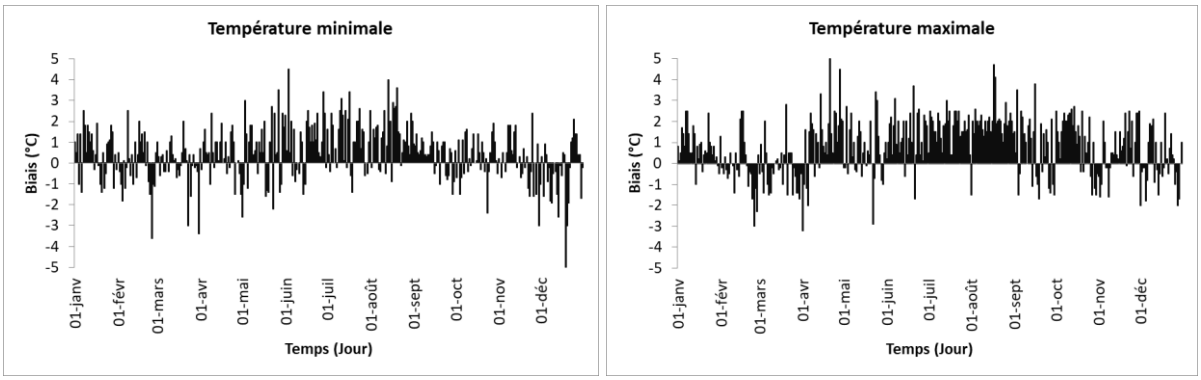


Figure 4. Biais de températures minimales et maximales prévues versus observées à la station de Parakou

Le tableau 1 présente les indices de fiabilité et de précision des prévisions de températures.

Tableau 1. Biais, erreurs absolues et quadratiques moyennes des températures prévues et observées

Indices / Températures	Biais moyen [Erreurs maximales]	Erreur absolue moyenne (MAE)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)
Minimales	0,4°C [+4,5°C ; -5°C]	1,08	1,37
Maximales	0,8°C [+5,0°C ; -3,2°C]	1,32	1,59

Selon Stein *et al.* (2015), les erreurs qui entachent les prévisions proviennent de multiples origines : analyse imparfaite, erreurs de troncature liées à la dimension finie de la maille des modèles, erreurs sur la représentation des phénomènes physiques météorologiques… La plus

haute densité du réseau d'observation sur les continents y limite les erreurs de prévision (Bouttier, 2014). Mais cette étude au Bénin n'est faite que sur la base d'une seule station synoptique ; celle de Parakou. Cela pourrait expliquer quelques erreurs de prévision des températures proche de 5°C. D'après Hyrkkänen *et al*. (2016), les grandes erreurs de prévision > 5°C sont aujourd'hui très rares. Toutefois, l'OMM (2012) explique que selon la théorie du chaos, la façon dont évolue l'atmosphère étant extrêmement sensible aux petites erreurs issues de l'analyse initiale, une erreur minime - souvent trop faible pour que les prévisionnistes la décèlent - peut donner lieu à une erreur importante de prévision.

2.2.2. Prévision des événements pluviométriques

Les précipitations sont particulièrement difficiles à prévoir du fait que les champs de pluie ont fréquemment une structure à échelles multiples, mal représentée par les modèles, surtout à petite échelle (OMM 2012). Ainsi, la probabilité de précipitation, élément de prévision a été confrontée à la pluie enregistrée (Fig.5).

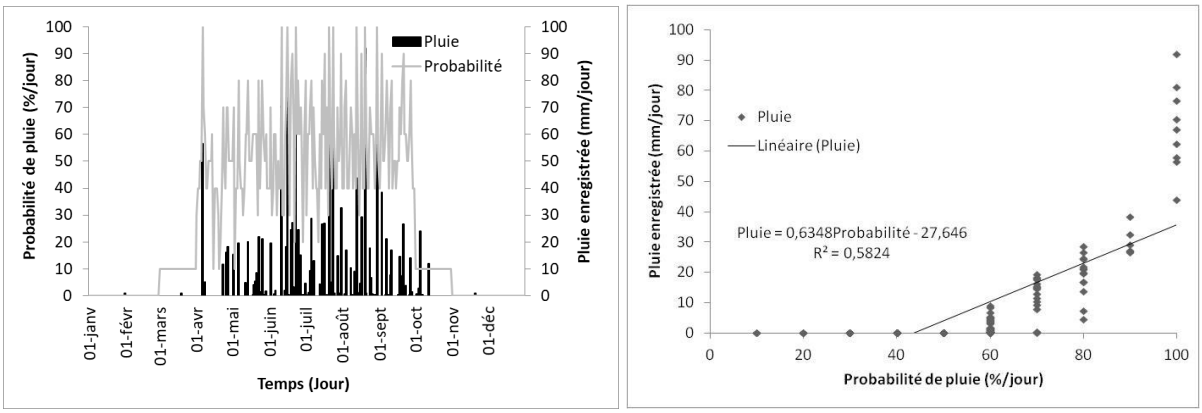


Figure 5. Corrélation entre les probabilités de précipitation prévues et les hauteurs de pluie enregistrées en 2017

L'intensité observée des pluies est fonction de la probabilité d'événements annoncés (r = 0,76). La quantité de pluie enregistrée n'est effectivement fonction de la prévision probabiliste qu'au-delà de 60 %. En dessous de ce seuil, l'observation montre une absence absolue de précipitations. Inversement au-delà de 80 % de probabilité de pluie, les hauteurs de pluie journalières sont considérables (19,6 mm à 91,9 mm).

A l'échelle mensuelle, la corrélation est quasi parfaite (r = 0,98) entre les nombre de jours de pluie annoncés et réalisés (Fig.6). Les biais sont très faibles (biais moyen égal à -0,7 à l'échelle annuelle) et nuls en pleine saison pluvieuse (juin à septembre).

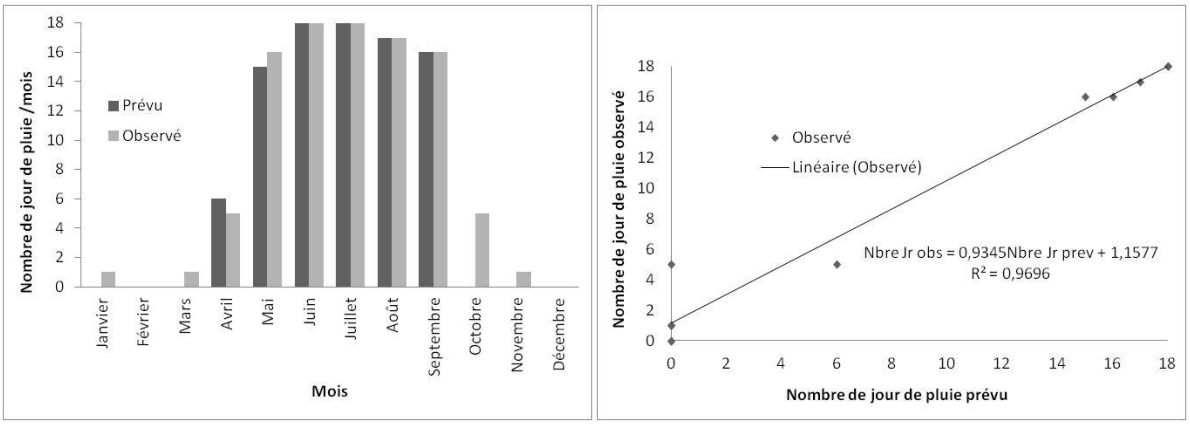


Figure 6. Prévision de nombres de jour de pluie prévus versus observés à la station de Parakou en 2017

L'erreur absolue moyenne est de 0,8 et l'erreur quadratique moyenne de 1,6 pour les nombres de jour de pluie. Des événements pluvieux non prévus et isolés sont observés au moins une fois au cours des autres mois, notamment dans les périodes de transitions avec la saison sèche pour lesquelles la probabilité de précipitations est faible.

Conclusion

Cette étude a permis d'apprécier la corrélation entre les températures et les paramètres pluviométriques prévus et observés et les biais et les erreurs de simulation dans le domaine du climat subsoudanien au Bénin. Malgré la surestimation ou la sous-estimation des températures et les écarts de probabilité de précipitation, les types de temps prévus restent les mêmes que ceux réellement enregistrés, et la saisonnalité est bien reproduite. La prévision est assez remarquable pour les probabilités de 60 à 100 % avec des pluies journalières de 19,6 à 92 mm.

Ainsi, la crédibilité des prévisions météorologiques dans ce domaine climatique du milieu soudanien du Bénin permet de les utiliser comme support d'information climatique et de renforcement de la résilience des populations.

Bibliographie

Bocquet M., 2014. La prévision numérique du temps. *Technologie*, 192, 48-51.

Boko M., 1988. *Climats et communautés du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences Humaines. Université de Bourgogne, Dijon, France, 2 volumes, 608p.

Bouttier F., 2014. *Modélisation des erreurs de prévision météorologique*. Projet en vue d'une habilitation à diriger des recherches, 286p.

Houndénou C., 1999. *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation.* Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 390p.

Hyrkkänen J., Kilpinen J., Nurmi P., Kaurola J., Brockmann M., 2016. Error characteristics of temperature forecast in Finland for the period 1979–2011 in relation to various weather patterns. *Meteorol. Appl.*, 23, 244-253.

Météo France, 2015. Les systèmes de prévision numérique du temps Arpège et Arome de Météo-France. Paris, France, 8p.

Organisation Météorologique Mondiale (OMM)., 2010. Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision. Volume I : Aspects mondiaux. OMM-N° 485, CH-1211 Genève 2, Suisse, 210p.

Organisation Météorologique Mondiale (OMM)., 2012. Principes directeurs relatifs aux systèmes de prévision d'ensemble et à la prévision d'ensemble. N^{O} 1091, CH-1211 Genève 2, Suisse, 34p.

Mailier J. P., Jolliffe I. T. Stephenson B. D., 2006. Quality of Weather Forecasts: Review and recommendations. *Royal Meteorological Society*, 34p.

Rochas M., Javelle J.-P., 1993. *La météorologie. La prévision numérique du temps et du climat*. Par Syros, collection « Comprendre », Paris, 264p.

Stein J., Pailleux J., Stoop F., Amodei M., Dupont O., Mayoka M., Pouponneau F., Sanchez I., 2015. La vérification des prévisions météorologiques à Météo-France. *La Météorologie*, 90, 40-49.

Susan J., Nadav-Greenberg L., Nichols M. R., 2009. Probability of Precipitation: Assessment and Enhancement of End-User Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(2), 185-193.

Theis E. S., Hense A., Damrath U., 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach. *Meteorol. Appl.*, 12, 257-268. Doi:10.1017/S1350482705001763.

World Meteorological Organization (WMO)., 2000. Guidelines on performance assessment of public weather services. WMO/TD No. 1023, Geneva, Switzerland, 62p.

Wilks D.S., 1995. Forecast verification. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press, Cambridge, International Geophysics Series, Vol. 59,

Zhang Y, Hanby I. V., 2007. Short-term prediction of weather parameters using online weather forecasts. *Proceedings: Building Simulation*, 1411-1416.

LES PRECIPITATIONS EXTREMES A BEYROUTH ET LEURS RELATIONS AVEC LES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

TRABOULSI M.[1,2], TOLIKA K.[3], ANAGNOSTOPOULOU C.[3], MAHERAS P.[3], MACHERA F.[4]

1 Université Libanaise, Faculté des Lettres, Corniche Mazraa, Beyrouth, Liban (traboulsim@yahoo.fr)
2 Archéorient, UMR 5133, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, CNRS-Université Lyon 2, Lyon, France
3 Département de Météorologie et Climatologie, Aristote Université de Thessaloniki, Grèce
4 Département des Mathématiques, Aristote Université de Thessaloniki, Thessalonique, Grèce

Résumé : *Ce travail propose l'analyse des relations entre les précipitations extrêmes à Beyrouth et les types de circulation atmosphérique au niveau de 500 hPa pour la période 1958-59/2015-16. L'analyse des tendances des précipitations extrêmes (≥ 95[e] et ≥ 99[e] centiles, fréquences et hauteurs) montre l'existence d'une baisse, parfois significative à l'échelle annuelle. Les précipitations extrêmes apparaissent fréquemment lors des trois types de circulation C, Cwsw et Cwnw. Enfin la construction des composites des situations synoptiques responsables des précipitations extrêmes ainsi que l'analyse dynamique de ces situations permettent d'expliquer une partie de leurs caractéristiques majeures.*

Mots clés : *Beyrouth-AIB, Liban ; précipitations extrêmes ; types de circulation ; tendance*

Summary: ***Extreme rainfall in Beirut and their relationships with atmospheric circulation types.*** *This work provides an analysis of the relationships between extreme precipitation in Beirut and circulation types at the level of 500 hPa for the period 1958-59/2015-16. The analysis of extreme precipitation trends (≥ 95th and ≥ 99th percentiles, frequencies and heights) shows that there is a somewhat significant decline in annual rates. Thus, extreme precipitation frequently occurs in all three types circulation of C, Cwsw, and Cwnw. Finally, the construction of synoptic composites responsible for extreme precipitation and the dynamic analysis of these situations explain some of their important characteristics.*

Key words: *Beirut-AIB, Lebanon; types of circulation; extreme precipitations; trends*

Introduction

Le Liban est un pays relativement bien arrosé en comparaison avec ses pays voisins. La forte pluviométrie de la frange littorale (700-900 mm/an) fait ressortir l'importance de la barrière montagneuse ; elle jouit d'un climat franchement méditerranéen à deux saisons. Les trois mois d'hiver (décembre, janvier et février) voient tomber plus de 60 % du total annuel avec des précipitations exceptionnelles dépassant de loin la moyenne annuelle comme ce fut le cas de deux mois – décembre 1968 et janvier 1969 – qui ont vu s'abattre sur Beyrouth 1104,8 mm (dont 687,3 mm durant le seul mois de janvier) alors que cette quantité pour une année « normale » était de 895,6 mm (Beyrouth-AUB)[1] (Blanchet, 1972). Cet exemple n'est pas unique, même s'il est le plus mémorable et a fait subir à la ville de Beyrouth comme à la plupart des régions libanaises des dégâts matériels importants liés à ces phénomènes extrêmes. Dans le contexte de changement climatique qui induit des modifications dans la circulation atmosphérique régionale (Traboulsi, 2014), il est intéressant d'étudier les pluies extrêmes ainsi que les types de circulation associés qui permettraient d'expliquer la diminution significative des pluies.

1. Données et méthodes

Cette étude se base sur les données pluviométriques quotidiennes de la station de Beyrouth-AIB (Aéroport International) pour la période 1958-59/2015-16, années pour lesquelles nous avons retenu et calculé, pour les précipitations supérieures ou égales à 0,1 mm, les paramètres suivants : la hauteur journalière des 95[e] et 99[e] centiles, le nombre de jours de précipitations supérieures aux 95[e] et 99[e] centiles, les lames d'eau moyennes des 95[e] et 99[e] centiles, le

[1] American University of Beirut.

maximum de précipitations journalières et enfin, le rapport de ce maximum sur les deux centiles.

Pour l'étude des types de circulation atmosphérique, nous avons utilisé la méthode de classification automatique des types de circulation développée par Anagnostopoulou *et al*. (2009). Cette méthode a été appliquée sur une fenêtre s'étendant de 20°N à 60°N en latitude et de 10°W à 65°E en longitude avec un point central dont les coordonnées sont 35° de latitude N et 35° de longitude E.

A partir du calendrier journalier des types de circulation obtenu, nous avons calculé les fréquences des types de circulation (cycloniques et anticycloniques) ainsi que leurs tendances linéaires, testées significatives au seuil de 5 % selon le test Mann Kendall (Sneyers, 1990). Afin d'étudier le lien entre les précipitations extrêmes et les types de circulation, les paramètres cités plus haut ont été calculés pour les types de circulation les plus fréquents responsables de ces valeurs.

2. Résultats

L'étude qui a été faite sur les précipitations à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique pour la période 1958-59/2015-16 (Traboulsi *et al*., 2019) a montré que les tendances des précipitations annuelles et saisonnières sont négatives, excepté celles de l'automne qui sont positives, mais les tendances apparaissent significatives uniquement au printemps. Celles des jours de pluie sont également négatives mais significatives uniquement en hiver. Le caractère pluviogène élevé d'un certain nombre de types de circulation (C, Cwnw et Cwsw) ainsi que les tendances négatives des précipitations qu'ils engendrent sont en relation avec les tendances négatives significatives des fréquences de ces types. Cette relation n'explique qu'en partie le phénomène de la baisse des pluies à Beyrouth : l'examen des pluies extrêmes permet de mieux la comprendre.

2.1. Les pluies extrêmes

Les valeurs extrêmes des précipitations journalières de deux centiles ($\geq 95^e$ et $\geq 99^e$) sont relativement élevées, comme dans toutes les régions méditerranéennes, respectivement de 14,6 et 36,6 mm (Tab.1), et reflètent le caractère des pluies méditerranéennes qui sont généralement intenses (Tolika *et al*. 2007) et tombent en un petit nombre de jours. Les valeurs maximales dépassent les 100 mm (138,9 mm), alors que le rapport des précipitations journalières maximales sur les X^e centiles est élevé, 3,9 pour le 99^e centile. Le nombre moyen annuel des jours des deux centiles est relativement élevé ; il est de 18,5 jours pour le 95^e centile et 3,7 jours pour le 99^e centile.

Tableau 1. Les caractéristiques des pluies extrêmes à Beyrouth-AIB (1958-59 /2015-2016).

Station	X^e centile		Nombre de jours moyen avec précipitations ≥ X^e centile		Maximum des précipitations journalières (en mm)	Rapport entre le max. de précipitations journalières et le X^e centile	
	95^e	99^e	95^e	99^e		95^e	99^e
Beyrouth_AIB	14,6	36,2	18,5	3,7	138,9	9,5	3,9

Les totaux des précipitations extrêmes annuelles ainsi que leurs fréquences présentent des tendances négatives mais elles ne sont significatives que pour ces dernières et pour les deux centiles (≥ 95 et ≥ 99) (Tab.2).

Tableau 2. Tendances des précipitations extrêmes (fréquences et hauteurs annuelles pour les deux centiles (≥ 95 et ≥ 99) à Beyrouth-AIB (1958-59/2015-2016) Les tendances significatives au seuil de 5 % selon le test Mann Kendall sont marquées par une étoile.

Station	≥ 95		≥ 99	
	Nombre de jours	Totaux annuels	Nombre de jours	Totaux annuels
Beyrouth-AIB	-*	-	-*	-

L'examen des tendances saisonnières de deux centiles (≥ 95 et ≥ 99) (Tab.3) montre que les hauteurs des précipitations comme leurs fréquences présentent une tendance à la baisse au printemps et en hiver, mais elles ne sont significatives que pour les deux paramètres au printemps alors qu'en hiver la tendance est significative seulement pour le nombre de jours du 95^{e} centile. En automne, le nombre de jours des précipitations du 95^{e} centile présente une tendance négative alors que cette tendance est positive pour les hauteurs des précipitations des deux centiles ainsi que pour le nombre de jours du 99^{e} centile. Mais cette tendance n'est pas significative pour cette saison dans tous les cas de figures.

Tableau 3. Tendances des précipitations extrêmes (fréquences et hauteurs saisonnières pour les deux centiles (≥ 95 et ≥ 99) à Beyrouth-AIB (1958-59/2015-2016). Même légende que le tableau 2.

Saisons	≥95		≥99	
	Nombre de jours	Totaux	Nombre de jours	Totaux
Printemps	-*	-*	-*	-*
Hiver	-	-	-*	-
Automne	-	+	+	+

3. Relation entre les précipitations extrêmes et les types de circulation

L'étude de la relation entre les précipitations et les types de circulation atmosphérique montre que les précipitations extrêmes apparaissent de préférence (Tab.4) avec les types C et Cwsw. Les types C cumulent le plus grand pourcentage des jours des pluies extrêmes (42,6 % pour le 95^{e} centile et 50,2 % pour le 99^{e} centile). Le type Cwsw vient en deuxième rang avec des pourcentages de 21,3 et de 21,6 %. Les pourcentages des hauteurs des précipitations sont presque équivalents aux fréquences : ils sont de 45 et 50,4 % pour le type C, et de 21,5 et 21,9 % pour le type Cwsw. Des précipitations extrêmes apparaissent aussi lors des types Cwnw et Cne, mais avec une fréquence et des hauteurs plus faibles que dans les deux premiers cas. Le type Cne vient en troisième position pour le nombre de jours et les hauteurs des précipitations pour le 95^{e} centile (respectivement 11,7 et 10,3 %) et en 4^{e} position pour le 99^{e} centile (7,0 % pour les deux paramètres). Le type Cwnw vient en 4^{e} position pour le 95^{e} centile (10,9 et 10,2 %) et en 3^{e} position pour le 99^{e} centile (9,9 et 9,4 %) (Tab.4).

Tableau 4. Analyse statistique des types de circulation engendrant des précipitations extrêmes (fréquences et hauteurs) pour les deux centiles (≥ 95 et ≥ 99) à Beyrouth-IB (1958-59/2015-2016).

N°	Type	Centiles	Nombre de cas avec précipitations ≥ X^{e} centile	Fréquences (en %) des types de circulation	Pourcentages des précipitations par type de circulation	Rapport de max. journ./X^{e} centile
6	**C**	95^{e}	**437**	**42,6**	**45,0**	**9,5**
		99^{e}	**107**	**50,2**	**50,4**	**3,8**
7	Cnnw	95^{e}	35	3,4	3,3	5,4
		99^{e}	6	2,8	2,8	2,2
8	Cwnw	95^{e}	108	10,5	10,2	5,3
		99^{e}	21	9,9	9,4	2,1

9	**Cwsw**	95e	**219**	**21,3**	**21,5**	**9,5**
		99e	**46**	**21,6**	**21,9**	**3,8**
10	Cssw	95e	33	3,2	3,1	4,3
		99e	7	3,3	3,1	1,7
11	Cse	95e	75	7,3	6,7	5,4
		99e	11	5,2	5,3	2,2
12	Cne	95e	**120**	**11,7**	**10,3**	**5,8**
		99e	**15**	**7,0**	**7,0**	**2,3**

4. Analyse dynamique des champs des géopotentiels des types de circulation responsables des précipitations extrêmes

Pour cette analyse, nous avons calculé et construit les cartes moyennes dites composites pour tous les types de circulation responsables des précipitations extrêmes mais sont présentés ici les types les plus fréquents (C, Cwsw) ainsi que les composites résultant de la différence entre les deux champs d'anomalies précédentes : champ moyen du type des cas des précipitations extrêmes et champ général moyen du même type. Les figures 1 et 2 illustrent les résultats.

Le premier cas se réfère au 95e centile pour le type C. L'examen de la composite montre qu'une vaste zone d'anomalies négatives, dont le centre se trouve sur le NW du Liban, occupe toute la Méditerranée orientale et s'étend vers le NE en direction de la Russie (Fig.1a). La composite illustrant les différences est très intéressante (Fig.1c). Une vaste zone d'anomalies négatives occupe toute l'Europe, la Méditerranée ainsi que le Moyen-Orient, mais les anomalies négatives les plus fortes sont centrées au-dessus du Liban.

