



HAL
open science

De la compréhension des systèmes météorologiques violents aux développements d'outils d'aide à la décision en Afrique de l'Ouest

Christophe Lavaysse

► **To cite this version:**

Christophe Lavaysse. De la compréhension des systèmes météorologiques violents aux développements d'outils d'aide à la décision en Afrique de l'Ouest. Météorologie. Université Grenoble - Alpes, 2024. tel-04917294

HAL Id: tel-04917294

<https://hal.science/tel-04917294v1>

Submitted on 28 Jan 2025

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.

Public Domain

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE - ALPES
ÉCOLE DOCTORALE STEP
SCIENCES DE LA TERRE
DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PLANETES

MEMOIRE

pour obtenir le titre de

Habilitation à Diriger des Recherches

de l'Université de Grenoble - Alpes

Présenté et soutenu par

Christophe LAVAYSSE

De la compréhension des systèmes météorologiques violents aux développement d'outils d'aide à la décision en Afrique de l'Ouest

préparé à l'Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble

soutenu le 26 juin 2024

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Alessandra GIANNINI	- Professeure, École Normale Supérieure PSL, Paris
	Nadège MARTINY	- Maître de conférence HDR, Université de Dijon
	Laurent MENUT	- Directeur de Recherche, CNRS, LMD ; Paris
<i>Examineurs :</i>	Vincent MORON	- Professeur, CEREGE, Aix en Provence
	Eric Pascal ZAHIRI	- Maître de Conférence, Université Houphouet Boigny, Abidjan
	Sylvain BIGOT	- Professeur, UGA, Grenoble

Table des matières

I	Introduction	1
1	Présentation et contexte	3
1.1	Enjeux sociétaux et questions scientifiques	3
1.2	État de l'art	4
1.2.1	Les secteurs	4
1.2.2	Les aléas	7
1.2.3	Outils de prévisions et d'aide à la décision	10
2	Animation de la recherche	15
2.1	Expérience dans l'animation de la recherche	15
2.1.1	Introduction aux principaux grands programmes	15
2.1.2	Animation dans les programmes de recherches	20
2.2	Collaborations, reconnaissances nationales et internationales	23
2.3	Valorisation des travaux de recherche	24
2.4	Implications institutionnelles	25
3	Données et outils	27
3.1	Observations	27
3.2	Modèles	28
3.3	Méthodes développées	29
3.4	Diversité des échelles temporelles et spatiales	31
II	Résultats scientifiques	33
4	Synthèse des travaux de recherches	35
5	Compréhension des phénomènes météorologiques	37
5.1	Modes de variabilité et aléas naturels	37
5.1.1	Détection suivi et tendance des aléas	37
5.1.2	Système de grande échelle, mousson	45
5.2	Forçages synoptiques et locaux des évènements	46
5.2.1	Ondes d'Est Africaines	46
5.2.2	Dépression Thermique Ouest Africaine	47
5.2.3	Aérosols désertiques	50
6	Simulation numérique et prédictibilité	55
6.1	Représentation et Sensibilité	55
6.2	Prévisions court et moyen termes	57
6.3	Prévisions Saisonnières	59
6.4	Projections climatiques	62

7	Vers des outils d'aide à la décision	67
7.1	Secteurs agriculture et sécurité alimentaire	67
7.2	Secteurs réduction des risques et santé	69
7.3	Secteurs énergétique, économique et sociétal	70
III	Projet de recherche et mise en oeuvre	73
8	Projet de recherche	75
8.1	Un projet transposable	75
8.2	Études des événements et de leur predictibilité	76
8.3	Applications et soutien à la prise de décision	80
9	Cadre conceptuel de la démarche	83
9.1	Approches	83
9.2	Co-construction et collaborations	84
9.3	Science appliquée et pragmatique	84
9.4	Les données	85
9.5	Soutien institutionnel et budgétaire	87
	Bibliographie	89