Le second cas concerne le même type de circulation (C) mais pour le 99e centile (Fig.1b, d). L'image fournie par les composites ne diffère pas beaucoup par rapport au cas précèdent, excepté les plus fortes anomalies observées ici et centrées au-dessus du Liban.

La figure 2 concerne le type Cwsw pour les deux centiles 95e (a,c) et 99e (b,d). Elle montre que l'image générale des champs d'anomalies ne diffère pas beaucoup par rapport à l'image des anomalies concernant le type C, excepté l'orientation de ce champ qui est plus claire ici, du SW vers le NE.

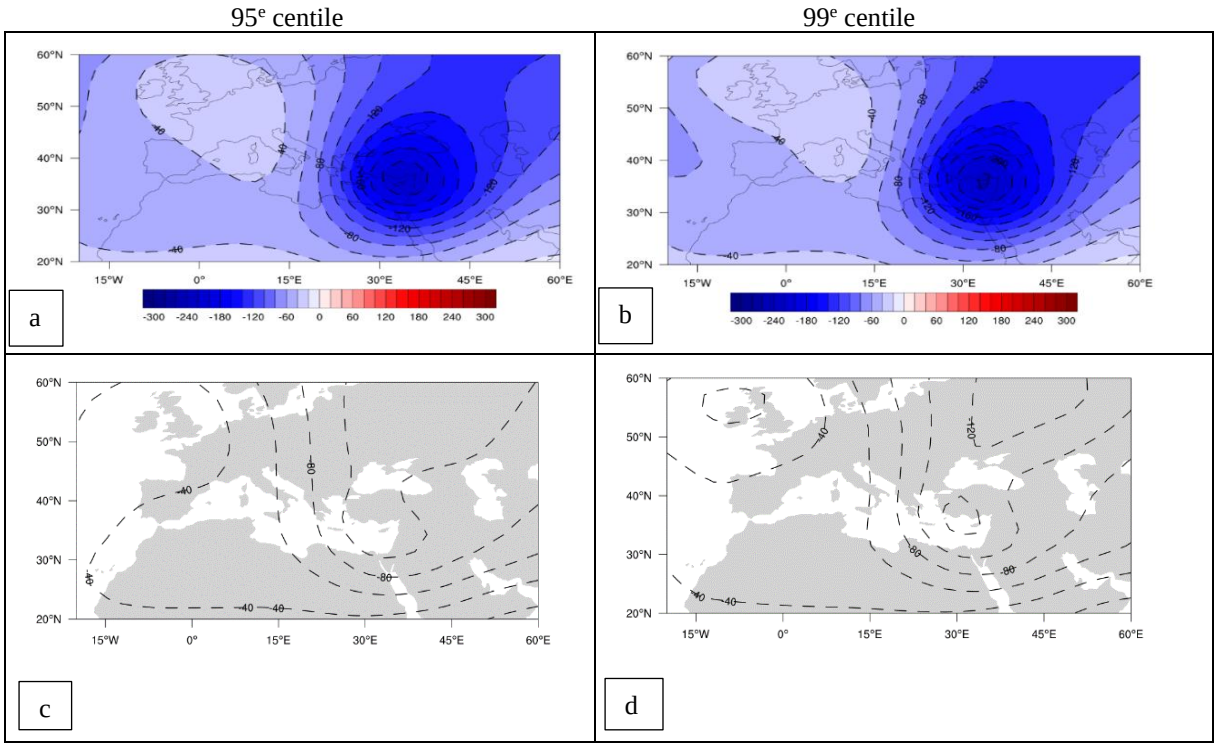


Figure 1. Les anomalies moyennes du type de circulation C des cas (A.M.C.) de fortes précipitations ≥ 95% (a) et 99% (b) et les anomalies moyennes des différences (c) et (d) : anomalies des cas (A.M.C.)- anomalies moyennes générales du type (A.M.C. – A.M.G.). Les valeurs des anomalies sont multipliées par 100.

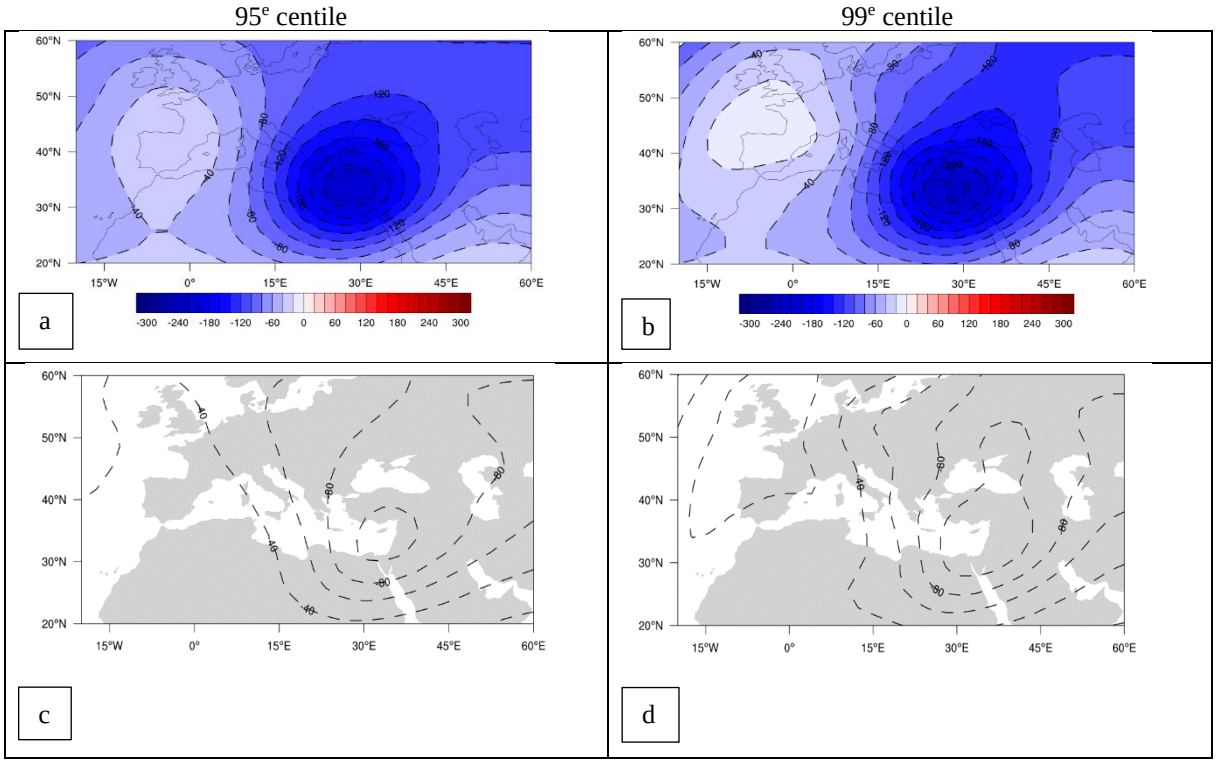


Figure 2. Même légende que pour la figure 1 mais pour le type Cwsw.

Conclusion

Le climat franchement méditerranéen de la frange littorale libanaise est confirmé encore une fois par les valeurs extrêmes des précipitations journalières de deux centiles ($\geq 95^e$ et $\geq 99^e$) qui sont relativement élevées, respectivement de 14,6 et 36,6 mm.

Le nombre moyen annuel des jours de deux centiles, relativement élevé, est de 18,5 jours pour le 95^e centile et 3,7 jours pour le 99^e centile. Ces précipitations présentent des tendances négatives à l'échelle annuelle et saisonnière, significative pour le nombre de jours seulement pour la première alors qu'elle est significative pour leurs fréquences en hiver et au printemps et pour leurs hauteurs pour la seconde. La fréquence de ces pluies extrêmes présente une tendance négative en automne pour le 95^e centile, alors qu'elle est positive pour les autres paramètres (hauteurs pour le 95^e centile, fréquence et hauteur pour le 99^e centile) mais sans être significative. Ce résultat concorde avec la tendance des précipitations annuelles et saisonnières (Traboulsi *et al*., 2019).

Le caractère pluviogène des types de circulation, C, Cwsw et Cwnw, apparait aussi dans les précipitations extrêmes et particulièrement lors des deux premiers. L'analyse des composites de ces deux types montre que, dans la plupart des cas, les précipitations extrêmes sont associées à une zone d'anomalies négatives relativement fortes des géopotentiels 500 hPa au-dessus de la Méditerranée orientale. Notons que les champs d'anomalies pour tous les types de circulation présentent presque la même orientation, à savoir du SW vers le NW. Il y a pourtant une différence concernant l'importance des anomalies négatives : en règle générale et avec quelques exceptions, les anomalies des types cycloniques (C, Cnnw, Cwnw, Cwsw, Cssw, Cse, Cne) dont le centre se trouve plus au nord présentent des anomalies relativement plus fortes.

Enfin, on conclut que les fortes précipitations sont produites par le courant perturbé en Méditerranée orientale entraînant avec lui des dépressions profondes et selon une trajectoire de préférence de SW-NE sous l'influence de la circulation d'altitude.

Bibliographie

Anagnostopoulou C., Tolika K., & Maheras P., 2009. Classification of circulation types: a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 3-15.

Blanchet G., 1972. Les précipitations exceptionnelles de décembre 1968 et janvier 1969 au Liban. *Hannon, revue libanaise de géographie*, vol. VII, 3-27.

Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P. & Kutiel H., 2007. Extreme precipitation related to circulation types for four case studies over the Eastern Mediterranean. *Advances in Geosciences*, 12, 87-93.

Traboulsi M., 2014. Le réchauffement climatique au Proche-Orient : une évolution inquiétante?, *ArchéOrient-Le Blog* (Hypotheses.org), 21 novembre 2014.URL : http://archeorient.hypotheses.org/3411

Traboulsi M., Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P., 2019. Les précipitations à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique. *Actes du XXXII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Théssalonique, 29 mai-1er juin 2019, 523-528.

Sneyers R., 1990. *On the statistical analysis of series of observation.* WMO, Technical Note n°143, Genève.

VULNÉRABILITÉ DE LA COMMUNAUTÉ DES OISEAUX AQUATIQUES DU COMPLEXE ZONES HUMIDES MAHAVAVY-KINKONY FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : PERCEPTION DES VILLAGEOIS, ANALYSE BIOÉCOLOGIQUE ET MESURES D'ATTÉNUATION

TSIAVAHANANAHARY T.J.[1,2], RANDRIAMIFIDISON R.F.A.[4], TSARADIA J.N.[1,2], RANDRIANJATOVO S.[1], RANAIVOJAONA S.B.[1], RANDRIANJAFY V.R.[1], TOMBOANONA S.[1], ANDRIAMASIMANANA R.H.[3]

1 École doctorale sur les Écosystèmes Naturels, Université de Mahajanga, Madagascar (ttjorlin@yahoo.fr)
2 Faculté des Sciences de Technologie et Environnement, Université de Mahajanga, Madagascar
3 Asity Madagascar, Ligue Malgache pour la protection des Oiseaux, Antananarivo, Madagascar
4 Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Ambositra, Madagascar

Résumé : *Cette étude porte sur les effets du changement climatique sur les oiseaux aquatiques de la partie Nord Ouest de Madagascar. Les analyses portent sur les perceptions villageoises et les études bioécologiques des communautés aviaires, tenant compte des changements actuels des habitats naturels et la vulnérabilité de la communauté aviaire qu'ils abritent. Pour ce faire, des données climatiques consultées sur le site de World Bank Group, CCKP, complétées avec celles de la station météorologique du District de Mitsinjo, les données des enquêtes aux niveaux des paysans, et les données écologiques sur le dynamisme des habitats naturels et les suivis réguliers des oiseaux aquatiques, ont été adoptés. Des stress des écosystèmes côtiers et lacustres ont été constatés dus aux fluctuations des paramètres physicochimiques renforcées par les exigences humaines sur la destruction des marais et des mangroves, qui rendent vulnérables les habitats de la communauté aviaire. Les comportements, la reproduction et la survie des oiseaux aquatiques sont affectés. Nos recommandations seront axées sur la restauration écologique des plantes aquatiques et mangroves.*

Mots clés : *oiseaux aquatiques ; changement climatique ; activités anthropiques ; conservation ; zones humides*

Summary: ***Vulnerability of the water birds community of the Mahavavy-Kinkony wetland complex to climate change: villagers' perceptions, bio-ecological analysis and mitigation measures.*** *This study relates on the effects of climate change on aquatic birds in the northwestern part of Madagascar. The analyses focus on village perceptions and bio-ecological studies of avian communities, taking into account current changes in natural habitats and the vulnerability of the bird community they shelter. To do this, climate data consulted on the World Bank Group, CCKP, completed with those of the meteorological station of the District of Mitsinjo, data from surveys at the level of farmers, and ecological data on the dynamism of natural habitats and regular monitoring of aquatic birds, were adopted. Stresses of coastal and lake ecosystems were observed due to fluctuations in physico-chemical parameters in protected areas reinforced by human demands on the destruction of marshlands and mangroves, which make the habitats of the bird community, especially endangered species, vulnerable. Behaviours, reproduction and survival of waterfowl are affected. Our recommendations for resilience will focus on ecological, aquatic plant and mangrove restoration.*

Key words: *waterbirds; climate change; human activities; conservation; wetlands*

Introduction

Il est largement reconnu que le changement climatique affecte toute la diversité biologique, de l'individu à l'écosystème. Selon le WWF (2015), l'Union International pour la Conservation de la Nature (IUCN) estime que 35% des oiseaux seront particulièrement impactés par les changements climatiques. La modification des aires de répartition des espèces, les comportements habituels et le calendrier d'activités biologiques tels que la migration et/ou la reproduction représentent des réponses évidentes aux changements climatiques. C'est le cas à Madagascar où le changement climatique est un des effets les plus concrets de la dégradation de l'environnement et constitue une menace tant pour la conservation de la biodiversité que pour le développement économique. Cette étude traite de la vulnérabilité des oiseaux aquatiques face au changement climatique dans l'Aire Protégée Complexe de Mahavavy-Kinkony (CMK), un des 84 sites ZICO (Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux) à l'ouest de

Madagascar. CMK est vulnérable au changement climatique avec un indice de sensibilité de 0.6 (MEED, 2019). Ces habitats potentiels des oiseaux aquatiques sont des zones environnementales critiques et extrêmement sensibles du à l'effet de la croissance démographique et de la variabilité climatique et/ou le déséquilibre saisonnier. L'objectif de ce travail est de montrer dans quelle mesure le changement climatique affecte les communautés d'oiseaux aquatiques et leurs habitats.

1. Données et Méthodes

1.1. Zone d'étude

Localisé dans le District de Mitsinjo, Région Boeny, dans la partie Nord Ouest de Madagascar, le CMK se trouve entre 45° 28' et 45° 56' de longitude Est et entre 15° 46' et 16° 12' de latitude Sud (Fig.1). L'altitude varie entre 7 m et 140 m et la superficie totale est de 351 300 ha (Asity, 2019). C'et la seule et unique zone labélisée Ville Ramsar Malagasy après évaluation de son importance pendant la réunion sur les sites Ramsar (Zones humides) ou Cop-13 en octobre 2018 à Dubaï. CMK est caractérisé par sa grande envergure et sa diversité d'écosystèmes caractérisée par une richesse spécifique très élevée. Il abrite le Lac Kinkony, le deuxième plus grand lac de Madagascar. C'est un site d'accueil des oiseaux migrateurs et une zone de reproduction des espèces nicheuses.

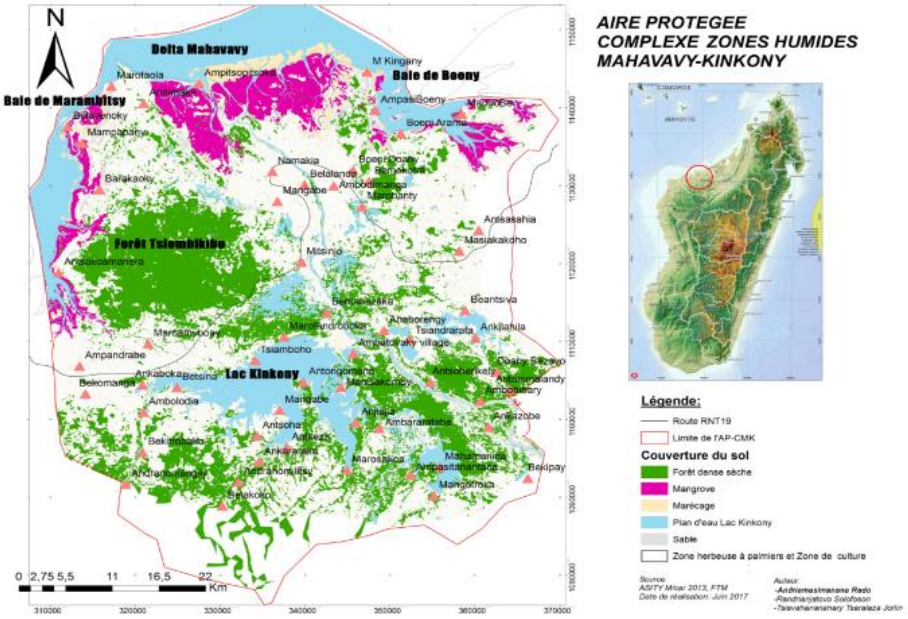


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (Tsiavahananahary, 2019)

1.2. Approche méthodologique

1.2.1. Collecte et analyses des données climatiques

Les données climatiques sont constituées par les données historiques, les données de référence actuelles, et les anomalies de température et de précipitations. Les données historiques de températures et de précipitations proviennent du portail du Groupe de la Banque Mondiale (WBG, « Climate Change Knowledge Portal – CCKP for Development Practitioners and Policy Makers », https://climateknowledgeportal.worldbank.org/download-data) et couvrent la période 1996-2016. Elles ont essentiellement servi à analyser la variabilité des paramètres climatiques (Température T° et Précipitation P°) au cours des 20 dernières années. Les données de 2017, 2018, 2019 ont été prises comme référence de la situation la plus récente et nous avons eu recours aux données climatiques de station météorologique installée au sein du District de

Mitsinjo. Notre démarche pour l'analyse des projections consistait ainsi à utiliser les valeurs des anomalies de T° et de P° disponibles sur le portail de WBG. Ces anomalies sont prévues pour la période de 2020 à 2039. Le Scenario RCP4.5 a été pris du fait qu'il est basé sur une émission constante assez raisonnable de CO2. 16 modèles climatiques sont disponibles lors de l'acquisition des données avec le scenario RCP 4.5. Les médianes des valeurs des anomalies données par ces 16 modèles ont été prises pour avoir un maximum de fiabilité de la simulation.

1.2.2. Collectes et analyses des données socioéconomiques et écologiques

Les données sont issues d'enquêtes socioéconomiques aux niveaux des paysans proches des écosystèmes lacustres et côtiers et portent sur la perception des changements climatiques et de ses effets sur les oiseaux aquatiques. Les données écologiques quant à elles traitent 1) de l'analyse sur terrain du dynamisme spatiotemporel des habitats naturels face a des déséquilibres saisonniers, de l'inondation et de la sècheresse et 2) du suivi régulier des oiseaux aquatiques et de leurs vulnérabilités dans ses habitats naturels pendant la période de nourrissage, de repos, de nidification et surtout pendant les périodes de reproduction avec les analyses des faits observés sur les sites d'interventions.

2. Résultats

2.1. Perception des villageois sur les effets du changement climatique

Les résultats des enquêtes effectuées sur les sites d'études nous ont permis de constatés les perceptions des paysans de l'effet du changement climatique (Fig.2).

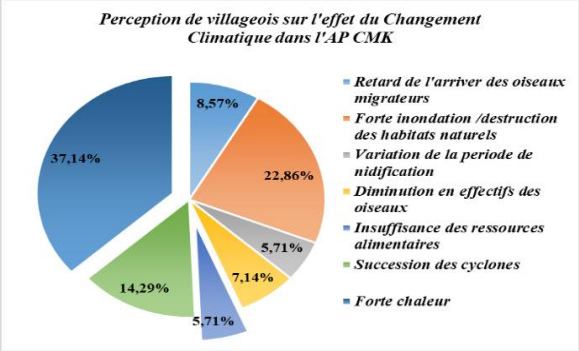


Figure 2. Perceptions villageoises sur l'effet du Changement climatique

La sensation de forte chaleur a été évoquée par la majorité des villageois enquêtés (37%) comme étant le principal problème lié au dérèglement climatique actuel à Madagascar. Une forte inondation accentuée par la destruction des habitats naturels et la succession des cyclones a été affirmée par quelques personnes proches des ressources naturelles, soit respectivement 22 ,86% et 14,29% des enquêtés. Les autres perçoivent les retards de l'arrivée des oiseaux migrateurs, l'insuffisance des nourritures et la variation de la période de nidification comme causés par la variation climatique et considèrent que la diminution des effectifs de quelques espèces coloniales est la preuve incontournable de ce phénomène.

2.2. Données Climatiques pour l'AP CMK

Les figures 3 et 4 montrent les résultats des fluctuations climatiques pour la période passée (1996-2016) dans l'AP CMK. Pour la température, une tendance d'augmentation est constatée pour presque tous les mois. D'après les valeurs mensuelles annuelles, les variations les plus importantes sont enregistrées pour les mois humides, surtout pour le mois de Novembre (min 26,39°C et max 28,5°C). Les mois secs ne présentent pas une importante variation de température sauf pour les mois de Mai (min 25,39°C et max 26,80°C) et Juin (min 23,30°C et

max 25°C). Par contre, la tendance a montré une régression de la précipitation mensuelle avec des variations assez visibles à l'exception du mois de novembre et le mois de mars. Cette situation est liée à une hausse de la précipitation au niveau de l'année 2014 pour les mois de novembre à mars, avec le Cyclone Hellen.

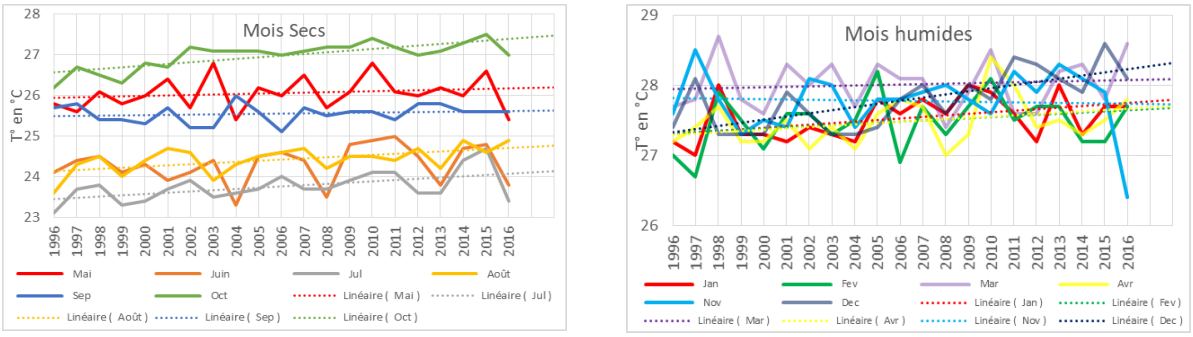


Figure 3. Evolution de la température (°C) mensuelle entre 1996 et 2016 dans le District de Mitsinjo, Madagascar (WBG, CCKP, 2020)

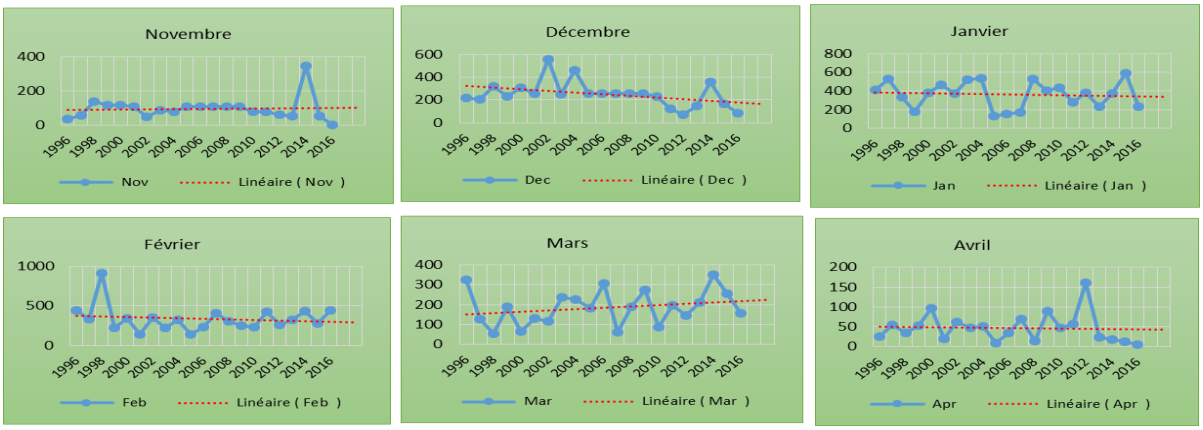


Figure 4. Variation des précipitations mensuelles (en mm) des mois humides entre 1996 et 2016 dans le District de Mitsinjo, Madagascar (WBG, CCKP, 2020)

Pour les données actuelles, le dérèglement saisonnier est remarqué dans les sites d'étude car la saison des pluies est retardée en décembre voire en début janvier, et devient de plus en plus courte, ayant tendance à s'achever en mi-mars. La moyenne des précipitations annuelles entre 2017 et 2019 est de 1557 mm. Le mois le plus humide marqué par des fortes pluies est janvier avec une précipitation moyenne maximale de 747 mm. La température moyenne annuelle est de 27,26°C avec un minimum de 16°C en juillet et un maximum de 36°C en octobre.

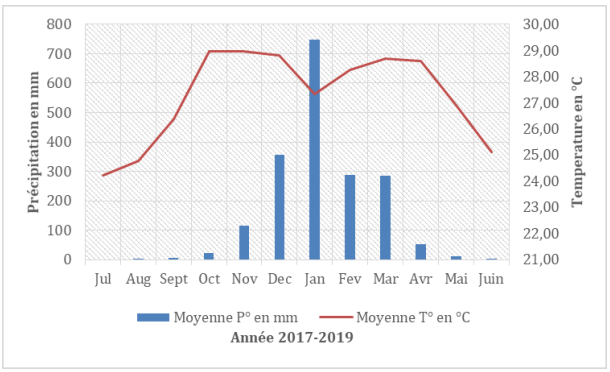


Figure 5. Données climatiques actuelles du CMK par diagramme ombrothermique de Gaussen entre 2017 et 2019 (Source : Cantonnement de forêt à Mitsinjo et la Société SIRAMA Namakia- 2019)

Pour la projection future à 20 ans, la température mensuelle augmentera avec des anomalies considérables de 0.74°C à 0.86°C. Pour les précipitations, une baisse est prévue pour presque tous les mois allant de -0,59 (juil) à -23,91 mm (sept), à l'exception de Avril, Mai, Juin. En additionnant ces anomalies aux précipitations actuelles, des valeurs négatives seront enregistrées pour les mois de Juillet, Août et Septembre, impliquant probablement des sècheresses prolongées.

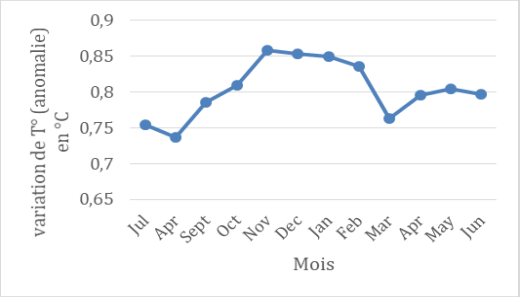


Figure 6. Anomalies des températures moyennes mensuelles (en °C) à partir de 2020 à 2039 pour Mitsinjo, Madagascar (WBG-CCKP, 2020)

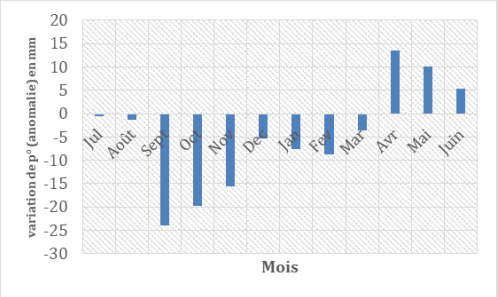


Figure 7. Anomalies des précipitations moyennes mensuelles (en mm) à partir de 2020 à 2039 pour Mitsinjo, Madagascar (WBG-CCKP, 2020)

2.3. Analyse de la vulnérabilité des oiseaux aquatiques

Les données climatiques ont montré que la température augmente au fil des années tandis que les précipitations diminuent, sauf lors d'épisodes cycloniques. Les communautés d'oiseaux en sont affectées. Les impacts directs sont constatés au niveau des habitats, avec des répercussions majeures sur les communautés aviaires (oiseaux nicheurs, migrateurs, limicoles). De ce fait, ils sont très vulnérables face à cette situation qui leur est difficilement tolérable. Concernant les habitats, une baisse de la précipitation accompagnée d'une augmentation de température de l'air entraîne une longue période de sècheresse ainsi qu'une hausse de la salinité de l'eau de mer. La famille des Ardeidae et les limicoles (dépendant des vases pour se nourrir) sont vulnérables à cet effet. Quant aux espèces nicheuses, la majorité des cas des nidifications est effectuée entre les mois d'octobre et avril, ce qui correspond aux saisons humides. Prenons le cas de la colonie des nicheurs de la Baie de Marambitsy (Zones côtières) et par rapport aux deux espèces suivies dont *Egretta dimorpha* et *Threskiornis bernieri* (EN), les œufs perdus et non éclos causés par la destruction des nids en 2018 représentent 16.5% des pertes alors que les jeunes perdus en représentent 10%. Les pertes sont plus élevées au stade œuf pour *Egretta dimorpha* (19%) par rapport à celles au stade jeune (08%). Par ailleurs, les pertes sont plus ou moins équilibrées chez *Threskiornis bernieri* avec 15,4% et 14,5% pour les jeunes. Les nids de cette espèce endémique de l'ouest de Madagascar ont été détruits à 90% en mars 2014 pendant le passage du cyclone « Hellen » dans la zone de CMK, notamment avec la hausse de la précipitation mentionnée précédemment.

L'élévation de la température renforcée par une longue période sèche favorise l'abaissement du niveau de l'eau (cas du grand lac Kinkony), entraînant l'assèchement d'une partie des marais. Ainsi, les touffes de racines de phragmites sont longuement exposées au soleil, ce qui favorise la destruction de ces habitats (support de nids, dortoir des oiseaux) lorsque le niveau de l'eau augmente suite aux fortes pluies de la période humide. En dehors des oiseaux coloniaux, une espèce emblématique de l'ouest de Madagascar « Vorofaly » ou *Zapornia olovieri* (EN) est plus vulnérable à cet effet. L'analyse des taux de pertes totales, toutes espèces confondues, s'élèvent de 23% (2016) à 30% (2018) dans la colonie des oiseaux de Marais Makary (Kinkony). Les pertes enregistrées sont relativement plus importantes au stade œuf qu'au stade poussin. Les espèces menacées sont entre autres *Ardea humbloti* (EN), *Zapornia olivieri* (EN), *Haliaetus vociferoides* (CR), *Threskiornis bernieri* (EN), Ardeola idae (EN).

Discussions et Conclusion

Madagascar fait partie des territoires considérés comme les plus vulnérables face aux changements climatiques (Tsiavahananahary, 2018). Dans la région d'étude, le changement climatique causera un déclin important des populations d'oiseaux aquatiques nicheurs, dont les aires de répartition vont se réduire. Si la résilience n'arrive pas à temps et si aucune décision n'est prise, les marais vont se transformer, s'assécher, devenant moins favorables pour certaines espèces d'oiseaux aquatiques. Par ailleurs, le passage de perturbations cycloniques occasionne des pluies torrentielles entrainant d'alarmantes inondations, souvent aggravées par une marée montante qui frappe directement la nidification des oiseaux limicoles. L'augmentation de la température avec une longue période sèche accroit les risques alimentaires et de reproduction des oiseaux aquatiques.

Les résultats climatiques émanant de cette recherche serviront d'outils stratégiques pour les gestionnaires de l'AP CMK, dont Asity Madagascar, qui orientent déjà leurs activités dans ce sens actuellement. Pour maintenir la richesse avifaune du CMK, nos recommandations seront axées sur le renforcement de la restauration écologique, des plantes aquatiques et mangroves, la protection des berges de Mahavavy, la sensibilisation et la protection de ces deux écosystèmes pour contribuer à l'atténuation du changement climatique dans la partie ouest de Madagascar.

Bibliographie

IPCC., 2018. Global warming of 1.5°C. *Special report.*

MEDD., 2019. Vulnérabilité et risques climatiques : Informations récentes pour le TBER Boeny. Résumé du Tableau de Bord Environnemental de la Région Boeny, Madagascar, DREDD Boeny, 91p.

Randriamifidison R.F.A, Tsiavahananahary T.J., Rakotoarisoa D. & Andriamampihantona F. 2019. La région Amoron'i Mania Madagascar face au changement climatique : réalités, adaptation, projections et orientations stratégiques pour un développement durable. *Acte de XXXIIème Colloque Internationale de l'AIC,* Thessaloniki, Grèce, 29 mai au 1 juin 2019, 45-50.

El Hamoumi R., Rihane A. & El Malki S., 2017. Impact des conditions climatiques sur la reproduction de l'Echasse blanche *Himantopus himantopus* au barrage Hassar (Mohammedia, Maroc). VIIIème Journées Internationales Oiseaux d'eau et Zones Humides, Khénifra, Maroc, 19-20 mai 2017.

Tsiavahananahary T.J, Randrianjafy V. & Andriamasimanana R., 2017. Identification des sites potentiels de reproduction et nidification des oiseaux aquatiques dans l'AP CMK. *Acte de forum de la recherche sur la Biodiversité et les Objectifs du Développement Durable*, 14 au 17 juin 2017, Antananarivo, Madagascar, 289 -295.

Tsiavahananahary T.J., 2018. *Biologie de la conservation des oiseaux aquatiques de l'Aire protégée Complexe Zones humides Mahavavy-Kinkony.* Thèse de Doctorat, Université de Mahajanga, Madagascar, 234p.

Tsiavahananahary T. J., 2019. Paysage ornithologique des zones côtières de la Région Boeny et valorisation touristique, cas de l'Aire Protégée Complexe Mahavavy-Kinkony (AP CMK). Présentation orale (Conférence), Safari des oiseaux de Mahajanga, Edition IV-2019. *Sterna benghalensis* octobre 2019 à l'ORTB Mahajanga, Madagascar.

CONDITIONS ATMOSPHERIQUES ASSOCIEES AUX CHUTES DE GRELES EN BOURGOGNE

ULLMANN A.[1], GROSSE C.[1], BERTHET C.[2]

1 BIOGEOSCIENCES-CRC, UMR628 Université de Bourgogne, Dijon, France (Albin.ullmann@u-bourgogne.fr)
2 ANELFA, Toulouse, France

Résumé : *Depuis 2014, un réseau de grêlimètres installé en Bourgogne par l'ANELFA (Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques) permet d'enregistrer les chutes de grêles et leurs principales caractéristiques. Ces dernières se produisent principalement entre avril et septembre et surtout en fin d'après-midi lorsque l'air de surface a été suffisamment réchauffée pour déclencher une forte ascendance. Du point de vue atmosphérique, les chutes de grêles en Bourgogne sont associées à un puissant flux de secteur sud provenant du Golfe du Lion. La configuration synoptique montre une forte anomalie barométrique négative centrée sur l'Allemagne avec une extension vers le sud-ouest traversant la France puis l'Espagne. En outre, la Bourgogne est en même temps sous l'influence d'un léger flux de nord-ouest. Il en résulte une zone de conflit de masse d'air thermiquement et hygrométriquement très différentes, avec une importante ascendance et donc une énergie potentielle de convection disponible pouvant être libérée sous forme d'épisodes orageux avec chutes de grêles.*

Mots clés : *chutes de grêles ; réseau d'observation ; dynamique atmosphérique ; Bourgogne*

Summary: ***Atmospheric conditions associated to hailstorms in Burgundy.*** *A network of 96 hail pads is installed in Burgundy since 2014. Hailfalls in this part of France are mainly recorded from Avril to September and usually at the end of the afternoon when the surface air has been warmed enough to trigger an upward lift. Atmospherically speaking, hailfalls in Burgundy are associated with southward winds blowing from the Mediterranean Sea (Gulf of Lions) according to a strong negative barometric anomaly centered over Germany and extended southwestward until the south of Spain. A weak northwestward wind is at the same time also blowing until the northern part of Burgundy creating a thermal air-mass conflict and therefore a convective available potential energy which can be released in form on stormy events with hailfalls.*

Key words: *hailfalls; observation network; atmospheric dynamics; Burgundy*

Introduction

Les chutes de grêles constituent un des aléas météorologiques à très fort impact direct sur l'agriculture, notamment sur la viticulture et l'arboriculture. Du point de vue purement météorologique, les chutes de grêles sont assez bien connues : formation du cumulonimbus, ascendance d'air chaud et humide, formation des noyaux glaçogènes, accrétions, etc. (Berthet *et al*., 2013) Dans le contexte actuel du changement climatique, la question des aléas météorologiques comme la grêle se pose désormais surtout en termes de forçages climatiques et de leurs possibles variations et/ou changements. En France, une première climatologie de la grêle fondée sur des observations météorologiques et des données d'assurance a été proposé par Vinet en 2000. En 1987, l'association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques (ANELFA) débute un projet d'installation de *tables à Grêles* ou *grêlimètres* afin de développer un réseau de mesure et d'observation de la grêle. Au fur et à mesure de ce développement sur le territoire national, les études ont pu progresser : en 2007, Dessens *et al*. ont proposé une échelle de classification des chutes de grêles à partir des diamètres mesurés sur une période de 16 ans par un réseau 300 grêlimètres installés dans le sud-ouest, le sud et le centre de la France. En 2011, Berthet *et al*., présentent une étude sur la variabilité interannuelle de la fréquence et de l'intensité des chutes de grêles à partir de 922 grêlimètres dans le sud-ouest, le sud et le centre. Les principaux résultats indiquent que les chutes de grêles sont en moyenne plus fréquentes et plus intenses dans les secteurs les plus éloignés de l'Océan Atlantique ou de le Mer Méditerranée, en raison de convections plus fortes (Berthet *et al*., 2011). En 2013, Berthet *et al*. présentent une climatologie des évènements extrêmes de chutes de grêles dans le sud-ouest de la France et montrent qu'ils sont principalement associés la mise en place d'un flux de sud à sud-ouest.

En Bourgogne, la viticulture et l'arboriculture fruitière (petits fruits) sont particulièrement vulnérables aux chutes de grêles en raison de la fragilité de ces cultures. Depuis 2014, l'ANELFA y développe un réseau de grêlimètres et les données n'ont pour l'instant jamais été analysées. Cette étude propose une toute première analyse des conditions atmosphériques et de la dynamique climatique multi-scalaire associées aux chutes de grêle en Bourgogne.

1. Données et Méthodes

1.1. Données des grêlimètres

Les grêlimètres ont été créés en 1987 par la *Société d'Application Atmosphériques* à la suite du premier colloque international sur la mesure des chutes de grêles (Lozowski *et al*., 1978). Un grêlimètre consiste en une plaque de polystyrène extrudé d'une dimension de 42*30 cm et de 2 cm d'épaisseur, peinte en blanc, et installé sur un pied d'un mètre de hauteur à proximité des habitations des volontaires, généralement agriculteurs et viticulteurs (Fig.1). Après une chute de grêle, le volontaire note la date et l'heure sur la table et l'envoie à un technicien régional de l'ANELFA qui va encrer la table en noir à l'aide d'un rouleau afin de faire apparaitre les impacts des grêlons. Ces derniers sont analysés automatiquement à l'aide d'un système d'analyse d'image afin d'en déterminer le nombre et la distribution des tailles. La description complète du matériel et de la méthode de mesure est présentée dans Dessens *et al*. (2001). Les données numériques des chutes de grêle en Bourgogne ont été fournies par l'ANELFA. Elles sont issues de 96 grêlimètres installés depuis 2014. Entre 2014 et 2018, 36 chutes de grêles ont été ainsi enregistrées et documentées : localisation, durée, jours de la semaine, nombre total de grêlons, distribution des diamètres (Fig.1). Les grêlimètres étant presque tous localisés le long de la côte viticole, c'est logiquement à cet endroit qu'ont été enregistrés les chutes de grêles (Fig.1).

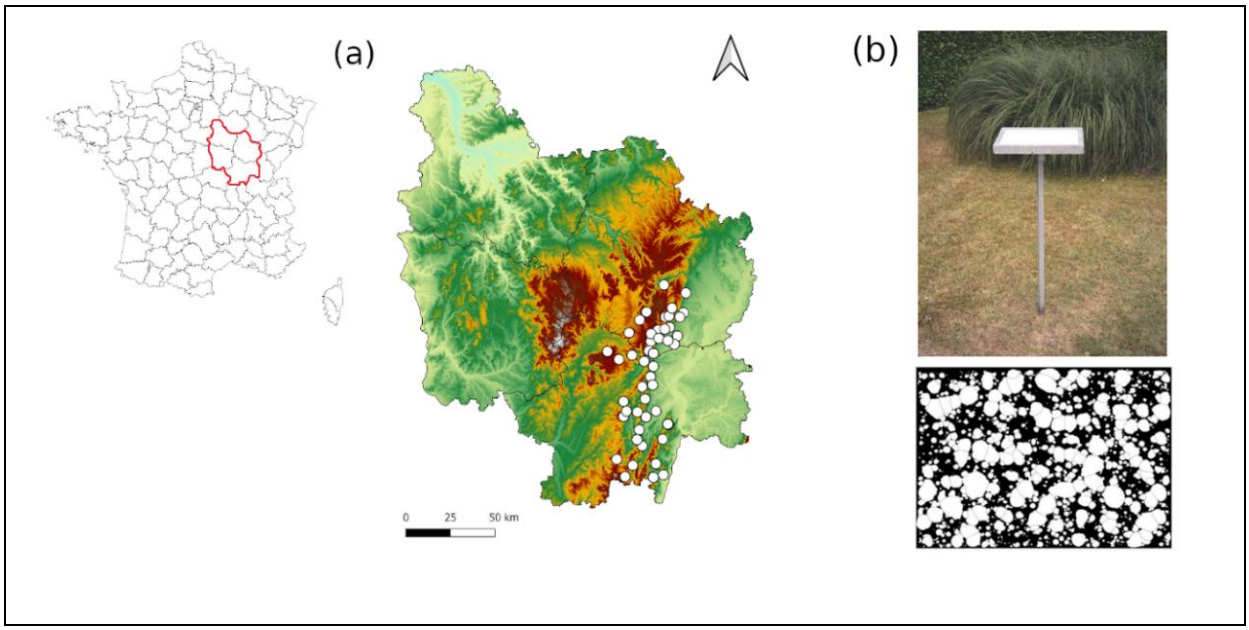


Figure 1. (a) localisation de la région Bourgogne et des 36 chutes de grêles enregistrées entre 2014 et 2018 (points blancs). Le relief est représenté en couleur allant du vert (plus bas) au rouge (plus haut). (b) En haut : grêlimètre. En bas : résultat après encrage et numérisation des impacts de grêlons.

1.2. Données atmosphériques

Les données atmosphériques sont issues des réanalyses européennes ERA5 (www.ecmwf.int). Elles sont disponibles sur la période de 1979 à 2019 à une résolution spatiale de 31 km. Dans cette étude, nous utiliserons les données horaires de pression atmosphérique au

niveau de la mer (PSM, en Pascal), les composantes méridiennes et zonales du vent à 2 mètres (U10 et V10, en m/s) et l'énergie potentielle de convection disponible (EPCD, en J/kg). Les réanalyses ERA5 sont détaillées par Hersbach (2016).

2. Résultats

Sur la période 2014-2018, les 36 chutes de grêles ont toutes été enregistrées entre avril et septembre. En effet, la période s'étalant du printemps à l'automne est propice la mise en place d'un fort gradient de température entre la surface réchauffée et de l'air froid d'altitude. Ces épisodes se sont surtout produits en mai (32%) et en juillet (28%). Les autres mois comptant chacun entre 5 et 10% des chutes de grêles. Cette distribution mensuelle bimodale est cohérente avec celle des chutes de grêles dans le sud-ouest de la France montrée par Berthet *et al*. (2013). Seuls deux épisodes de grêle se sont déroulés entre 11h30 et 13h30. Tous les autres se sont produits après 15h. Là encore, ce résultat est en phase avec les travaux de Berthet *et al*. (2013) et correspondent, à l'échelle quotidienne, au laps de temps nécessaire à un fort réchauffement de l'air de surface déclenchant une ascendance suffisamment forte pour atteindre des altitudes froides permettant le gel des gouttelettes d'eau.

L'EPCD moyen des épisodes de grêles en Bourgogne entre 2014 et 2018 montre logiquement une zone de convection de la masse d'air centrée sur la Bourgogne autour de 6°E et de 47°N avec des valeurs qui dépassent 300 j/kg (Fig.2). Il est intéressant de constater que ces valeurs correspondent généralement à celles d'orages de faible intensité et indiquent donc que les chutes de grêles en Bourgogne ne semblent pas forcément associées à des phénomènes atmosphériques locaux particulièrement violents. A une échelle plus large, la géographie de l'EPCD montre deux secteurs actifs du point de vue de la convection : une au niveau du Golfe du Lion et l'autre centré sur la Bourgogne. Ces deux secteurs sont presque reliés par colonne d'EPCD partant du Golfe du Lion et remontant vers la Bourgogne selon un axe sud-nord. Cette quasi connexion pourrait indiquer un possible rôle des masses d'air provenant de la Méditerranée dans la formation des chutes de grêles en Bourgogne.

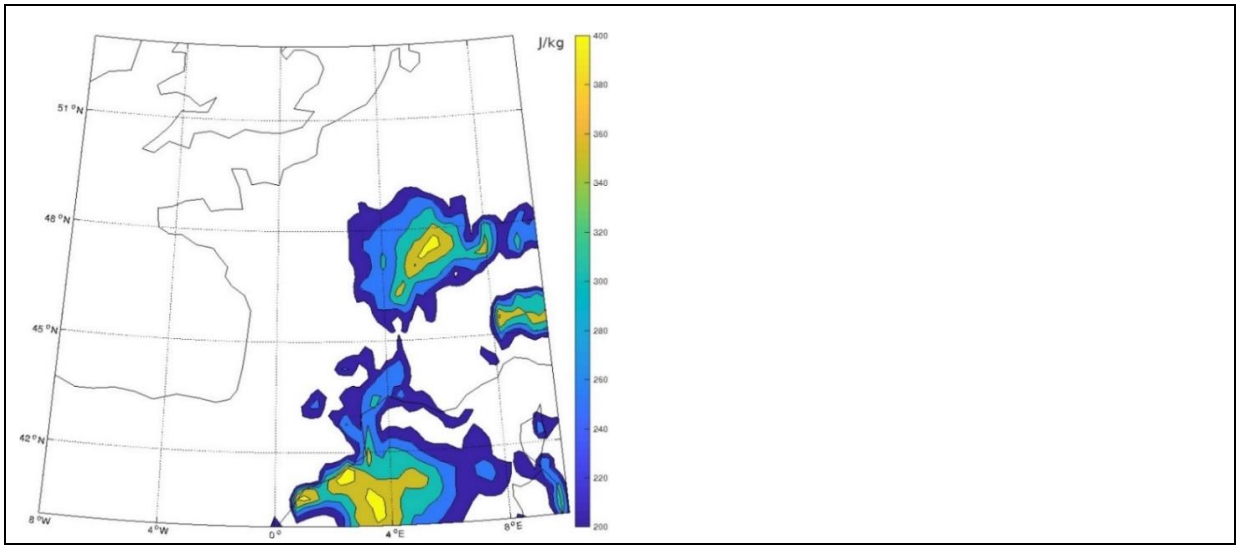


Figure 2. Energie potentielle de convection disponible moyenne (EPCD en J/kg) des épisodes de grêles en Bourgogne entre 2014 et 2018. Les valeurs sont calculées à l'heure de chaque épisode.

La figure 3 présente les anomalies barométriques moyennes des épisodes de grêles en Bourgogne. Leur géographie montre une forte et anomalie barométrique négative centrée sur l'Allemagne, couvrant le centre-ouest de l'Europe avec une extension traversant la France du nord-est vers le sud-ouest et s'étendant jusqu'au sud de l'Espagne. Cet axe d'anomalie

barométrique est spatialement en phase avec la colonne sud-nord d'énergie potentielle de convection disponible reliant le Golfe du Lion à la Bourgogne (Fig.2, 3). Ce phasage spatial témoigne d'une interaction évidente entre les conditions barométriques de surface et l'énergie potentielle de convection disponible. En effet, des basses pressions de surface peuvent indiquer une situation d'ascendance de la colonne d'air favorisant ainsi, si cette dernière est forte et que le gradient thermique vertical est important, le développement d'une énergie de convection potentiellement disponible et donc ~~de~~ la genèse d'un phénomène atmosphérique à forte libération d'énergie tels que les orages et/ou les chutes de grêles.

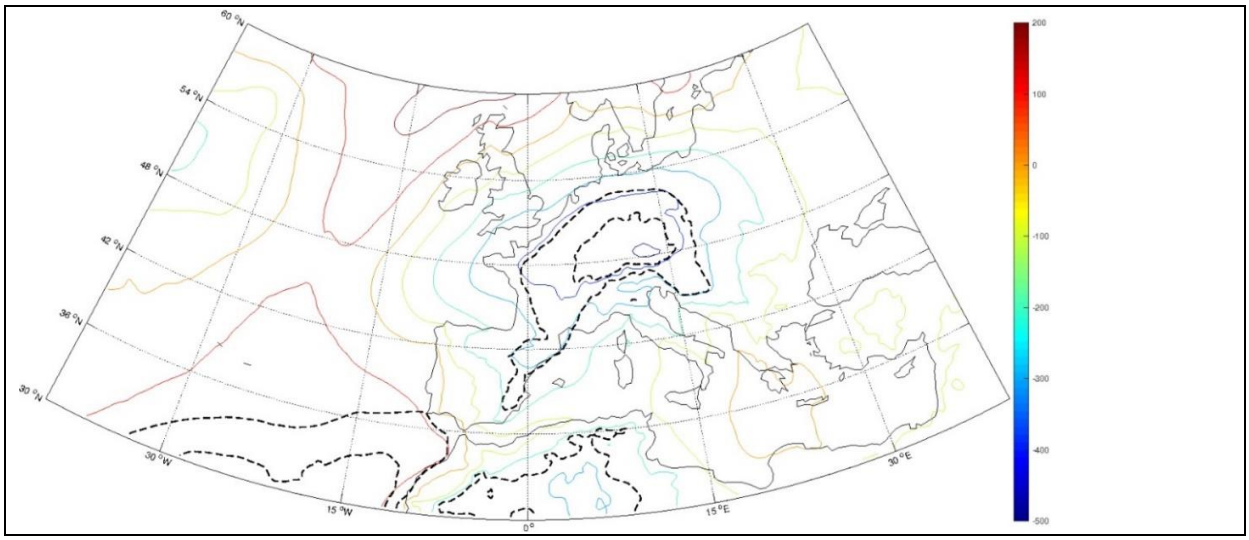


Figure 3. Anomalies de pression de surface (en Pascals) des épisodes de grêles en Bourgogne entre 2014 et 2018. Les valeurs l'anomalies sont calculées à l'heure de chaque épisode. En tirets, les anomalies significatives à 95% par un test en T de Student.

Le champ de vent moyen des épisodes de grêle en Bourgogne montre un puissant flux de secteur sud remontant du Golfe du Lion jusqu'au centre-est de la France en suivant une trajectoire sud-nord bien marquée (Fig.4). Le centre-est de la France est par ailleurs en même temps soumis à un léger flux de nord à nord-ouest. La Bourgogne est donc clairement ~~d'~~un secteur de confrontation de deux masses d'air thermiquement très différentes, notamment en raison du puissant flux méditerranéen de sud capable d'y advecter de l'humidité. Ce conflit de masse d'air est favorable à des conditions d'ascendance thermique d'une masse d'air chaud et humide, génératrice d'une forte énergie de convection potentiellement libérable *via* des phénomènes orageux et des chutes de grêles. Le golfe du Lion pourrait ici être qualifié de région source en énergie, ensuite advectée vers le centre-est de la France et la Bourgogne.

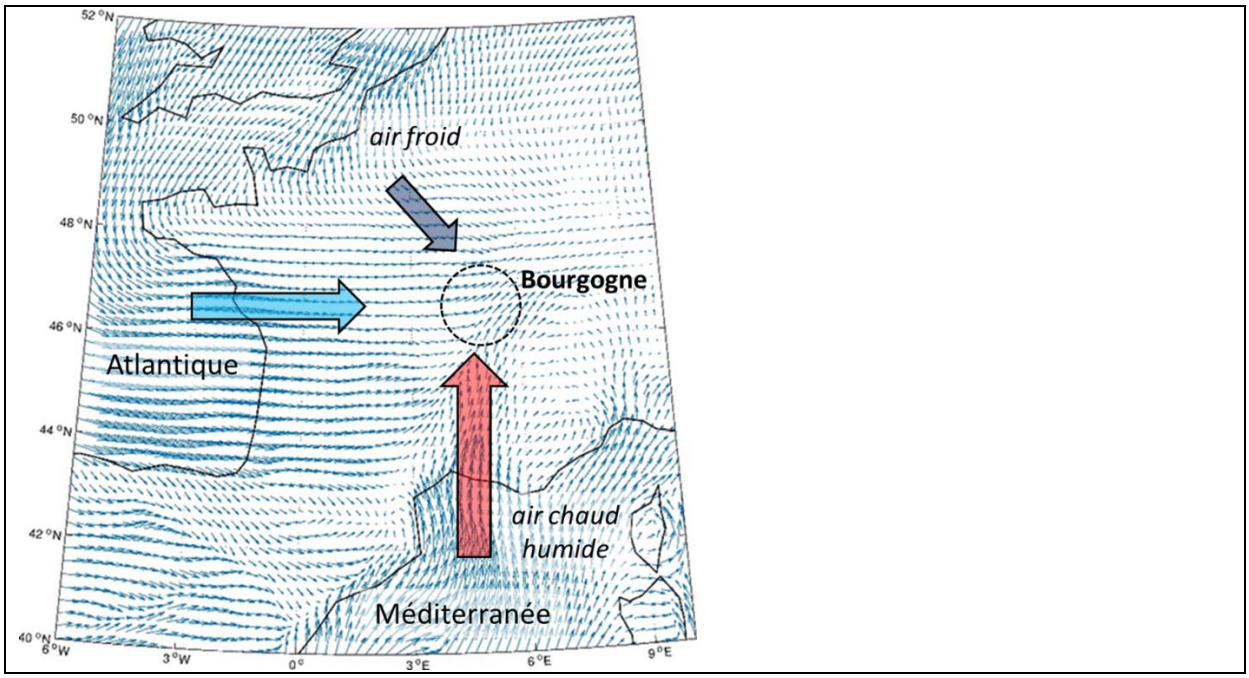


Figure 4. Vents moyens des épisodes de grêles en Bourgogne entre 2014 et 2018. Les valeurs moyennes sont calculées à l'heure de chaque épisode.

Conclusions et Discussion

Les chutes de grêles sont des phénomènes ponctuels très localisés et particulièrement brutaux. Ils sont également dépendants des conditions atmosphériques locales et notamment la quantité d'aérosols (Ilotoviz et Khain, 2014) Ces caractéristiques spatio-temporelles en font des évènements difficiles à appréhender du point de vue climatique. De plus les données de mesures disponibles sont rares et ponctuelles. La Bourgogne n'est par exemple équipée de grêlimètres que depuis 2014. Ce travail propose ici une toute première approche sur l'études de la dynamique atmosphérique multi-scalaire associée aux chutes de grêles en Bourgogne. Il en résulte que ces dernières sont principalement associées à un flux de secteur sud provenant du Golfe du Lion et à une forte anomalie barométrique centrée sur l'Allemagne et couvrant le centre-ouest de l'Europe. Ces vents de sud traversent la France selon un axe sud-nord jusqu'au centre-est du pays qui est par ailleurs soumis à des vents de nord-ouest. Il en résulte une zone de conflit de masse d'air thermiquement et hygrométriquement différentes, avec une importante ascendance et une énergie de convection pouvant être libérée sous forme orageuse et de chutes de grêles.

Des travaux supplémentaires ont été entamés, notamment sur les liens entre les chutes de grêles en Bourgogne et les régimes de circulation du domaine Nord-Atlantique. Les premiers résultats montrent que 60% des chutes de grêles en Bourgogne sont associées au régime de circulation de type *NAO*- généralement caractérisés par un flux de sud sur la France et bien documentés dans de nombreux travaux (Cassou *et al*., 2004, Ulllmann *et. al*., 2008). Ces liens montrent que des modes de circulation large échelle interagissent avec des conditions de circulation aux échelles de temps et d'espaces plus fines (méso-échelle, synoptique) et permettent de favoriser la mise en place des conditions météorologiques locales propices aux chutes de grêles. Sans pouvoir donner une information déterministe sur ces évènements dans un climat futur, étudier la dynamique atmosphérique multi-scalaire des chutes de grêles permettra d'estimer avec les modèles numériques du climat, en quelle mesure cette dynamique pourrait être impactée par le changement climatique.

Remerciements

L'association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques (ANELFA) est ici remerciée pour la mise à disposition des données numériques de chutes de grêles issues du réseau de grêlimètres installés en Bourgogne depuis 2014.

Bibliographie

Berthet C., Wesolek E., Dessens J., Sanchez J.L., 2013. Extreme hail day climatology in Southwestern France. *Atmsopehric Research*, 123, 139-150.

Berthet C., Dessens J., Sanchez J.L., 2011. Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France. *Atmospheric Research*, 100, 391-400.

Cassou C., Terray L., Hurell J., Deser C., 2004. North Atlantic climate regimes: spatial asymmetry, stationarity with time, and oceanic forcing. *Journal of Climate*, 17, 1055-3363.

Dessens J., Fraile R., Pont V., Sanchez J.L., 2001. Day-of-the-week variability of hail in southwestern France. *Atmospheric Research*, 59, 63-76.

Dessens J., Berthet C., Sanchez J.L., 2007. A point hailfall classification based on hailpad measurements: the ANELFA scale. *Atmospheric Research*, 83, 132-139.

Hersbach H., 2016. The ERA5 Atmospheric Reanalysis. *AGU Fall Meeting Abstract*.

Ilotoviz E., Khain A., 2014. Effect of Aerosols on Freezing Drops, Hail, and Precipitation in a Midlatitude Storm. Journal of the atmospheric science, 73, 109-144.

Lozowski E.P., Erb R., Wojtiw L., Wrong M., Strong G.S., Matson R., Long A., Vento D., Admirat P., 1978. The hail sensor intercomparison experiment. *Atmosphere-Ocean*, 16, 94-106.

Ullmann A., Moron V., 2008. Weather Regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 28, 159-171.

Vinet F., 2000. *Le risque-grêle en agriculture*. Technique et Documentation, Paris, 237p.

VULNÉRABILITÉ DES ÉTABLISSEMENTS HUMAINS ET STRATÉGIES D'ADAPTATIONS ENDOGÈNES DES POPULATIONS À L'ÉROSION PLUVIALE DANS LA VILLE DE COVÈ AU BÉNIN (AFRIQUE DE L'OUEST)

VIGNINOU T., ZANNOU P., ZOGLOBOSSOU B.

Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT) de l'Université d'Abomey-Calavi, UAC, Cotonou, Bénin (tousvigni@yahoo.fr)

Résumé : *La ville de Covè, avec une croissance démographique et spatiale rapide, est sujette à une érosion pluviale qui menace la durabilité de ses établissements humains. Cette étude vise à analyser la vulnérabilité de ces établissements humains et les stratégies d'adaptation développées par les populations face à l'érosion dans cette ville. Elle se réfère à une recherche documentaire et des enquêtes de terrain. Elles ont été collectées grâce aux entretiens avec les populations et aux observations faites sur le terrain à l'aide des outils appropriés. Les résultats obtenus montrent que le manque et la mauvaise gestion des ouvrages de drainage et l'occupation inappropriée de l'espace par les populations sont autant de facteurs qui expliquent l'état érosif avancé de la ville de Covè. Le sapement ou le déchaussement des fondations des maisons, de la fondation des poteaux électriques et la dégradation des voies sont quelques aspects visibles de ces effets dans la ville. Face à ces dégâts, les populations adoptent des stratégies d'adaptation endogènes.*

Mots clés : *ville de Covè ; érosion pluviale ; vulnérabilité ; stratégies d'adaptation ; Benin*

Summary: ***Vulnerability of human settlements and endogenous adaptation strategies of rain erosion populations in the city of Covè in Benin (west Africa).*** *The city of Covè, with rapid demographic and spatial growth is subject to rain erosion which threatens the sustainability of its human settlements. This study aims to analyze the vulnerability of these human settlements and the adaptation strategies developed by the populations in the face of erosion in this city. Documentary research and field surveys provided data and information related to the subject. They were collected through interviews with the populations and observations made in the field using the appropriate tools. The results obtained show that the lack and poor management of drainage works and the inappropriate occupation of space by the populations are all factors that explain the advanced erosive state of the city of Covè. The undermining or loosening of house foundations, the foundation of utility poles and the deterioration of the tracks are some visible aspects of these effects in the city. Faced with this damage, populations are adopting endogenous adaptation strategies.*

Key words: *City of Covè; rain erosion; vulnerability; adaptation strategies; human settlements*

Introduction

La dégradation de l'environnement béninois évolue au gré des conditions bioclimatiques et de l'action anthropique. Les éléments pluvieux extrêmes représentent un grand danger pour la société entière et plus particulièrement pour les agglomérations urbaines (Houndakinnou, 2006). Le développement des agglomérations conduit à une modification des cycles hydrologiques naturels, car de fortes proportions du territoire sont imperméabilisées, induisant de gros volumes de ruissellement lors des précipitations et empêche l'infiltration des eaux pluviales (Hirtz, 1992). Depuis quelques décennies, les villes béninoises sont soumises à l'érosion hydrique de plus en plus intense et une simple observation révèle l'ampleur de ces manifestations (Alagba, 2010).

La ville de Covè n'échappe pas à cette réalité. Ainsi, l'effet de l'accroissement de la ville de Covè et de la pression que la population exerce sur le milieu pour la satisfaction de ses besoins quotidiens accentue le phénomène de l'érosion. De même, l'extension de la ville sans un Schéma Directeur d'Aménagement favorise une occupation anarchique du sol rendant ainsi difficile le ruissellement des eaux pluviales. En effet, pendant la saison pluvieuse, les eaux de ruissellement provoquent le sapement et l'écroulement des maisons, dégradent considérablement le réseau des voies et charrient tout sur leur passage. Face à tous ces problèmes, les populations ont développé des stratégies d'adaptation.

La ville de Covè est située sur le plateau de Zagnanado. Elle est localisée entre 7°11'37'' et 7°15'42'' de latitude nord et entre 2°19' et 2°21'56'' de longitude est. Elle est limitée au nord par l'arrondissement de Naogon, au sud par l'arrondissement de Gounli, à l'est par les arrondissements d'Adogbé et Zogba et à l'ouest par l'arrondissement de Houen-Hounso (Fig.1). L'agglomération urbaine de Covè couvre 55 km2 (Mairie de Covè, 2004).

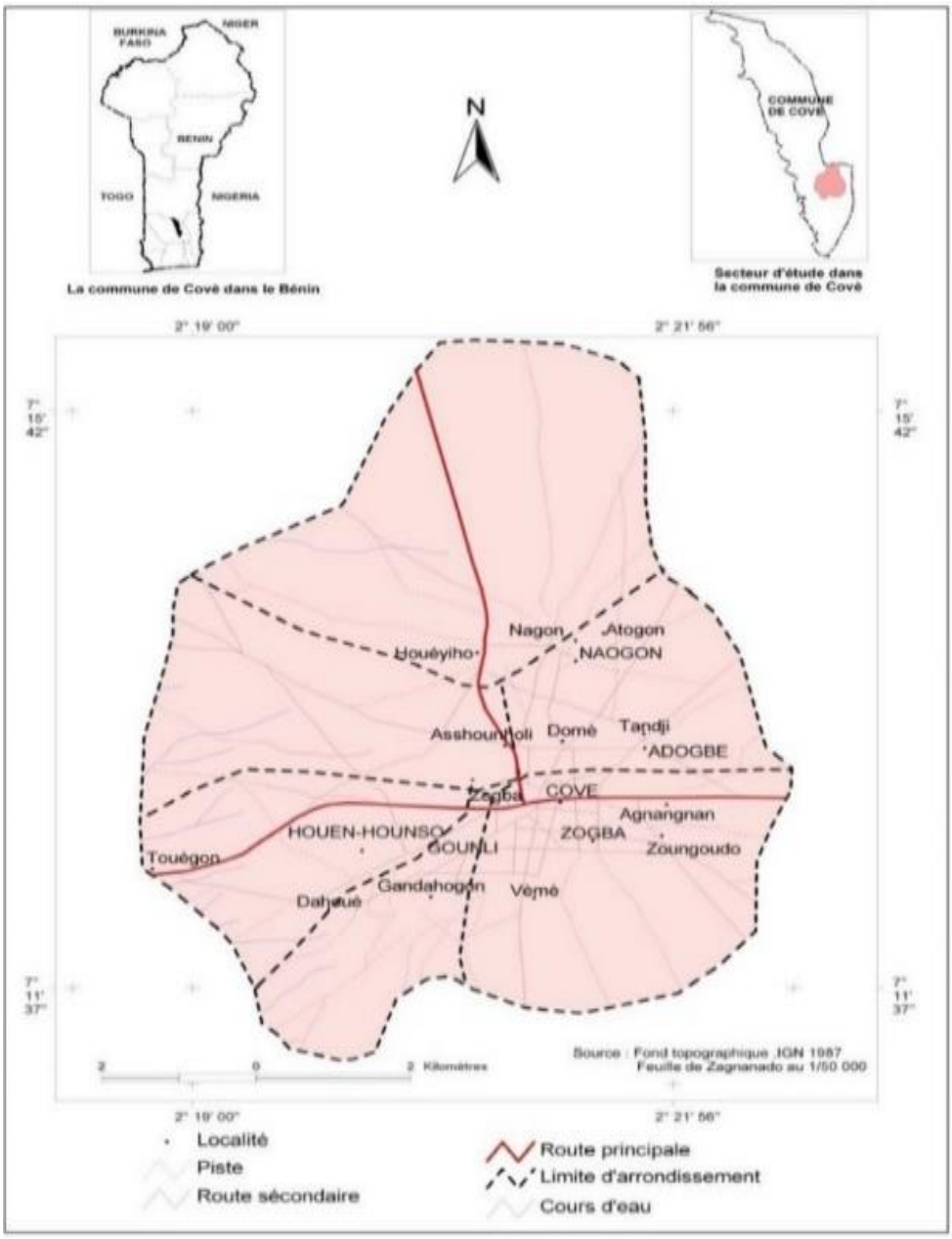


Figure 1. Situation géographique et administrative de la ville de Covè

1. Approche méthodologique

Les types de données utilisées dans le cadre de cette étude sont : les données climatologiques extraites des fichiers des stations de l'ASECNA-Cotonou sur la période 1981-2012et celles topographiques relatives au relief, aux systèmes de pente, etc. collectées à l'Institut Géographique National (IGN). Les enquêtes de terrain sont menées dans les quartiers Adogbé, Houen-Hounso, Gounli, Naogon et Zogba. Les critères de choix de ces quartiers reposent sur la base du nombre de ménages et de l'ampleur des manifestations du phénomène érosif sur l'environnement.

Au total, la taille de l'échantillon est de 254 ménages, soit 5 % de l'ensemble des ménages de ces cinq quartiers. En plus de ces ménages, le chef service de la planification et développement local de la mairie de Covè, les cinq chefs quartiers, le président de l'association de développement de la ville de Covè et cinq chefs traditionnels ont été interviewés.

Les techniques de collecte utilisées sont les observations directes, les enquêtes par questionnaire, les entretiens et le focus group. Les outils utilisés sont un double décamètre à ruban, une règle graduée et les piquets pour mesurer le déchaussement de la fondation des maisons et la profondeur des ravines. Un clisimètre a permis de mesurer les valeurs des pentes dans la ville. Les coordonnées géographiques des faits marquants ont été relevées par le GPS.

Le traitement des données a été possible grâce aux logiciels Excel 2007 et Map-Info, qui ont permis respectivement de faire les calculs et le traitement graphique (courbe et diagramme) et de faire le traitement cartographique. Certains indices tels que la vitesse de sapement des fondations, le volume de terre perdue, le rythme d'évolution des unités d'occupation du sol sont calculés pour analyser les résultats.

2. Résultats et discussion

2.1. Facteurs déterminants de l'érosion dans la ville de Covè

Il s'agit essentiellement des facteurs naturels et humains.

2.1.1. Facteurs physiques

La ville de Covè est sur un plateau monotone de 100 m d'altitude, légèrement incliné vers le Sud-est (Zoglobossou, 2010). La pente est relativement faible (0-5 %) dans les localités de Naogon, Adogbé et Zogba, par contre à Houen-Hounso et Gounli, la valeur des pentes est comprise entre 5 et 10 %. Ainsi, les eaux de ruissellement sont drainées essentiellement vers le sud-ouest. Les effets de l'érosion sont visibles à travers des rigoles et des ravines de taille moyenne avec de l'accumulation du sable.

Le régime pluviométrique est bimodal, avec un total annuel moyen de 1165 mm. C'est un facteur déterminant de l'érosion dans la ville. Djossou (2008) a montré que l'érosion dépend de l'intensité maximale des pluies qui déclenche le ruissellement, la durée des pluies et de l'humidité du sol avant la pluie. Les sols sont en grande partie ferrugineuxDes sols hydromorphes, noirs, argileux sont aussi rencontrés au sud, dans la localité de Houen-Hounso (Zoglobossou, 2010). Ces différents éléments physiques favorisent l'érosion hydrique dans la ville.

2.1.2. Facteurs humains

La population de Covè connaît un accroissement rapide, passant de 14 678 habitants en 1979 à 21307 au Recensement de 2002. Elle est estimée à plus de 30641 habitants en 2012 avec un taux d'accroissement annuel de 3,7 % environ. Cette croissance démographique entraîne l'implantation incontrôlée des habitations sur le site, la dégradation du couvert végétal, surtout en l'absence de planification spatiale), ce qui accentue le phénomène d'érosion dans la ville.

Tableau 1. Variation de l'occupation du sol de 2006-2010. (Source : CENATEL, 2013)

Unités du couvert végétal	**Superficie en 2006 (ha)**	**%**	**Superficie en 2010 (ha)**	**%**	**Evolution**
Champs et jachères	1425,516	51,82	1578,994	57,4	5,58
Champs et jachères sous palmier	231,956	8,43	0	0	- 8,43
Savane arborée et arbustive	644,554	23,43	0	0	- 23,43
Agglomération	406,866	14,79	1171,866	42,6	27,81
Formations marécageuses	41,968	1,53	0	0	- 1,53
Total	**2750,86**	**100**	**2750,86**	**100**	

Le tableau 1 qui présente la dynamique des unités d'occupation du sol dans la ville de Covè entre les années 2006 et 2010. Il en ressort que de 2006 à 2010, les champs et jachères sous palmier, les savanes arborées et arbustives et les formations marécageuses ont disparu au profit des agglomérations et des champs et jachères qui ont augmenté respectivement de 27,81% et 5,58%. Ces actions anthropiques ont accentué les problèmes de l'érosion dans la ville. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Kèkè (2002) dans la ville d'Abomey et Vigninou (2010) dans la ville de Porto-Novo.

2.2. Manifestation de l'érosion sur les habitations et les infrastructures publiques

La destruction partielle ou totale des habitations et des édifices urbains est le principal effet de l'érosion dans la ville de Covè. L'érosion affecte toutes les maisons et clôtures exposées au ravinement dans la ville de Covè (Fig.2).

(a) ***(b)***

Figure 2. Déchaussement des murs d'une maison (a) et d'un poteau (b) sous l'effet de l'érosion. (Prise de vue : Zoglobossou, août 2013)

La photo 1 montre une maison affectée l'érosion. L'eau de ruissellement entraîne le décapage progressif de la fondation des maisons et autres infrastructures socio-communautaires. Le processus de déchaussement survient après l'arrachement complet de la couche de terre protègeant la fondation des maisons par sapement ou ravinement. La vitesse de sapement calculée au niveau de cette maison à Houen-Hounso est évaluée à 5,24 cm/an.

Tableau 2. Etat de l'habitat des enquêtés dans la ville de Covè (Source : Enquête de terrain, mai 2013)

Etat de l'habitation	**Effectifs**	**Fréquences (%)**
Maisons en bon état	32	12,60
Maisons déchaussées	104	40,94
Maisons fissurées	46	18,11
Maisons en position de chute	45	17,72
Maisons effondrées	27	10,63
Total	**254**	**100**

Le tableau 2 montre l'état de l'habitation des enquêtés dans la ville de Covè. Il On déduit que l'érosion affecte 87,4 % des habitations visitées dans la villeet que seulement 12,6 % sont en bon état .. Cette dégradation ne cesse de s'aggraver en absence de toute mesure antiérosive. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Dansou (2012) dans la commune urbaine de Pobè.

A ces types d'incidences, s'ajoute le déchaussement des édifices de services publics. La photo 2 présente un poteau déchaussé, implanté à Zogba depuis 2001,. La mesure du sapement atteint 55 cm, ce qui a permis d'évaluer la vitesse du sapement du poteau à 4,58 cm/an. Selon les informations recueillies chez les agents de la SONEB, les tuyaux de distribution d'eau potable sont enterrés à plus de 80 cm dans le sol, mais ils sont actuellement à l'air libre surtout dans les quartiers de Zogba et Houen-Hounso, ce qi les expose aux risques d'éclatement.

Certains bâtiments publics tels que les salles de classe dans les établissement d'enseignement sont aussi touchés par l'érosion pluviale. De même, le marché de la ville, le ruissellement a

creusé de nombreuses rigoles.. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Djodjo (1996) et Dohou (2011), qui ont respectivement étudié la dégradation du site urbain à Dangbo et la vulnérabilité des infrastructures sociocommunautaires dans la ville de Porto-Novo. De même, Eténé (2005) et Gnanssounou (2005) ont trouvé des résultats similaires respectivement à Allada et à Bohicon.

La voirie dans la ville de Covè est composée dans l'ensemble de voies rechargées en terre latéritique, à part la voie principale qui reste le seul axe routier bitumé à Covè. Ces voies, dépourvues de caniveaux, subissent régulièrement les effets du ruissellement qui les rendent peu praticables. Agossou et Odoulami (1994), ont aussi montré que l'absence du réseau d'évacuation des eaux pluviales aggrave les effets de l'érosion sur le réseau routier dans la ville de Ouidah.

A Covè, la dégradation des voies, comme l'a montré Biaou (2007) dans la ville de Bopa, apparaît sous diverses formes, compte tenu de l'importance du ruissellement. Il s'agit des incisions, des rigoles et de ravines (Fig.3).

Figure 3. Incisions sur une rue à Zogba (a) et une ravine à Houen-Hounso (b) mise en place par l'érosion. (Prise de vue : Zoglobossou, mai 2013)

Ces manifestations témoignent de la forte intensité de l'érosion qui affecte les sols à Covè.. Les mesures directes faites sur la ravine à Houen-Hounso ont permis d'estimer le volume de terre perdue à 3,37 m3/an. L'érosion présente aussi des impacts socio- économiques. La dégradation de l'infrastructure routière entraîne des difficultés de circulation pour la population. En l'occurrence, a circulation pendant la nuit est risquée. En conséquence, les activités économiques sont ralenties. C'est un constat conforme à celui d'Agossa (2005) dans le bassin versant de Dra. Environ 87 % des enquêtés reconnaissent les effets néfastes de l'érosion sur leur cadre de vie. De même, 67 % des enquêtés ont reconnu que pendant les saisons pluvieuses, les populations ayant des maisons à Banco se sentent plus menacées. A l'approche des saisons pluvieuses, la population subit des malaises psychologiques.

2.3. Stratégies endogènes d'adaptation

Elles constituent les différents moyens développés par les populations pour atténuer les effets de l'érosion dans leur milieu. Ces méthodes consistent à protéger les bâtiments et les rues, par l La construction de terrasses ou d'escaliers pour renforcer la base des clôtures ou des bâtiments pour éviter le déchaussement des fondations. Cette technique est utilisée dans la plupart des établissements scolaires et le long des murs et des concessions qu'ils protègent. Pour cela, les populations placent tout le long et au bout des toits, des gouttières pour collecter et conduire les eaux de pluie dans les jarres, les tonneaux ou dans les citernes.

L'érosion a réduit le niveau de certaines rues en dessous de celui du de la cour des habitations. Dans d'autres cas, les ravins ont rendu pénible l'accès à ces concessions. Des dispositifs sont alors mis en place pour faciliter l'accès aux habitations. Pour dévier ou freiner la vitesse de l'eau de ruissellement, les populations alignent des pneus ou des sacs de sable dans les couloirs d'écoulement des eaux pluviales. Cette méthode stabilise les particules arrachées en amont par le ruissellement. La forme la plus grave des effets de l'érosion sur les habitations

est leur destruction partielle ou complète, surtout celles en banco. Ainsi, les populations utilisent des bois pour renforcer les murs en ruines.

Conclusion

Le présent travail a permis de montrer que l'érosion constitue un grand problème environnemental dans la ville de Covè, caractérisée par une extension spatiale rapide et un accroissement démographique important. Dans la ville, le sapement des fondations des habitations et des infrastructures engendre la démolition ou l'écroulement des bâtiments. Face à ces dégâts la population développe diverses stratégies pour pallier aux effets de l'érosion. Vu les limites de ces techniques endogènes, il est donc impérieux de rappeler aux acteurs principaux (Etat central, élus locaux et populations) que la durabilité des infrastructures socioco-mmunautaires dans la ville de Covè passe par l'application des études d'aménagement de la ville.

Bibliographie

Agossou I. & Odoulami L., 1994. *Hydrologie urbaine de Ouidah*. Mémoire de maîtrise de géographie, FLASH/UNB, 112 p.

Agossa K. C., 2005. *Contrôle du ruissellement et de l'érosion par l'amélioration des techniques de lutte antiérosives dans le bassin versant de Dra : commune de Djidja.* Thèse de doctorat, UAC/FSA, 87p.

Allagba M. A., 2010. *Impacts environnementaux des eaux pluviales dans la commune de Nikki.* Mémoire de maîtrise de géographie, FLASH/UAC, 84p.

Biaou W. B. C., 2007. *Effets des eaux de ruissellement sur les infrastructures dans la ville de Bopa*. Mémoire de maîtrise de géographie, FLASH/UAC, 75p.

Dansou B. S., 2011. *Erosion pluviale et adaptation des populations dans la commune urbaine de Pobè*. Mémoire de maîtrise de géographie FLASH/UAC, 89p.

Djodjo G., 1996. *La dégradation du site urbain de Dangbo : causes et impacts*. Mémoire de maîtrise de géographie, FLASH/UAC, 96p.

Dohou B., 2011. *Vulnérabilité des infrastructures sociocommunautaires à l'érosion pluviale dans la ville de Porto-Novo.* Mémoire de maîtrise en géographie, FLASH/UAC, 73p.

Eténé C., 2005. *Hydrologie urbaine d'Allada : Impact sur les infrastructures socioéconomiques*. Mémoire de DEA, EDP/FLASH/UAC, 77p.

Gnanssounou A., 2005. *Impact des eaux pluviales sur l'environnement de Bohicon*. Rapport pour l'obtention du brevet de technicien supérieur, UCAO, Cotonou, 53p.

Hirtz E., 1992. *Le ruissellement urbain à Porto-Novo : Cause et impacts.* Mémoire de maîtrise de géographie FLASH/UNB, 99p.

Houndakinnou G. R., 2006. *Fréquence des événements pluvieux extrême et impacts environnementaux dans la ville de Cotonou.* Mémoire de DEA, FLASH/UAC, 60p.

INSAE, 2004. Synthèse des analyses, RGPH3, Cotonou, 42p.

Kèkè E. E., 2002. *L'érosion pluviale en milieu urbain : cas de la commune d'Abomey : Aspect, impact et moyen de lutte.* Mémoire de maîtrise de géographie, FLASH/UNB, 83p.

Vigninou T., 2010. *La périurbanisation de Porto-Novo : dynamique et impacts environnementaux*. Thèse de Doctorat unique, UAC/EDP, 371p.

Vissin E. W., 2001. *Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger*. Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon, 52p.

Zoglobossou F. M. 2010. *Contribution à l'étude de l'assainissement dans la ville de Covè*. Mémoire de maîtrise de Géographie, FLASH/UAC, 75p.

ANALYSE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES JOURNALIÈRES DE 1980 À 2013 DE LA RÉGION DE LA MARAHOUÉ : APPORT DES CHAÎNES DE MARKOV D'ORDRE 1 ET 2

YAPI A.F.[1], OGA Y.M. S.[1], N'GUESSAN BI V.H.[1,2], KPAN O.J.G.[1], ALLECHY F.B.[1], BIEMI. J.[1,2]

1 Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire (yapiassaf@gmail.com)
2 Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université Felix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Résumé : *Les inondations et les sécheresses ont constituées durant ces dix dernières années un risque majeur dans les pays de l'Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire. L'objectif de ce travail est d'analyser, à partir des chaînes de Markov d'ordre 1 et 2, le mode d'occurrence et d'alternance des épisodes secs et humides dans la région de la Marahoué. La zone d'étude est une zone à forte activité agricole de type pluvial. La méthodologie utilisée est celle des chaînes de Markov à deux états d'ordre 1 et 2 en se basant sur les données pluviométriques journalières de 1980 à 2013.*
La probabilité initiale montre une forte occurrence des épisodes sècs au Nord et au Centre de la région avec respectivement 55% et 51%. Par contre, dans le Sud, une occurrence de 56% des épisodes humides est enregistrée. Les résultats de la méthode de Markov d'ordre 1 montrent que, la probabilité d'avoir un jour sec précédé d'un autre jour sec est plus élevée dans le Nord et le Centre de la Marahoué avec respectivement 75% et 73% d'occurrence. Cependant, avoir un état humide précédé d'un autre état humide est plus probable dans le Sud avec une occurrence de 76%. Selon la méthode de Markov d'ordre 2, l'occurrence d'avoir trois jours consécutifs non pluvieux dans la région de la Marahoué est plus probable avec une probabilité de 82% au Nord, 80% au Centre et 76% au Sud de la zone d'étude.

Mots clés : *occurrence pluviométrique ; chaînes de Markov ; Marahoué ; Côte d'Ivoire*

Summary: ***Analysis of daily rainfall data from 1980 to 2013 in the Marahoué region: contribution of Markov Chains of order 1 and 2.*** *Floods and droughts have been a major risk in West African countries, particularly in Côte d'Ivoire, over the last ten years. The objective of this work is to analyze, using Markov chains of order 1 and 2, the mode of occurrence and alternation of dry and wet episodes in the Marahoué region which is a zone of high agricultural activity of rainfed type based on daily rainfall data from 1980 to 2013.*
The initial probability shows a high occurrence of dry episodes in the North and Center of the region with respectively 55% and 51%, while in the South an occurrence of 56% of wet episodes is recorded. The results of the Markov method of order 1 show that the probability of having a dry day preceded by a dry day is higher in the North and in the Centre of Marahoué with respectively 75% and 73% of occurrence. However, having a wet state preceded by a wet state is more likely in the South with an occurrence of 76%. According to the Markov method of order 2, the occurrence of having three consecutive non rainy days in the Marahoué region is more likely with a probability of 82% in the North, 80% in the Center and 76% in the South of the study area.

Key words: *rainfall occurrence ; Markov Chains ; Marahoué ; Côte d'Ivoire*

Introduction

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes dans les basses latitudes. Depuis quelques décennies, sous l'effets des changements climatiques, les évènements pluviométriques ne sont plus maitrisés par les populations paysannes (Brou *et al.*, 2005). Cette situation a attiré l'attention de la communauté universitaire (Ardoin *et al.*, 2003, Ardoin, 2004 ; Kouassi *et al.*, 2008). Les manifestations se traduisent par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires, mais également par de phases successives ou alternatives d'excédents et de déficits hydriques. les conséquences de ses manifestations peuvent être durables sur le cycle hydrologique, surtout lorsqu'elles se traduisent par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau (Afouda *et al.*, 2001). L'objectif de cette étude est d'analyser, à partir des chaînes de Markov d'ordre 1 et 2, le mode d'occurrence et d'alternance des épisodes secs et humides dans la région de la Marahoué qui

est une zone à forte activité agricole de type pluvial en se basant sur les données pluviométriques journalières de 1980 à 2013.

1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située au centre-ouest de la Cote d'Ivoire entre les longitudes 5°15 et 6°30 Ouest et les latitudes 6°00 et 8°00 Nord (Fig.1). Le Climat est de type baouléen et caractérisé par deux grandes saisons alternées par deux petites : une grande saison sèche (de décembre à fin février), une grande saison de pluie (de mars à juin), une petite saison sèche (de juillet à août) et une petite saison de pluie (de septembre à novembre) ; (Irié *et al.*, 2015). La région est drainée par le fleuve Bandama rouge qui fait office de frontière naturelle sur le côté Est, ensuite la Marahoué qui traverse la majeure partie de la zone d'étude.

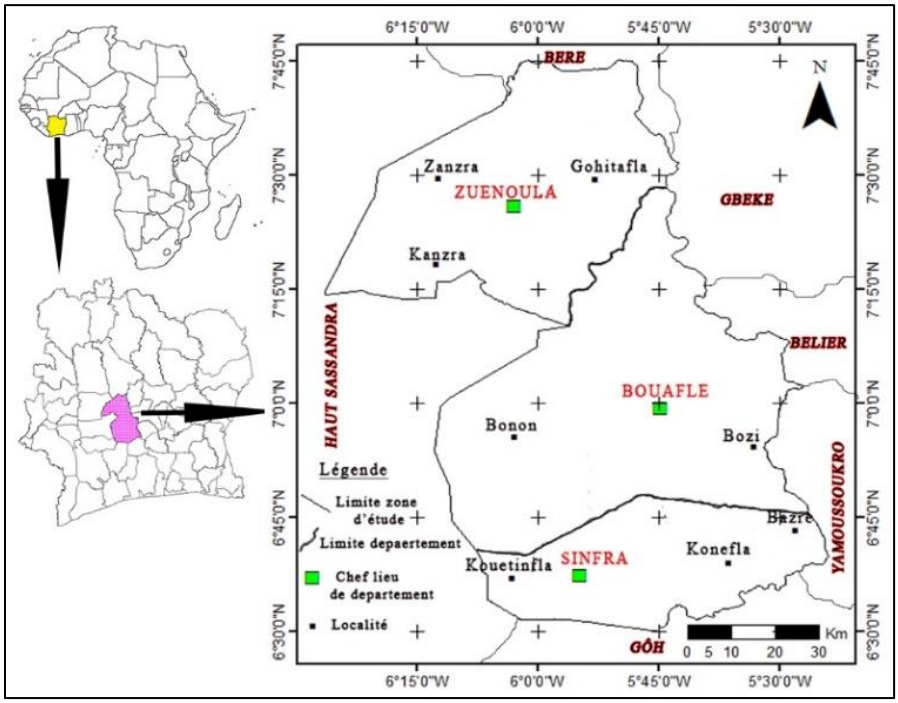


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude

2. Données et Méthodes

2.1. Données et Logiciels

Pour cette étude, les données pluviométriques journalières de 30 stations couvrant la région de la Marahoué pour une période de 34 ans allant de 1980 à 2013 ont été utilisées. Ces données sont obtenues à partir du référentiel de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR) du Centre national de prévision environnementale (NCEP) et sont disponibles sur le site Web Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (http://globalweather.tamu.edu/).

2.2. Méthodes

Les conséquences des effets des changements climatiques peuvent être durables surtout lorsqu'elles se traduisent par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau. D'où l'importance d'appliquer les modèles markoviens qui sont un outil mathématique issu des probabilités et qui ont pour avantage d'exprimer les probabilités conditionnelles de passage de l'état précédent (jour précédent) à l'état de la journée en cours (Meddi et Meddi, 2009). De plus, les chaînes de Markov tiennent compte de la liaison entre les jours successifs et permettent de traiter les problèmes à information incertaine ou incomplète (Dequier, 2003). Les modèles

de Markov sont très utilisés pour modéliser de nombreux phénomènes naturels à savoir l'évolution des température journalières, les champs de précipitations journalières (Lazri *et al.*, 2007 et N'Guessan Bi *et al.*, 2014).

La méthodologie utilisée est donc basée sur les chaînes de Markov à deux états d'ordre 1 et 2, il s'agit de l'état pluvieux (P) et sec (S) d'un jour. Cette méthodologie est appliquée au Nord à la station de Zuénoula, au centre à la station de Bouaflé et au Sud à la station de Sinfra.

Les protocoles statistiques des outils de Matlab et XLSTAT 2019 ont été utilisés pour les calculs statistiques et l'analyse markovienne du champ de précipitations journalière.

2.2.1. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 1

Une chaîne de Markov du premier ordre, l'état de la variable *E(t)* à l'instant *t* ne dépend que de son état à l'instant (*t-1*). Ainsi, nous avons quatre situations (équation 1) :

$$\left.\begin{array}{l} P_{00} = [\Pr\,(E(t+1)=0]/[E(t)=0];\ P_{01} = [\Pr\,(E(t+1)=1]/[E(t)=0] \\ P_{10} = [\Pr\,(E(t+1)=0]/[E(t)=1];\ P_{11} = [\Pr\,(E(t+1)=1]/[E(t)=1] \end{array}\right\} \quad \text{(Eq.1)}$$

où Pij est la probabilité d'aller à l'état j sachant qu'on se trouve à l'état i. Ces probabilités ont été calculées en utilisant la relation de l'équation 2 :

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \text{ avec i et j = 0 ou 1} \quad \text{(Eq.2)}$$

où N_{ij} est le nombre de transition de l'état i à l'état j et N_i le nombre de transitions de l'état i vers tout autre état.

2.2.2. Chaîne de Markov à deux états d'ordre 2

Une chaîne de Markovd'ordre 2, l'état de la variable E(t) à l'instant t dépend de son état E(t-1) à l'instant (t-1) ainsi que de son état E(t-2) à l'instant (t-2). La probabilité d'avoir cet état peut s'écrire selon l'équation 3 :

$$P_{ijk} = \Pr(E(t) = k \,/\, E(t-1) = j,\ E(t-2) = i) \quad \text{(Eq.3)}$$

où P_{ijk} représente la probabilité conditionnelle d'avoir un double d'états (j, k) succédant au doublet d'états (i, j) et i, j k =0 ou 1. Cette probabilité est calculée en utilisant la relation de l'équation 4 :

$$P_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{ij}} \quad \text{(Eq.4)}$$

où N_{ijk} est le nombre de transitions du doublet d'états (i, j) au doublet d'états (j, k).

3. Résultats

Les résultats obtenus sont présentés en deux parties. La première partie présente les résultats obtenus en utilisant l'hypothèse des chaînes de Markov d'ordre 1, tandis que la deuxième partie mettra en évidence les résultats de l'application des chaînes de Markov d'ordre 2. Les probabilités initiales obtenus, en appliquant la chaîne de Markov d'ordre 1 à deux états (jour pluvieux (P) et jour sec (S)) décrite précédemment pour le Nord, le Centre et le Sud de la région d'étude, sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Probabilités initiales obtenues du modèle de Markov d'ordre 1

Probabilités initiales (%)	**Zuénoula**	**Bouaflé**	**Sinfra**
État pluvieux (P)	0,45	0,49	0,56
État sec (S)	0,55	0,51	0,44

La probabilité initiale montre une forte occurrence des épisodes sècs au Nord et au Centre de la région avec respectivement 55% et 51%, par contre dans au Sud une occurrence de 56% des épisodes humides est enregistrée.

3.1. Résultats du modèle markovien d'ordre 1

Les probabilités de transitions d'un état à un autre état calculées à partir de la chaîne de Markov d'ordre 1 sont mentionnées dans le tableau 2.

Tableau 2. Probabilité de transition d'ordre 1

	Probabilité de transition (%)			
	PP	**PS**	**SP**	**SS**
Zuénoula	70	30	25	75
Bouaflé	71	29	27	73
Sinfra	76	24	31	69

De l'analyse de ce tableau 2, il ressort que la probabilité d'avoir un jour sec précédé d'un jour sec est plus élevée dans le Nord et dans le Centre de la Marahoué avec respectivement 75% et 73% d'occurrence. Alors qu'au Sud dans la localité de Sinfra, cette probabilité est de 69%. Dans la région de la Marahoué, si un jour est pluvieux, la probabilité qu'il soit suivi d'un jour sec est plus importante au Centre et au Nord avec respectivement 29% et 30% d'occurrence. Cette probabilité est plus faible dans le département de Sinfra avec 24% d'occurrence. Cependant avoir un jour humide précédé d'un jour humide est plus probable dans le Sud avec une occurrence de 76%.

3.2. Résultats du modèle markovien d'ordre 2

Dans le cas du modèle markovien d'ordre deux, la matrice de transition de chaque zone d'étude a été calculée en utilisant la relation de l'équation 4. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3. Des résultats, il ressort que la probabilité pour que deux jours secs successifs soient suivis d'un jour pluvieux est moins important dans le Centre et au Nord de la Marahoué. Cependant cette probabilité est plus importante dans les localités Sud de la région.

Tableau 3. Probabilité de transition d'ordre 2

	Probabilité de transition (%)							
	SSP	**SSS**	**SPP**	**SPS**	**PSP**	**PSS**	**PPP**	**PPS**
Zuénoula	18	82	63	37	45	55	73	27
Bouaflé	20	80	65	35	46	54	74	26
Sinfra	24	76	70	30	49	51	77	23

La probabilité pour que ces deux jours secs successifs cités ci-dessus soient suivis d'un jour sec, est très importante dans le Centre (82%) et le Nord (80%), mais plus faible dans le Sud. La probabilité pour qu'une séquence composée d'un jour sec suivi d'un jour pluvieux soit suivi d'un jour pluvieux, est d'une importante occurrence au Sud (70%) et moins importante au Centre (65%) et au Nord (63%). La probabilité pour que cette séquence citée ci-dessus soit suivi d'un jour sec est forte au Nord (37%) et au Centre (35%) et moins importante au Sud (30%).

Dans la région de la Marahoué la probabilité d'avoir un jour pluvieux suivi d'un jour sec et d'un jour pluvieux (PSP) est importante à Sinfra (49%) et moins importante à Bouaflé (46%)

et à Zuénoula (45%). La probabilité d'avoir un jour pluvieux suivi de deux jours secs successifs est de 55% à Zuénoula, de 54% à Bouaflé et de 51% à Sinfra.

La probabilité d'avoir trois jours pluvieux successifs (PPP) est plus importante au Sud (77%), cette probabilité est de 74% à Bouaflé et 73% de Zuénoula.

Conclusions et Discussion

Les données pluviométriques journalières utilisées pour cette étude sont issues à partir du référentiel de réanalyse du système de prévision climatique (CFSR) du Centre national de prévision environnementale (NCEP). Plusieurs auteurs ont déjà utilisé ces données dans leurs travaux afin de mettre en évidence les caractéristiques de certains parametres climatiques (Fuka *et al.*, 2013; Stopa et Cheung, 2014). Dans le processus de définition de l'évènement pluvieux, un seuillage est appliqué et varie d'une étude à une autre, soit 0,85 mm ou 1 mm comme plusieurs travaux (Barron *et al.*, 2003; Seleshi et Camberlin 2005 en Afrique; Groisman et Knight, 2008 aux Etats Unies d'Amérique; Zolina *et al.*, 2013 en Europe). Dans la présente étude le seuil utilisé est de 1 mm, ainsi un jour est considéré pluvieux lorsque la quantité de pluie tombée est superieure à 1 mm comme l'ont considéré Froidurot et Diedhiou (2017) dans leurs travaux. L'approche méthodologique basée sur les modèles probabilistes dans cette étude pour décrire les épisodes humides et secs a également été utilisée dans les travaux de Tolika et Maheras (2005). Les travaux de cette étude ont nécessité l'utilisation des modèles de Markov d'ordre 1 et 2 à deux états (pluvieux et secs). Meledje *et al.*, (2015) ont proposé une approche markovienne pour caractériser des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana à l'aide des modèles de Markov d'ordre 1 et 2 à partir des données de pluies. N'GUESSAN Bi (2011) a également utilisé cette méthodologie markovienne dans son étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans le département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) en se basant sur des données pluviométriques journalières de 1966 à 2000.

Cette étude a permise de mettre en évidence la forte probabilité d'avoir des jours consécutifs secs dans les localités situées au Nord de la région, alors que dans les localités du Sud, l'occurrence d'avoir des jours successifs pluvieux est plus importante.

Remerciements

Remerciement au Laboratoire Mixte Internationale (LMI) Nexus Eau-Climat-agriculture-Energie pour son soutien financier lors de la réalisation de cette étude.

Bibliographie

Afouda A, Bouchez JM, Braud I, Cazenave F, Depraetere C., 2001. Variabilité climatique et variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest : Un système couplé. Atelier sur le Couplage des modèles atmosphériques et hydrologiques (conférence), Toulouse, France.

Ardoin S., Lubes-Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J.-F., 2003. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. no. 278, 223-228.

Ardoin-Bardin S., 2004. *Variabilité hydroclimatique et impact sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne.* Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II, France, 440p.

Barron J., Rockstrom J., Gichuki F., Hatibu N., 2003. Dry spell analysis and maize yields for two semiarid locations in East Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 117, 23-37.

Brou Y. T., 2005. *Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, 212p.

Dequier J., 2003. *Chaîne de Markov et application*. Mémoire de probatoire en informatique, Université de Grenoble, France. 35p.

Froidurot S. & Diedhiou A., 2017. Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system. *Atmospheric Science Letters*, 18, 125-131.

Fuka D. R., Walter M. T., MacAlister C., Degaetano A. T., Steenhuis T. S., Easton Z. M., 2013. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrol. Process*. 28, 5613-5623

Groisman P.Y., Knight R.W., 2008. Prolonged dry episodes over the conterminous United States : New tendencies emerging during the last 40 years. *J. Clim*. 21 (9), 1850-1862.

Irie G. R., Soro G. E. & Goula B. T. A., 2015. Changements d'états de surface et évolutions spatio-temporelles des précipitations sur le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13(2), 386-397.

Kouassi A. M., Kouamé K. F., Goula B. T. A., Lasm T., Paturel J. E. & Biémi J. 2008. Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Rev Ivoir. Sci. Technol*., vol. 11, 207-229.

Lazri M., Ameur S., Haddad B., 2007. Analyse de données de précipitations par approche markovienne. *Larhyss Journal*, 6, 7-20.

Meddi H., & Meddi M., 2009. Étude de la persistance de la sécheresse au niveau de sept plaines algériennes par utilisation des chaines de Markov (1930-2003). *Courrier du Savoir*, 9, 39-48.

Meledje NDH, Lazare Kouassi K, N'Go YA, Savane I., 2015. Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov. *Cah Agric24*, 186-97. Doi :10.1684/agr.2015.0755.

N'guessan Bi V. H., 2011. Étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau : application à l'analyse du risque d'inondation dans le département de Sinfra. (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Programme international de formation sur le changement climatique, atténuation et adaptation 2010-2011.

N'guessan Bi V. H., Saley M. S., Pop S., Terebech R., Bogdan B., Djagoua E.V., Kouame F, Borda M., Affian K., 2014. Markovian approach for analysis and prediction of monthly precipitation field in the department of Sinfra (Central-west of Côte d'Ivoire). *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2(1), 34-49.

Seleshi Y., Camberlin P., 2005. Recent changes in dry spell and extreme rainfall events in Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, vol 83, 181-191.

Stopa J. E., Cheung K. F., 2014. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean modelling*, 75, 65-85.

Stopa J. E., Cheung K. F., 2014. Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling*, vol 75, 65-83.

Tolika K., Maheras P., 2005. Spatial and temporal characteristics of wet spells in Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, vol 81, 71-85.

Wang W., Xie P., Yoo S-H., Xue Y., Kumar A. & Wu X., 2011. An assessment of the surface climate in the NCEP climate forecast system reanalysis. *Climate Dynamics*, 37, 1601-1620.

INDEX DES AUTEURS

ABDMOULEH M., **19**
ACQUAOTTA F., 91, 325
ADETONA L., 25
ADIGBEGNON M., **25**
ADJIZIAN GERARD J., 199
ADLER B., 541
AFFIAN K., 37
AKOGNONGBE A.J.S., 403
ALAO CHABI CHAFFA A.R., 679
ALI R.K.F.M., **31**
ALLECHY F.B., **37**, 709
ALONSO L., **43**, 577
AMORIM A.T., **55**
AMORIM M.C.C.T., **49**, 433, 475
AMOUSSOU E., **61**, 25, 403, 415, 679
AMYAY M., 259
ANAGNOSTOPOULOU C., 685
ANDRIAMAMPIHANTONA F., 571
ANDRIAMASIMANANA R.H., 691
ANDRIAMIFIDY M.A., 571
ANJOS M., **67**
ARAÚJO A., **73**
ARVOR D., 337
ATIDEGLA S.C., **79**
AVAHOUINC N.N., 25
AZZOUZ R., 295

BADARO SALIBA N., 499
BADRI W., 619
BARAER F., 427
BARBOSA H.P., **85**, 667
BARONETTI A., **91**, 325
BATAILLE M.P., 97
BEAUVAIS F., **97**
BEN HAMMOUDA A., **103**
BEN JALLOUL M., 103
BENARICHA B., 109
BENTALEB H., 445
BENZATER B., **109**
BENZIOUCHE S.E., 295
BERNARD J., **115**, 595
BERNIK A., 529
BERNUS S., 247, 637
BERREDJOUH D., 295
BERTHET C., 697
BEZERRA B., 505
BIEMI J., 709
BIGOT S., **121**, 541, 601
BITAR H., 499
BODENAN P., 595
BOGAN E., 181
BOIS B., 343, 517
BOKO M., 61
BONNARDOT V., **127**, 163, 319, 427, 457,

BOUAICHE A., **133**, 445,
BOUAZIZ R., 157
BOUIMETARHAN I., 265
BROGNIEZ H., 469
BROU Y.T., 121
BRUNEL-MUGUET S., 97
BUISSON E., 421

CAMBERLIN P., 541
CANTAT O., 97, 187
CAPDEVILA L., 163
CARLIER J., 421
CARVALHO J.W.L.T., 223
CASTEL T., 541
CASTELHANO F.G., **139**
CAVICCHIOLI A., **145**
CHABI A.B.P., 349
CHAIR M., 133, 445
CHANIAL M., **151**
CHARFI S., **157**, 169
CHARMONT C., **163**
CHAUMONT M., 529
CHEBLI M., **169**
CHELU A., **175**
CHEPFER H., 469
CONSTANTIN (OPREA) D.M.,**181**
CORRE L., 427, 637
COTONNEC A., 259

DA SILVA M., 529,
DAHECH S., 19, 169, 205, 289,
DAVID M., **187**
DE RESSEGUIER L., **193**
DECAULNE A., 553
DIAB L., **199**
DIALLO M., **205**
DIEDHIOU A., 61
DJELLOULI Y., **211**
DJOHY L., **217**
DJOSSOU J.-M., 517
DOREGO G.S., 643
DOS SANTOS I., **223**, 313
DOUTRELOUP S., **229**
DROGUE G., **235**, 367
DROUIN A., 247
DUBREUIL M., 643
DUBREUIL V., **241**, 49, 85, 91, 175, 313, 337, 427, 487, 505, 589,
DUBUISSON B., 247
DUCHE S., 601
DUFOUR C., 469
DUMAS D., 121
DUMAS G., **253**
DUPUIS V., 451

EL BOUHALI A., **259**
EL GHACHI M., 265, 271,
EL HAWARI J., **265**
EL MOULOUDI M., 361
EL ORFI T., **271**
ELOUISSI A., 109
ELY D.F., 439
ERPICUM M., 229
ESPINOZA J.-C., 337
ESSALEK B., **277**
ETENE C.G., **283**
EUCHI H., **289**

FACI M., **295**
FALL M.M., 643
FALLOT J.-M., **301**
FALZOI S., 325
FATHI M., **307**
FEKI M., 157
FERREIRA E., 73
FERREIRA H., 73
FERRER M., 319, 649
FETTWEIS X., 229
FINK A., 541
FLORANCE V., 301
FOISSARD X., 241, 601
FORIGO Y., 67
FORTIN G., **313**
FOUGRACHE H., 619
FOURMENT M., **319**, 649
FOUVET A.-C., 601
FRATIANNI S., **325**, 91
FRERE M., **331**
FUNATSU B.M., **337**

GAILLARD H., 97
GAMERO P., 439
GARZENA D., 325
GAVRILESCU C., **343**
GÉRARD P.C., 499
GERMAIN D., 313
GIBIGAYE M., **349**
GILLE E., 259
GONZÁLEZ-HIDALGO J.C., 91
GOUDARD G., **355**, 313
GOUGET V., 637
GRIGORE E., 181
GROENEVELD J., 265
GROSSE C., 697
GUENZI D., 325
GUERNOUTI S., 595

HANCHANE M., **361**
HASSANI N., **367**, 235
HEITZ D., 421
HENDEL M., 151, 331, 529
HIDALGO J., 253
HOLOBÂCĂ I.H., 553
HORVÁTH C., 553
HOTEA M., 553
HOUNDENOU C., 61, 403, 679
HOUNGNIBO K., 25
HOUNMENOU C., 79
HSAINE M., 619

IENSEN I.R.R., 223
ILMEN R., 361
IOANA-TOROIMAC G., 175, 181
IRIMIA I.M., 535

JIMÉNEZ-BELLO M.A, 625
JOLY D., **373**
JUVANON DU VACHAT R., **379**

KARAMBIRI B.L.C.N., **385**
KARROUK M.S., **391**, 133, 307, 445,
KASTENDEUCH P., **397**, 547
KERAVEC P., 115
KERDONCUFF M., 637
KHARFALLAH N., 295
KNIPPERTZ F., 541
KODJA J., **403**
KOELLING M., 265
KOHLER M., 541
KONAN K.C., **409**
KONE A.B., 37
KONTE O., 643
KOOKE G.X., 517
KOUADIO K.C.A., 61
KOUAME Y.M., 61
KOUMASSI H.D., 79
KOUNGBANANE D., **415**
KOUNKOU-ARNAUD R., 529
KPAN O.J.G., 709
LANDOLFI DE CARVALHO J., 313

LE CAP C., **421**
LE GOUEE P., 97
LE ROUX R., 493, 625
LEBAUT S., 259, 271, 367
LEMASLE P.G., 493
LIGNEAU L., **427**
LIMA A.P., **433**
LIMBERGER L., **439**, 355
LONG F., 529
LOTFI N., **445**, 133
LOUAIL A., 211

MACHERA F., 685
MADELIN M., **451**, 601
MADELINE P., 97
MAHE G., 62, 403
MAHERAS P., 685
MALOBA MAKANGA J.D., 541
MANCEAU L., 235
MANGILI B., 439
MANZANO J., 625
MARCHAND J.-P., **457**
MARISCAL A., 541
MARTIN N., **463**
MARY S., 193
MASSON V., 253
MEDJKANE M., 97
MELLO-THÉRY N.A., 145
MENDONÇA F., 67, 355, 523, 589
MESSNER F., 211
MICHOT V., **469**, 337
MILANI T.S., **475**
MJEJRA M., **481**, 607
MONTAUBAN O., 547
MOREIRA A.B., **487**
MOREL B., 541
MORILLE B., 115, 595
MORIN G., **493**
MORON V., 541
MOUHAMAD ALI S., **499**
MUSY M., 595
MUTTI P., **505**

N'DA K.C., **511**
N'GUESSAN B.V.H., 37, 709
N'ZUE K.A., 511
NABUCET J., 241
NAHLI A., 277
NAJJAR G., 397, 547
NOBREGA R.S., 487
NOUACEUR Z., 199

OBAHOUNDJE S., 61
ODJOUBERE J., **517**
OGA Y.M. S., 709
ORTIZ PORANGABA G.F.O., 631
OSCAR JÚNIOR A., **523**

PANTE G., 541
PARISON S., **529**, 151
PARUKE L. 235
PATRICHE C.V., **535**
PATUREL J.E., 402
PELLARIN T., 441
PEREIRA DE FREITAS J.C., 631
PEREIRA L., 73
PERGAUD J., 541
PETITJEAN T., 193
PHILIPPON N., **541**, 121

PHILIPPS N. **547**, 397
PIERI P., 193
PINTO J.E.S.S., 139
PIROLI E.L., 55
PLANCHON O., 187, 343
PONS R., 193
POP O.T., **553**
POPOV H., **559**
PREUX T., 97

QADEM A., 259
QUENOL H., 127, 241, 421, 293, 661

RĂCHITĂ I.G., 553
RAMBOARISON R., 121
RAMIANDRISOA B.A., 673
RANAIVOJAONA S.B., **565**, 691
RANARIJAONA H., 673
RANARIJAONA H.L.T., 565
RANDRIAMIFIDISON R.F.A., **571**, 691
RANDRIANJAFY V.R., 691
RANDRIANJATOVO S., 691
RAZANAKA S., 121
REDDAD H., 265
REGA M., 343
REJO-FIENENA F., 571
RENARD F., **577**, 43
RIAHI M., **583**,
RICHARD Y., 343
ROCHA G., **589**
RODLER A., **595**, 115
ROLLET A.-J., 313
ROME S., **601**
RONCHAIL J., 337
ROSEGHINI F.W., 313
ROUAMBA S., 613
ROUE-LE GALL A., 667
ROUMANI M., 295
ROYON L., 152, 331

SALLENT A., 97
SALOUI A., 619
SAMAALI M., 481
SAMAALI H., **607**
SAMBA G., 541
SAMBOU P.C., 643
SANOU K., **613**
SANT'ANNA NETO J.L., 433
SCHMENGLER M., 439
SEBBAR A., **619**
SGHIR S., 367
SIRNIK I., **625**
SOARES DA SILVA M.H., **631**
SOME W., 613
SOME Y. S. C., 613
SOMOT S., 637
SOUBEYROUX J.-M., **637**

SOUNON BOUKO B., 217
SOUSA G.S., 433
SOW O.C., **643**
SULTAN B., 511
SY B.A., 205

TACHINI R., **649**, 319
TENTE A. B. H., **655**, 517
THAO S., 469
THIBAULT J., **661**
THOMAS A., 241
THOMAS M.-F., **667**
TILLY S., 427
TIŞCOVSCHI A.A., 181
TISSOT C., 661
TNOURJI H., 133, 445
TOCQUER F., 637
TOLIKA K., 695
TOMBOANONA S., **673**, 691
TOTIN VODOUNON S.H., **679**, 25, 61, 415, 679
TOURE K., 643
TRA BI Z.A., 409
TRABOULSI M., **685**
TSARADIA J.N., 691
TSIAVAHANANAHARY T.J., **691**, 565, 571, 673, 691

ULLMANN A., **697**

VAN LEEUWEN C., 193
VIGNINOU T., **703**
VISSIN E.W., 403
VRAC M., 469

WIESER A., 541

YAPI A.F., **709**, 37
YIOU P., 469
YOUAN TA M., 37

ZAAROUR R., 499
ZAHARIA L., 176, 181
ZAMPARONI C.A.P., 487
ZANNOU P., 703
ZOGLOBOSSOU B., 703

INDEX DES MOTS CLES

ESPACES GEOGRAPHIQUES

Continent/Sous-continent
Afrique, 229
Afrique Centrale, 541

Pays
Benin, 31, 283, 517, 679
Brésil, 49, 73, 355, 433, 487
Burkina Faso, 385, 615
Côte d'Ivoire, 37, 511, 709
France, 49, 247, 637
Liban, 199, 685
Madagascar, 121, 673
Maroc, 133, 259, 265, 271, 307, 361, 391, 445,
Roumanie, 175, 535,
Sénégal, 643
Suisse, 301
Tunisie, 109, 157, 211, 481, 583
Uruguay, 311, 649

Ville
Agadir, 133
Beyrouth, 685
Bignona, 205
Bucarest, 181
Casablanca, 361, 445
Curitiba, 67, 139, 355,
Grenoble, 601
Kairouan, 169
Mahajanga et Morondava, 567
Metz Métropole, 235, 367
Porto-Novo-Akpro Missérété (Bénin), 283
Recife, 487
Rennes, 49, 241
Sfax, 289
Strasbourg, 397
Toulouse, 253
Ville côtière brésilienne, 433
Ville de Covè, 703

Région
Amoron'i Mania, 571
Analalava, 673
Bourgogne, 697
Bretagne, 127, 163, 427
Franche-Comté, 373
Gharb, 391
Marahoué, 709
Mato Grosso, 73
Mayenne, 457
Normandie, 97, 187
Nouvelle Aquitaine, 379
Région amazonienne, 337
Région côtière, 319
Région Ouest, 337

Territoire

Badazouin, 349
Bassin versant de l'Oti, 415
Forêts classées de Pahou et Ouèdo, 517
Furn El Hayek, 499
Lac Itaipu, 439
Lobo 37
Macta, 109
Martinópolis, 475
Mono, 61
Monts Maramureş, 553
Moyen Atlas, 619
Oued Oum Er Rbia, 271
Plaine de Chaouia, 277
Presidente Prudente, 49
Province, 615
Sanguié, 385
Tchaourou, 217
Tunisie tellienne, 481
Vallée de Struma, 559
Vignoble de Quincy, 421
Ziban, 295

DISCIPLINES/BRANCHES DISCIPLINAIRES

Bioclimatologie, 97
Climatologie, 337
Dendrochronologie, 553
Écologie, 565
Épidémiologie, 523
Hydroclimatologie continentale, 121
Morphologie urbaine, 595

TYPE DE DONNEES /SERVICES

CHIRPS, 439
CPC, 439
Données GRACE, 121
DRIAS, 637
Euro-Cordex, 637
GPCP, 439
IUWECS (Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services), 253
réanalyses ERA-Interim, 463
réseau d'observation, 697
Réseau de capteurs sans fil, 421
SAPHIR, 469
TRMM/GPM 259, 271

METHODE

Δtur, 547
Aerosol optical depth, 199
Analyse sémantique, 451
Analyse spatiale, 256
Analyse temporelle, 451
Anomalies positives, 583
Assurance indicielle, 643
Calibration, 403
Campagnes de mesures de PM_{10} et $PM_{2,5}$, 289

Cartographie 3D, 19
Cartographie du carbone, 67
Chaînes de Markov, 37, 289
Classification bioclimatique, 211
Classification de Hess-Brezowsky, 187, 301
Clustering, 211
Comparaison, 313
Conservation, 691
Contrôle de qualité, 325
Déterminants de santé, 667
Dynamique spatiale, 283
Erreur de prévision, 679
Gestion, 313
Gestion des risques, 445, 643
Histoire régressive, 163
ICU, 253, 595
Ilot de chaleur urbain, 43, 85, 181, 241, 331, 487, 547, 577, 589
Indice Huglin, 625
Indice pluviométrique standardisé, 277
Indice Winkler, 625
Indices agro-climatiques, 655
Indices climatiques, 37, 325, 127
Indices GFV et GSR, 127
Indices spectraux, 367
LCZ, 547
Mann Kendall, 109
Mesure mobile, 115, 139
Mesures fixes, 169
Mesures itinérantes, 169
Modélisation, 97
Modélisation climatique, 493
Modélisation régionale, 229
NDSI, 481
Occurrence pluviométrique, 709
Perception, 31, 181
Période de retour, 361
Prédiction, 655
Prévision de temps, 679
Projection climatique, 565
Questionnaire, 181
Réduction d'échelle, 469
Régression linéaire multiple, 43
Simulation, 19
Simulations numériques, 421
SPEI /SPI, 91, 175
Système d'information géographique (SIG), 19
Téléconnexions, 355
Télédétection, 49
Télédétection optique, 481, 607
Télédétection thermique, 493
Tendance, 25, 109, 337, 685
Transects mobiles, 85
Typologie, 661
Végétation (NDVI), 433
Zones climatiques locales, 577

OUTILS

Adamont, 637
Calipso, 469
Caméra thermique infrarouge, 235
Cloudsat, 469
Davis instruments, 253
Drone, 235
DSSAT, 655
Envi-met, 499
HadGEM2-ES, 223
Landsat, 367, 577
Landsat 8, 43
LiDaR, 43
Modèle, 259
Modèle ARPEGE, 679
Modèles de projection, 91
RCM, 91
Réseaux sociaux, 451
SigFox, 253
Tour antigel, 421
Twitter, 451

VARIABLES ET OBJETS DE RECHERCHE (ET TERMES ASSOCIES) :

Température / Thermique / Chaleur /Canicule / Gel/ Froid

2019, 241
Amplitude thermique, 475
Canicule, 451, 595, 601
Chaleur, 187, 475
Chaleur élevée, 583
Comportement thermique, 151
Conditions thermiques, 559
Extrêmes thermiques, 601, 343
Gel, 421
Gradient vertical, 193
Ilot de chaleur, 433, 151, 169,
Ilot de chaleur de surface, 49, 235
Intensité et variabilité thermiques, 589
Rafraîchissement urbain, 115, 529
Température, 25, 193, 145, 325, 373, 649
Température de l'air, 43
Température de surface, 43, 85, 235, 367, 493, 577
Vague de chaleur, 601
Vagues de froid, 343

Eau/ Précipitations/ Pluie / Pluviométrique

Aquacycle, 223
Arrosage urbain, 331
Cycle de l'eau en milieu urbain, 223
Déficit, 409
Disponibilité en eau et lumière, 541
Eau, 385
Ecoulement de surface, 409
Evolution des précipitations, 247
Extrêmes, 133
Fortes précipitations, 301
Inondation, 79, 313, 391, 415, 445
Nappe phréatique, 103
Pluie, 355

Pluies automnales, 133
Pluies extrêmes, 109, 361
Pluviométrie, 619
Précipitation, 205, 229, 247, 259, 271, 325, 391, 415, 445
Précipitations extrêmes, 337, 685
Risque d'inondation, 415
Tendance pluviométrique, 277
Variabilité pluviométrique, 103

Hydrométéores (Neige / grêle)

Avalanches de neige, 553
Chutes de grêles, 697
Neige, 325, 481

Vent / Nuages

Energie éolienne, 463
Khamsin, 199
Nuages bas, 541
Tempête de sable, 199
Vitesse du vent, 463

Air/ Atmosphère/ Atmosphérique /Météorologique / Particules /Aérosols /CO_2

Alerte météorologique, 115
Carbone, 67, 517
Circulation atmosphérique, 343
Conditions synoptiques, 553
Dioxyde de carbone, 67
Dynamique atmosphérique, 697
Humidité de l'air, 397
Humidité relative, 145, 469
ONA, 361, 619
Pollution de l'air, 139
Poussières, 289
Situations météorologiques, 301
Temps, 475
Types de circulation, 685
Types de circulation atmosphérique, 187, 361

Evapotranspiration / Evaporation / vapeur

Déficit d'évaporation, 505
ETP de Penman-Monteith et de Oudin, 403
Evapotranspiration, 505
Pression de vapeur, 397
Rafraîchissement évaporatif, 151

Climat / Climatique

Changement climatique, 67, 85, 97, 109, 127, 163, 187, 193, 379, 427, 505, 511, 565, 619, 625, 661, 667, 673, 691
Climat futur, 223
Climat soudanien, 679
Climat urbain, 397, 487, 523, 631
Contraintes climatiques, 349
Diagnostics du changement climatique, 247
Echelle climatique, 73
Impacts, 379, 571
Microclimat, 499
Mutations climatiques, 217
Péjoration climatique, 385
Potentiel du climat, 535
Réchauffement, 25
Réchauffement climatique, 67

Risque, 307, 313
Variabilité, 335
Variabilité climatique, 73, 319, 571
Variations climatiques saisonnières, 55

Sécheresse / Aridité

Aridité, 505
Ilot de sécheresse, 397
Sécheresse, 79, 91, 157, 615, 643

Hydrologie/ Hydrologique/ Débit / Bassin versant

Apports terrigènes, 265
Barrage hydroélectrique, 61
Bassin, 403
Bassin versant, 409
Bassin-versant anthropisé, 61
Débits, 409
Facteur de charge, 463
Fonctionnent hydrologique, 61
Hydrosystème du Bandama, 511

Relief /Erosion / Sol / Occupation du Sol

Changement de la couverture terrestre, 337
Dégradation du sol, 283
Dynamique de l'occupation du sol, 415
Entretien du sol, 193
Erosion, 283
Erosion pluviale, 703
Facteurs locaux, 493
Humidité du sol, 433
Potentiel du relief, 535
Potentiel du sol, 535
Sédiments, 265
Topographie, 649

Végétal / Animal (Processus et activités associés)

Acacia auriculiformis, 31
Aedes aegypti, 523
Agriculture, 205, 427, 571
Agriculture irriguée, 103
Albariño, 319, 649
Céréaliculture, 157
Cycle phénologique, 295
Elevage, 217, 615
Espaces verts, 115
Impact physiologique, 343
Lin fibre, 97
Mangroves, 565
Oiseaux aquatiques, 691
Palmier dattier, 295
Palmiers, 673
Période de croissance, 559
Photosynthèse, 517
PMS, 615
Potentiel viticole écologique, 535
Production agricole, 511
Production maraichère, 385
Productions vivrières, 349
Rendements, 79
Riz pluvial, 511
Sorghum bicolor, 655
Système de conduite, 193

Tahinaspectabilis, 673
Tannat, 319, 649
Végétation, 499, 547
Vigne, 457, 463
Vignoble, 163, 457, 493, 559
Viticulture, 127, 193, 319, 343, 607, 625, 661
Vitis vinifera, 649

Milieux & Environnement

Domaine, 25
Environnement côtier, 589
Environnement tropical, 631
Insularité, 661
Parc urbain, 595
Paysage, 73
Site ouvert, 373
Territoires, 379
Ville, 499
Villes moyennes, 145
Zones humides, 691

Autres / Généralités

Activités anthropiques, 691
Adaptation, 193, 217, 379, 661
Aménagement urbain, 139
Atténuation, 217
Béton perméable, 529
Bois de feu, 517
Catastrophes naturelles, 307
Conservation et préservation des ressources naturelles, 55
Consommations énergétiques des bâtiments, 595
Géométrie urbaine, 547
Matériaux perméables, 331
Matériaux réfléchissants, 331
Mesures adaptatives, 601
Politiques publiques, 145
Pollution sonore, 19
Processus, 541
Réduction, 619
Renaissance, 163
Revêtement frais, 151
Revue de littérature, 667
Risque de base, 643
Sante humaine, 667
Sensibilisation, 181
Sinistres, 643
Société, 457
Stratégies d'adaptation, 31, 79, 349, 703
Tradition, 163
Trafic routier, 19
Transition, 25
Urbanisation, 667
Végétalisation, 529
Vulnérabilité, 505, 703

KEYWORDS INDEX

GEOGRAPHICAL AREA

Continent/Subcontinent
Africa 229
Central Africa 541

Country
Benin, 31, 283, 517, 679
Brazil, 49, 73, 355, 433, 487
Burkina Faso, 385, 615
France, 49, 247, 637
Ivory Coast, 37, 511, 709
Lebanon, 199, 685
Madagascar, 121, 673
Morocco, 133, 259, 265, 271, 307, 361, 391, 445
Romania, 175, 535
Senegal, 643
Switzerland, 301
Tunisia, 109, 157, 211, 481, 583
Uruguay, 311, 649

City
Agadir, 133
Beirut, 685
Bignona, 205
Brazilian coastal city, 433
Bucharest, 181
Casablanca, 361, 445
City of Covè, 703
Curitiba, 67, 139, 355
Grenoble city, 601
Kairouan, 169
Mahajanga and Morondava, 567
Metz Metropole, 235, 367
Porto-Novo-Akpro Missérété (Bénin), 283
Recife, 487
Rennes, 49, 241
Sfax, 289
Strasbourg, 397
Toulouse, 253

Region
Amazon region, 337
Amoron'i Mania, 571
Analalava, 673
Brittany, 121, 163, 427
Burgundy, 697
Coastal region, 319
Franche-Comté, 373
Gharb, 391
Marahoué, 709
Mato Grosso, 73
Mayenne, 457
Normandy, 97, 187
Nouvelle Aquitaine, 379

Territory
Badazouin, 349
Chaouia plain, 277
Classified forests of Pahou and Ouèdo, 517
Furn El Hayek, 499
Itaipu Lake, 439
Lobo, 37
Macta, 109
Maramureş Mountains, 553
Martinópolis, 475
Middle-Atlas, 619
Mono, 61
Oti catchment area, 415
Oum Er Rbia rive, 271
Presidente Prudente, 49
Province, 615
Quincy vineyard, 421
Sanguié, 385
Struma Valley, 559
Tchaourou, 217
Ziban, 295
Forest, 373

DISCIPLINES / DISCIPLINARY BRANCHES

Bioclimatology, 97
Climatology, 337
Continental hydroclimatology, 121
Dendrochronology, 553
Epidemiology, 523
Urban morphology, 595

TYPES OF DATA / SERVICES

CHIRPS, 439
CPC, 439
DRIAS, 637
ERA-Interim reanalysis, 253
Euro-Cordex, 637
GPCP, 439
GRACE data, 121
IUWECS (Integrated Urban Weather, Environment and Climate Services), 253
Observation network, 697
SAPHIR, 469
TRMM/GPM, 259, 271
Wireless sensors networks, 421

METHOD

ΔTur, 547
3D mapping, 19
Aerosol Optical Depth, 199
Agro-climatic indexes, 277
ARPEGE model, 679
Bioclimatic classification, 211
Calibration, 403
Car survey, 169
Carbon mapping, 67

Climate indices, 37, 325, 127
Climate modelling, 493
Climate projections, 565
Clustering, 211
Comparison, 313
Conservation, 691
Determinants of health, 667
Downscaling, 469
Experience feedback, 601
Fixed measures169
Forecast error, 679
GFV/GSR indices, 127
GIS (Geographic Information System), 19
Hess-Brezowsky classification, 187, 301
Huglin index, 465
Index insurance, 643
LCZ, 547
Local climate zones, 577
Management, 313
Mann Kendall, 109
Markov Chains, 37, 289
Mobile measurement, 115, 139
Mobile temperature measurements, 85
Modelisation, 97
Multiple linear regression, 43
NDSI, 481
Numerical simulations, 421
Optical remote sensing, 481, 607
Perception, 31, 181
Positive anomalies, 583
Prediction, 655
Quality control, 325
Questionnaire, 181
Rainfall occurrence, 709
Regional modeling, 229
Regressive history, 163
Remote sensing, 49
Return periods, 361
Risk management, 445, 643
Semantic analysis, 451
Simulation, 19
Spatial analysis, 256
Spatial dynamics, 283
Spectral indices, 367
SPEI/SP, 91, 175
Standardized precipitation index, 277
Survey PM_{10} and $PM_{2.5}$, 289
Teleconnections, 355
Temporal analysis, 451
Thermal remote sensing, 493
Trend, 25, 109, 337, 685
Typology, 661
UHI253, 595
Vegetation (NDVI), 433
Weather forecast, 679
Winkler index, 625

TOOLS

Adamont, 637
CALIPSO, 469
CloudSat, 469
Davis instruments, 253
DSSAT, 655
Envi-met, 499
HadGEM2-ES, 223
Landsat 8, 43
Landsat, 367, 577
LiDAR, 43
Model, 259
Projection models, 91
RCM, 91
SigFox, 253
Social networks, 451
Thermal infrared camera, 235
Twitter, 451
UAV (drone), 235
Wind machine, 421

VARIABLES AND RESEARCH OBJECTS (AND RELATIVES)

Temperature / Thermal / Heat / Heat wave / Frost / Cold

2019, 241
Air temperature, 43
Cold snap, 343
Extreme weather events, 601, 343
Frost, 421
Heat island, 433, 151, 169,
Heat wave, 451, 595, 601
Heat, 187, 475
High heat, 583
Land Surface Temperature (LST), 43, 85, 235, 367, 493, 577
Surface heat island, 49, 235
Surface heat urban island, 49, 235
Surface temperature, 43, 85, 235, 367, 493, 577
Temperature Range, 475
Temperature, 25, 193, 145, 325, 373, 649
Thermal behavior, 151
Thermal conditions, 559
Thermal extremes, 601, 343
Thermal intensity and variability, 589
Urban cooling, 115
Urban heat island countermeasure, 529
Urban Heat Island, 43, 85, 181, 241, 331, 487, 547, 577, 589
Vertical gradient, 193

Water / Precipitation / Rainfall

Aquacycle, 223
Autumn rainfall, 133
Deficit, 409
Extreme, 133
Extreme precipitations, 337, 685
Extreme rainfall, 109, 361
Flood risk, 415
Flood, 79, 313, 391, 415, 445
Precipitation, 79, 205, 229, 247, 259, 271, 313, 325, 391, 415, 445
Rainfall evolution, 247

Rainfall regime, 277
Rainfall variability,103
Rainfall355, 619
Strong precipitation, 301
Surface flow, 409
Urban water balance, 223
Urban watering, 331
Water and light availability, 541
Water table, 103
Water, 385

Hydrometeors (Snow / Hail)

Hailfalls, 697
Snow avalanches, 553
Snow, 325, 481

Wind / Clouds

Khamsin, 199
Low clouds, 541
Sandstorm, 199
Wind power, 463
Wind speed, 463

Air / Atmospheric / Meteorological / Particles / Aerosols / CO_2

Air pollution, 139
Atmospheric circulation, 343
Atmospheric dynamics, 697
Carbon dioxide, 517, 67
Carbone, 67, 517
Circulation atmospheric type, 361
Dust, 289
Humidity, 397
Meteorological situations, 301
NAO, 361, 619
Relative humidity, 145, 469
Synoptic circulation pattern, 187
Synoptic weather conditions, 553
Types of circulation, 685
Weather alert, 115

Evapotranspiration / Evaporation / Vapour

Evaporation deficit, 505
Evaporative cooling, 151
Evapotranspiration, 505
Penman-Monteith and Oudin PET, 403
Vapour pressure, 397

Climate / Climatic

Climate change, 67, 85, 97, 109, 127, 163, 187, 193, 217, 379, 427, 505, 511, 565, 619, 625, 661, 667, 673, 691
Climate change diagnostics, 247
Climate scale, 73
Climate suitability, 535
Climate variability, 73, 319, 571
Climatic constraints, 349
Climatic deterioration, 385
Future climate, 223
Global warming, 67
Impacts, 379, 571
Microclimat, 499
Risk/ hazards, 307, 313
Seasonal climate variations, 55

Sudanian climate, 679
Urban climate, 397, 487, 523, 631
Variability, 335
Warming, 25

Drought / Aridity

Aridity, 505
Drought, 79, 91, 157, 615, 643
Drought island, 397

Hydrology / Hydrological / Flow / Catchment area

Anthropized watershed, 61
Bandama hydrosystem, 511
Basin, 403
Catchment flow, 409
Hydroelectric dam, 61
Hydrological function, 61
Load factor, 463
Terrigenous input, 265

Relief / Erosion / Soil / Landcover

Erosion, 283
Floor management, 193
Land cover changes, 337
Land cover dynamics, 415
Land degradation, 283
Local factors, 493
Rain erosion, 703
Relief suitability, 535
Sediments, 265
Soil moisture, 433
Soil suitability, 535
Topography, 649

Plant / Animal (Process and related activities)

Acacia auriculiformis, 31
Aedes aegypti, 523
Agricultural production, 511
Agriculture, 205, 427, 571
Albariño, 319, 649
Cereals, 157
Date palm, 295
DMP, 615
Ecological viticulture potential, 535
Flax fiber, 97
Food production, 349
Grapevine, 457, 463
Green spaces, 115
Growing period, 559
Irrigated agriculture, 103
Livestock farming, 217, 615
Mangroves, 565
Palmtrees, 673
Phenological cycle, 295
Photosynthesis, 517
Physiological impact, 343
Rain-fed rice, 511
Sorghum bicolor, 655
Tahinaspectabilis, 673
Tannat, 319, 649
Training system, 193
Vegetable production, 385

Vegetation, 499, 547
Vineyard, 163, 457, 493, 559
Vineyard floor management, 193
Viticulture, 127, 193, 319, 343, 607, 625, 661
Vitis vinifera, 649
Waterbirds, 691
Yields, 79

Environments

City, 499
Coastal environment, 589
Districts, 379
Domain, 25
Human settlements, 703
Insularity, 661
Landscape, 73
Mid-sized cities, 145
Open site, 373
Tropical environment, 631
Urban park, 595
Wetlands, 691

Other / General

Adaptation strategies, 31, 79, 349, 703
Adaptation, 193, 217, 379, 661
Adaptive measures, 601
Awareness, 181
Basic risk, 643
Building's energy consumption, 595
Claims, 643
Cool pavement, 151
Fuelwood, 517
Human activities, 691
Human health, 667
Literature review, 667
Mitigation, 217
Natural catastrophes, 307
Natural resources conservation and preservation, 55
Noise pollution, 19
Permeable concrete, 529
Permeable materials, 331
Processes, 541
Public policies, 145
Reduction, 619
Reflective materials, 331
Renaissance, 163
Road traffic, 19
Society, 457
Strategies of adaptation, 31, 79, 349, 703
Tradition, 163
Transition, 25
Urban geometry, 547
Urban greening, 529
Urban planning, 139
Urbanization, 667
Vulnerability, 505, 703
Weather, 475

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE ……1

INTRODUCTION AU XXXIIIEME COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERRITOIRES
VALERIE BONNARDOT & HERVE QUENOL ……5

JEAN-PIERRE MARCHAND : UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DU LIEN CLIMAT-TERRITOIRE
VINCENT DUBREUIL ……9

DESSINS CARICATURAUX DE LA CARRIERE DE JEAN PIERRE MARCHAND
HERVE REGNAULD ……14

RESUMES ETENDUS DES COMMUNICATIONS ET POSTERS PREVUS ……17

ABDMOULEH M. A., DAHECH S. ……19
Cartographie de la pollution sonore dans l'agglomération de Sfax

ADIGBEGNON M., TOTIN VODOUNON S. H., AMOUSSOU E., AVAHOUINC. N. N., HOUNGNIBO K., ADETONA L. ……25
Réchauffement climatique dans le domaine de transition climatique au Bénin

ALI R. K. F. M. ……31
Perceptions locales des effets des changements climatiques sur les plantations* d'acacia auriculiformis *de Ouèdo et Pahou au sud du Bénin

ALLECHY F. B., N'GUESSAN B. V. H., YOUAN TA M., YAPI A. F., KONE A. B., AFFIAN K. ……37
Mode d'occurrence et d'alternance des épisodes secs et humides dans le bassin de la Lobo (centre-ouest de la Côte d'Ivoire) : apport des chaînes de Markov

ALONSO L., RENARD F. ……43
Compréhension du micro-climat urbain lyonnais par l'intégration de prédicteurs complémentaires à différentes échelles dans des modèles de régression linéaires multiples

AMORIM M. C. C. T., DUBREUIL V. ……49
Analyse comparée des îlots de chaleur de surface diurnes et nocturnes en environnement tropical continental et tempéré océanique

AMORIM A. T., PIROLI E. L. ……55
Study on the influence of land use and cover on surface temperature and normalized difference vegetation index

AMOUSSOU E., TOTIN VODOUNON S. H., KOUADIO K. C. A., OBAHOUNDJE S., KOUAME Y. M., DIEDHIOU A., MAHE G., HOUNDENOU C., BOKO M. ……61
Etude comparative du fonctionnement hydrologique dans deux bassins-versants anthropises en Afrique de l'ouest

ANJOS M., MENDONÇA F., FORIGO Y. ……67
Mapping fossil fuel CO_2 emissions in Curitiba, Brazil: an approach based on street scale

ARAÚJO A., FERREIRA H., PEREIRA H., FERREIRA E. ……73
The relationship between relief and climate at sub-regional scale in the southwest of Mato Grosso state, Brazil

ATIDEGLA S. C., KOUMASSI H. D., HOUNMENOU C. ……79
Risques climatiques et production agricole au Bénin : effets, perceptions et stratégies d'adaptation

BARBOSA H. P., DUBREUIL V. ……85
L'utilisation des transects mobiles nocturnes et des données satellitaires pour caractériser les ilots de chaleur urbains dans l'agglomération rennaise (Bretagne, France)

BARONETTI A., ACQUAOTTA F., DUBREUIL V., GONZÁLEZ-HIDALGO J. C., FRATIANNI S. ……..91
Future drought events in Italy

BEAUVAIS F., CANTAT O., LE GOUEE P., BRUNEL-MUGUET S., MADELINE P., GAILLARD H., BATAILLE M. P., SALLENT A., PREUX T., MEDJKANE M. ……..97
Conséquences du changement climatique sur le lin fibre en Normandie à l'horizon 2100 : simulation bioclimatique prospective à partir des données CNRM-2014 et IPSL-2014

BEN HAMMOUDA A., BEN JALLOUL M. ……...103
Effet de la variabilité pluviométrique sur les caractéristiques de la nappe phréatique et de l'agriculture irriguée dans la côte de Bizerte (Tunisie)

BENZATER B., ELOUISSI A., BENARICHA B. ……109
Hausse significative des pluies maximales journalières dans le bassin versant de la Macta (nord-ouest de l'Algérie)

BERNARD J., BODÉNAN P., KÉRAVEC P., MORILLE B., RODLER A. ……115
Outil d'alerte pour identifier les périodes propices au rafraîchissement des parcs

BIGOT S., DUMAS D., BROU Y. T., RAMBOARISON R., RAZANAKA S., PHILIPPON N. ……121
Etude hydroclimatique dans le nord-ouest de Madagascar : apport des données satellitaires GRACE

BONNARDOT V., QUENOL H. ……...127
Viticulture en Bretagne : challenge ou opportunité ? Quelques indices bioclimatiques régionaux

BOUAICHE A., KARROUK M.-S., LOTFI N., TNOURJI H., CHAIR M. ……133
Impacts des pluies automnales extrêmes sur la ville d'Agadir : cas des inondations de novembre 2014

CASTELHANO F. J., PINTO J. E. S. S. ……..…..139
Urban morphology and air quality in Curitiba, Paraná southern Brazil

CAVICCHIOLI A., MELLO-THÉRY N. A. ……..……..145
Îlot de chaleur dans une ville brésilienne moyenne et perspectives d'action publique

CHANIAL M., PARISON S., HENDEL M., ROYON L. ……151
Etude du comportement thermique et microclimatique d'un revêtement innovant

CHARFI S., FEKI M., BOUAZIZ R. ……..157
Les épisodes secs pendant la saison pluvieuse au nord de la Tunisie : variabilité temporelle et impact sur la céréaliculture

CHARMONT C., BONNARDOT V., CAPDEVILA L. ……163
Changement climatique et viticulture en bretagne : émergence ou renaissance d'un vignoble ? Une analyse historique

CHEBLI M., CHARFI S., DAHECH S. ……169
Caractérisation de l'ilot de chaleur urbain au moyen de mesures fixes et mobiles dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie)

CHELU A., ZAHARIA L., DUBREUIL V., IOANA-TOROIMAC G. ……..175
Drought trends and their spatial variability in south-eastern Romania based on SPI and SPEI analysis

CONSTANTIN (OPREA) D. M., GRIGORE E., ZAHARIA L., IOANA-TOROIMAC G., TIȘCOVSCHI A. A., BOGAN E. ……181
The perception of the urban heat island. case study: Bucharest (Romania)

DAVID M., CANTAT O., PLANCHON O. ……187
Chaleur en Normandie, types de circulation atmosphérique et changement climatique (1970-2019)

DE RESSÉGUIER L., PONS R., PIERI P., PETITJEAN T., MARY S., VAN LEEUWEN C. ……193
Étude du gradient vertical de la température dans des parcelles de vigne de la région de Bordeaux : vers une solution pour l'adaptation au changement climatique ?

DIAB L., ADJIZIAN GERARD J., NOUACEUR Z. ……199
Suivi par télédétection des tempêtes de sable ''khamsin'' au Liban

DIALLO M. M., DAHECH S., SY B. A. ……205
Variabilité interannuelle de la pluviométrie au poste de Bignona de 1950 à 2018 (Sénégal)

DJELLOULI Y., MESSNER F., LOUAIL A. ……211
Evolution des bioclimats locaux face au changement climatique en Tunisie. classification bioclimatique mondiale et méthode de clustering

DJOHY L., SOUNON BOUKO B. ……217
Elevage intelligent face aux mutations climatiques dans la commune de Tchaourou au Bénin (Afrique de l'Ouest)

DOS SANTOS I., CARVALHO J.W.L.T., IENSEN I.R.R. ……223
Urban water balance resilience to climate change scenarios in hydrologic similarity areas: modelling application in Belem catchment, southern Brazil

DOUTRELOUP S., FETTWEIS X., ERPICUM M. ……229
Simulation des précipitations dans la région du Lac Victoria (Afrique équatoriale de l'Est) à l'aide du modèle régional MAR

DROGUE G., HASSANI N., MANCEAU L., PARUKE L. ……235
Acquisition d'images thermiques infrarouges par drone pour la caractérisation de l'ICU de surface à échelle fine : étude pilote dans une ZAE du territoire de Metz Métropole (le Plateau de Frescaty)

DUBREUIL V., FOISSARD X., NABUCET J., THOMAS A., QUENOL H. ……241
2019, une année exceptionnelle de fréquence et d'intensité d'îlots de chaleur à Rennes ?

DUBUISSON B., BERNUS S., CORRE L., DROUIN A. ……247
Évolution des précipitations en France métropolitaine au cours des dernières décennies

DUMAS G., MASSON V., HIDALGO J. ……253
Construire un réseau de mesures atmosphériques en temps réel, première phase des services climatiques de Toulouse métropole

EL BOUHALI A., LEBAUT S., QADEM A., AMYAY M., GILLE E., COTONNEC A. ……259
Evaluation des produits TRMM et GPM à partir d'observations aux stations et de résultats d'un modèle de quantification spatiale des précipitations sur le moyen-atlas, Maroc

EL HAWARI J., EL GHACHI M., REDDAD H., KOELLING M., GROENEVELD J., BOUIMETARHAN I. ...265
A la recherche d'indicateurs du changement climatique au Maroc : analyse spatiale des caractéristiques géochimiques des sédiments de surface marins et continentaux au sud du Maroc

EL ORFI T., EL GHACHI M., LEBAUT S. ……271
Comparaison des données de précipitation satellitaires avec les données mesurées dans le bassin versant de l'oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali (Maroc)

ESSALEK B., NAHLI A. ……277
Etude des tendances pluviométriques récentes dans la plaine de chaouia (Maroc)

ETENE C. G. ……283
Dynamique spatiale et érosion pluviale dans le doublet Porto-Novo-Akpro Misserete au Bénin

EUCHI H., DAHECH S. ……289
Répartition des particules fines et ultrafines (PM_{10} et $PM_{2,5}$) dans l'agglomération de Sfax (Tunisie)

FACI M., BENZIOUCHE S. E., ROUMANI M., BERREDJOUH D., KHARFALLAH N., AZZOUZ R……..295
Notes de suivi du cycle phénologique du palmier dattier vis-à-vis les nouvelles conditions climatiques (cas de la région des Ziban)

FALLOT J.-M., FLORANCE V. ……301
Evolution de la fréquence des précipitations journalières abondantes en Suisse de 1900 à 2019

FATHI M., KARROUK M. S. ……307
Les changements climatiques et les catastrophes naturelles au Maroc

FORTIN G., DOS SANTOS I., DUBREUIL V., GERMAIN D., GOUDARD G., LANDOLFI de CARVALHO J., MENDONÇA F., ROLLET A.-J., ROSEGHINI F. W. ……313
Étude comparative des conditions hydrométéorologiques propices aux inondations dans trois bassins versants : Brésil, Canada et France

FOURMENT M., TACHINI R., FERRER M., BONNARDOT V. ……319
Phenology responses of grapevine cultivars to climate variability in a coastal region of Uruguay

FRATIANNI S., ACQUAOTTA F., BARONETTI A., FALZOI S., GARZENA D., GUENZI D. ……..325
Méthodologies d'analyse pour la caractérisation climatique

FRERE M., HENDEL M., ROYON L. ……..331
Couplage de matériaux frais, perméables et arrosage urbain : évaluation d'un démonstrateur d'îlot de fraîcheur urbain

FUNATSU B. M., ARVOR D., DUBREUIL V., RONCHAIL J., ESPINOZA J. C., MICHOT V. ……..…337
Precipitation extremes and their trends in the amazon region (1981-2018)

GAVRILESCU C., RICHARD Y., REGA M., PLANCHON O., BOIS B. ……343
Dynamique spatio-temporelle d'un événement extrême froid : impact de la circulation atmosphérique sur les basses températures en bourgogne viticole

GIBIGAYE M., CHABI A. B. P. ……349
Stratégies d'adaptation des productions vivrières aux contraintes climatiques dans l'arrondissement de Badazouin (commune de Bopa) au Bénin

GOUDARD G., LIMBERGER L., MENDONÇA F. A. ……355
Variabilité pluviométrique et téléconnections à Curitiba (Brésil) : une analyse préliminaire

HANCHANE M., SEBBAR A., ILMEN R., EL MOULOUDI M. ……361
Evénements pluviométriques extrêmes dans la grande métropole casablancaise : fréquence de retour et liens avec les types de circulation atmosphérique

HASSANI N., LEBAUT S., DROGUE G., SGHIR S. ……367
Evolution spatio-temporelle de températures de surface diurne dans l'aire métropolitaine de Metz à partir de données Landsat

JOLY D. ……373
Différences de température entre une forêt et un site ouvert adjacent en hiver et en été

JUVANON DU VACHAT R. ……379
L'adaptation au changement climatique dans les territoires

KARAMBIRI B. L. C. N. ……385
Impact de la péjoration climatique sur la production maraichère dans la province du Sanguié au Burkina Faso

KARROUK M. S. ……391
Les inondations de 2009-2010 au Maroc : l'exceptionnalité de l'événement et difficultés de gestion dans la région du Gharb

KASTENDEUCH P., NAJJAR G., PHILIPPS N. ……397
Humidité relative, pression partielle de vapeur d'eau et ilot de sécheresse à Strasbourg (France)

KODJA D. J., AKOGNONGBE A. J. S., AMOUSSOU E., MAHE G., VISSIN E. W., PATUREL J. E., HOUNDENOU C. ……403
Influence des estimations d'évapotranspiration potentielle par les méthodes de Penman-monteith et de Oudin sur la calibration du modèle hydrologique gr4j dans le bassin versant de l'Ouémé (Afrique de l'ouest)

KONAN K. C., TRA BI Z. A. ……409
Sensibilité des ressources en eau au forçage pluviométrique dans le bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire)

KOUNGBANANE D., TOTIN VODOUNON H. S., AMOUSSOU E. ……415
Risque d'inondation et dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oti au Togo (Afrique de l'ouest)

LE CAP C., CARLIER J., QUENOL H., HEITZ D., BUISSON E. ……421
Simulations numériques micro-échelles et mesures de terrain du climat lors d'un gel de printemps sur un vignoble équipé de tours antigels

LIGNEAU L., TILLY S., BARAER F., DUBREUIL V., BONNARDOT V. ……427
Observatoire du changement climatique pour l'agriculture : Résultats préliminaires en Bretagne

LIMA A. P., SOUSA G. S., SANT'ANNA NETO J. L., AMORIM M. C. C. T. ……433
Vegetation and soil humidity as analysis elements of the island of surface heat in the city of natal (RN), Brazil

LIMBERGER L., ELY D. F., GAMERO P., MANGILI F. B., SCHMENGLER M. ……439
Évaluation de la performance de différents ensembles de données de grille par rapport aux données observées de précipitation dans l'état du Paraná (Brésil)

LOTFI N., BOUAICHE A., KARROUK M. S., CHAIR M., BENTALEB H., TNOURJI H. ……445
Impacts des fortes pluies et gestion des risques naturels dans la ville de Casablanca : cas des inondations de 2010

MADELIN M., DUPUIS V. ……451
Twitter, un nouveau « baromètre » des événements caniculaires ?

MARCHAND J.-P, BONNARDOT V. ……457
Entre société, variabilités et changements climatiques : l'exemple de l'évolution du vignoble en Mayenne

MARTIN N. ……463
Production électrique éolienne en France et circulation atmosphérique

MICHOT V., BROGNIEZ H., VRAC M., THAO S., CHEPFER H., DUFOUR C., YIOU P. ……469
Estimation of relative humidity profiles at fine scale: a challenge for the understanding of the atmospheric water cycle

MILANI T. S., AMORIM M. C. C. T. ……475
Amplitude thermique quotidienne pendant les épisodes de chaleur à Martinópolis/SP (Brésil)

MJEJRA M., SAMAALI M. ……481
Contribution de la télédétection optique à la cartographie de la neige dans la Tunisie tellienne

MOREIRA A. B., ZAMPARONI C. A. P., NOBREGA R. S., DUBREUIL V. ……487
Urban heat island and land cover diversity in the city of Recife/PE – Brazil

MORIN G., LE ROUX R., LEMASLE P. G., QUENOL H. ……493
Méthode de descente d'échelle statistique à partir de l'imagerie satellite thermique MODIS : application à la Gironde viticole

MOUHAMAD ALI S., ADJIZIAN GÉRARD J., BADARO SALIBA N., ZAAROUR R., GÉRARD P. C., BITAR H. ……499
Morphologie urbaine et évolution des températures à l'échelle fine dans un quartier de Beyrouth (Liban)

MUTTI P., DUBREUIL V., BEZERRA B. ……505
Caractérisation de la sécheresse dans le bassin du fleuve São Francisco, Brésil : évolution du bilan hydrique sur la période 1942-2016

N'DA K. C., N'ZUE K. A., SULTAN B. ……511
La réussite de la riziculture pluviale face aux changements climatiques dans l'hydrosystème du Bandama (Cote d'Ivoire)

ODJOUBERE J., KOOKE G. X., DJOSSOU J.-M., TENTE A. B. H. ……517
Contribution des plantations bois de feu de Pahou et Ouedo à l'émission du carbone au sud du Bénin dans un contexte de changements climatiques

OSCAR JÚNIOR A., MENDONÇA F. ……523
Climatic risk to arboviruses in Rio de Janeiro city

PARISON S., CHAUMONT M., KOUNKOU-ARNAUD R., LONG F., BERNIK A., DA SILVA M., HENDEL M. ……529
"Tierce Foret": greening a parking lot

PATRICHE C. V., IRIMIA L. M. ……535
Evolution of ecological viticulture potential in Romania during 1961-2013 period

PHILIPPON N., FINK A., ADLER B., BIGOT S., CAMBERLIN P., CASTEL T., KNIPPERTZ F., KOHLER M.2, MARISCAL A., MALOBA MAKANGA J. D., MOREL B., MORON V., PANTE G., PELLARIN T., PERGAUD J., SAMBA G7, WIESER A. ……541
Dyvalocca : un projet pour l'étude des nuages bas de saison sèche sur la façade atlantique de l'Afrique centrale et de leur impact bioclimatique sur les forêts sempervirentes

PHILIPPS N., KASTENDEUCH P., MONTAUBAN O., NAJJAR G. ……547
Rôle de la végétation et de la géométrie urbaine dans la variabilité spatio-temporelle de l'ilot de chaleur urbain : cas de la ville de Strasbourg

POP O. T., HOLOBÂCĂ I. H., RĂCHITĂ I. G., DECAULNE A., HOTEA M., HORVÁTH C. ……553
Reconstitution dendrochronologique des avalanches de neige et conditions synoptiques associées à l'épisode avalancheux majeur de l'hiver 2005 dans les Monts Maramures (Carpates Orientales Roumaines)

POPOV H. ……559
Influence of climate change on thermal conditions for growing vineyards in struma valley

RANAIVOJAONA S. B., TSIAVAHANANAHARY T. J., RANARIJAONA H. L. T. ……565
Vulnérabilité des mangroves face au changement climatique dans deux villes côtières de l'ouest de Madagascar

RANDRIAMIFIDISON R. F. A., TSIAVAHANANAHARY T. J., ANDRIAMIFIDY M. A., ANDRIAMAMPIHANTONA F., REJO-FIENENA F. ……571
Impacts de la variabilité climatique sur les pratiques agricoles dans la région Amoron'i Mania, Madagascar

RENARD F., ALONSO L. ……577
Les zones climatiques locales à l'épreuve des températures de surface et des mesures mobiles : le cas de Lyon

RIAHI M. ……583
La transition thermique printanière en Tunisie

ROCHA G., DUBREUIL V., MENDONÇA F. ……..589
Caractéristiques horaire et saisonnière de l'ilot de chaleur urbain de Florianópolis (sud du Brésil)

RODLER A., BERNARD J., MORILLE B., BODENAN P., GUERNOUTI S., MUSY M. ……..……595
CoolParks*: aide à la conception de parcs et de formes urbaines pour optimiser le rafraîchissement urbain*

ROME S., BIGOT S., FOISSARD X., FOUVET A.-C., MADELIN M., DUCHE S. ……..601
L'été 2019 à Grenoble (France) : analyse d'un extrême de chaleur et mesures d'adaptations mises en place par la collectivité

SAMAALI H., MJEJRA M.……607
Bilan hydrique agro-climatique de la vigne à partir de données de télédétection à moyenne résolution spatiale : cas de la région du Cap Bon (Tunisie)

SANOU K., ROUAMBA S., SOME W., SOME Y. S. C. ……..615
Approche spatiale du risque climatique dans le secteur de l'élevage à l'échelle du Burkina Faso

SEBBAR A., HSAINE M., FOUGRACHE H., SALOUI A., BADRI. W. ……619
Impact du changement climatique sur la région montagneuse du moyen atlas au Maroc

SIRNIK I., QUENÓL H., JIMÉNEZ-BELLO M. A., MANZANO J., LE ROUX R. ……625
Climate change impact on two viticultural regions: Valencia Do and Goriška Brda

SOARES DA SILVA M. H., ORTIZ PORANGABA G. F. O., PEREIRA DE FREITAS J. C. ……631
Profil thermique nocturne à Três Lagoas - MS (Brésil)

SOUBEYROUX J.-M., BERNUS S., CORRE L., GOUGET V., KERDONCUFF M., SOMOT S., TOCQUER F. ……..637
Le nouveau jeu de simulations climatiques régionalisées sur la France pour le service DRIAS

SOW O. C., SAMBOU P. C., DOREGO G. S., KONTE O., TOURE K., DUBREUIL M., FALL M. M. ……..643
Analyse du risque de base dans l'assurance pluviométrique indicielle au Sénégal

TACHINI R., FOURMENT M., FERRER M. ……649
Meso-climate study and its effect on berry composition in the Atlantic emerging wine region of Uruguay: preliminary results

TENTE A. B. H. ……655
Simulation du climat futur et des rendements agricoles en région soudano-sahélienne en République du Bénin

THIBAULT J., TISSOT C., QUENOL H. ……661
La viticulture littorale et insulaire dans le contexte du changement climatique

THOMAS M.-F., BARBOSA H. P., ROUE-LE GALL A. ……667
Comment la recherche entre changement climatique et santé humaine en milieu urbain est-elle menée ? Résultats préliminaires d'une revue exploratoire de la littérature

TOMBOANONA S., TSIAVAHANANAHARY T. J., RAMIANDRISOA B. A., RANDRIAMIFIDON R. F. A., RANARIJAONA H. ……673
***Effets du changement climatique et des pressions humaines sur les palmiers endémiques malgaches : cas de* Tahina Spectabilis**

TOTIN VODOUNON S. H., ALAO CHABI CHAFFA A. R., AMOUSSOU E., HOUNDENOU C. ……..679
Fiabilité des prévisions météorologiques dans le domaine du climat subsoudanien au nord-Bénin

TRABOULSI M., TOLIKA K., ANAGNOSTOPOULOU C., MAHERAS P., MACHERA F. ……685
Les précipitations extrêmes à Beyrouth et leurs relations avec les types de circulation atmosphérique

TSIAVAHANANAHARY T.J., RANDRIAMIFIDISON R. F. A., TSARADIA J. N., RANDRIANJATOVO S., RANAIVOJAONA S. B., RANDRIANJAFY V. R., TOMBOANONA S., ANDRIAMASIMANANA R. H. ……691
Vulnérabilité de la communauté des oiseaux aquatiques du complexe zones humides Mahavavy-Kinkony face aux changements climatiques : perception des villageois, analyse bioécologique et mesures d'atténuation

ULLMANN A., GROSSE C., BERTHET C. ……697
Conditions atmosphériques associées aux chutes de grêles en Bourgogne

VIGNINOU T., ZANNOU P., ZOGLOBOSSOU B. ……703
Vulnérabilité des établissements humains et stratégies d'adaptations endogènes des populations à l'érosion pluviale dans la ville de Covè au Bénin (Afrique de l'ouest)

YAPI A. F., OGA Y. M. S., N'GUESSAN BI V. H., KPAN O. J. G., ALLECHY F. B., BIEMI. J. ……..709
Analyse des données pluviométriques journalières de 1980 à 2013 de la région de la Marahoué : apport des chaînes de Markov d'ordre 1 et 2

INDEX DES AUTEURS ……..……715

INDEX DES MOTS CLES ……..….722

Ce volume rassemble un panel de 116 articles présentant des recherches sur le thème « Changement Climatique et Territoires » menées sur divers espaces géographiques.

COMPOSITION DU COMITE SCIENTIFIQUE

ARVOR Damien
Université Rennes 2, France

BARAER Franck
Météo-France, Rennes, France

BARETTE Natalie
Université de Laval, Canada

BEN BOUBAKER Habib
Université de la Manouba, Tunisie

BIGOT Sylvain
Université Grenoble-Alpes, France

BONNARDOT Valérie
Université Rennes 2, France

BOURIAU Emmanuel
AUDIAR, France

CAMBERLIN Pierre
Université Bourgogne Franche-Comté, France

CANTAT Olivier
Université de Caen-Normandie, France

DAHECH Salem
Université Paris 7, France

DROGUE Gilles
Université de Lorraine, France

DUBREUIL Vincent
Université Rennes 2, France

DOUTRELOUP Sébastien
Université de Liège, Belgique

EL MELKI Taoufik
Université de La Manouba, Tunisie

ELY Deise
Université d'Etat, Londrina, Brésil

FALLOT Jean-Michel
Université de Lausanne, Suisse

FOISSARD Xavier
TerraClima, France

FORTIN Guillaume
Université de Moncton, Canada

FOURMENT Mercedes
Université de la République, Montevideo, Uruguay

FRATIANNI Simona
Université de Turin, Italie

FUNATSU Béatriz
Université de Nantes, France

HOLOBÂCĂ Iulian
Université de Cluj-Napoca, Roumanie

KASTENDEUCH Pierre
Université de Strasbourg, France

KERMADI Saida
Université de Lyon 2, France

LE ROUX Renan
Cirad, Montpellier, France

MADELIN Malika
Université Paris 7, France

MARTIN Nicolas
Université de Côte d'Azur, France

MENDONCA Francisco
Université Fédérale de Paraná, Brésil

MICHOT Véronique
Université Paris Saclay, Guyancourt, France

MORON Vincent
Université Aix-Marseille, France

PLANCHON Olivier
Université Bourgogne Franche-Comté, France

QUENOL Hervé
Université Rennes 2, France

RICHARD Yves
Université Bourgogne Franche-Comté, France

ROME Sandra
Université Grenoble-Alpes, France

RONCHAIL Josyane
Université Paris Diderot, France

SALOUI Abdelmalik
Université Hassan II, Casablanca, Maroc

SOUBEYROUX Jean-Michel
Météo-France Toulouse, France

TRABOULSI Myriam
Université Libanaise, Liban

ULLMANN Albin
Université Bourgogne Franche-Comté, France

VANNIER Clémence
Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande

VISSIN Expedit
Université d'Abomey Calavi, Bénin

ZAHARIA Liliana
Université de Bucarest, Roumanie

ISBN 978-2-907696-26-5