Liste d'abréviations

ACASIS Alerte aux Canicules Au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé .	80
ACMAD African Centre of Meteorological Application for Development	24
ACP The African, Caribbean and Pacific Group of States	15
AEW Ondes d'Est Africaines	46
AGRHYMET Agronomie et Hydrologie pour le développement des Systèmes de Cultures de l'Afrique de l'Ouest	24
AMMA Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine	27
ANACIM Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie .	24
ANR Agence Nationale de la Recherche	18
AUC African Union Commission	15
CADDIWA Clouds-Atmospheric Dynamics–Dust Interactions in West Africa	31
CAMS (opernicus Atmosphere Monitoring Service	29
CAPC-AC Centre d'Analyse et de Prévision des Crues - Afrique Centrale	24
CIMA Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale	23
CIMH Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology	24
COF Climate Outlook Forum	20
Copernicus EMS Copernicus Emergency Management Service	17
CSE Centre de Suivi Ecologique	22
CSIR Council for Scientific and Industrial Research	20
CSIS Climate Service Inforamtion System	16
CURAT Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétec- tion	24
DACCIWA Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa	31
DG INTPA Directorate General International Paternship of the European Commission	15
DG JRC Directorate General Joint Research Center of the European Commis- sion	15
ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	22
EEA European Environment Agency	23
EEAS European External Action Service of the European Commission .	23
EFI Extrem Forecast Index	30

ERV Energie Renouvelable Variable	6
GDO Global Drought Observatory	18
GloFAS Global Flood Awareness Service	18
GMES Global Monitoring for Environment and Security	17
GWIS Global Wildfire Information System	18
HMCIS HydroMétéorologie, Climat et Interactions avec les Sociétés	21
HYMEX Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment	31
ICPAC IGAD region Climate Prediction and Applications Centre	24
IDEX Initiatives d'Excellence	21
IFPRI International Food Policy Research Institute	72
IGE Institut des Geosciences de l'Environnement	21
IPEF Ingénieur des Ponts, Eaux et Forêts	23
IPSL Institut Pierre-Simon Laplace	22
KIT Karlsruher Institut für Technologie	22
LAPA-MF Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides	24
LMI Laboratoire Mixte International	25
LPAOSF Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang	24
NERC Natural Environmental Research Council	22
PEPR Programmes et équipements prioritaires de recherche	81
RCC Regional Climatic Center défini par WMO pour le projet ClimSA	12
REA Research Executive Agency of the European Commission	23
S2S Subseasonal to Seasonal prediction project	11
SADC Southern African Development Community	21
SAFIRE Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	28
SAMOA SIDS Accelerated Modalities of Action	16
SEVAM Santé Environnement dans les Villes Africaines et Malgache	23
SHL Saharan Heat Low	40
SMHN Services Météorologiques et Hydrologiques Nationaux	16
SODEXAM Société D'Exploitation de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique	24
SOM Self Organizing Mapping	30
SPI Standardized Precipitation Index	30
SPREP Secretariat of the Pacific Regional Environment Program	24

STEWARd STatistical Early WArning systems of weather-related Risks from probabilistic forecasts, over cities in West Africa	18
TRACCS TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques	81
UIP User Interface Platform	16
UNCCD Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertificatio	16
UNCDB Convention des Nations unies sur la diversité biologique	16
UQAM Université du Québec à Montréal	22
WMO World Meteorological Organization	10

Première partie

Introduction

Présentation et contexte

Contents

1.1	Enjeux sociétaux et questions scientifiques	3
1.2	État de l'art	4
1.2.1	Les secteurs	4
1.2.2	Les aléas	7
1.2.3	Outils de prévisions et d'aide à la décision	10

1.1 Enjeux sociétaux et questions scientifiques

Tout d'abord, il est essentiel de clarifier le sujet abordé dans ce manuscrit. Celui-ci traite des événements violents ou potentiellement à fort impact. Il convient de les distinguer des événements extrêmes, qui se réfèrent à des phénomènes situés aux extrémités de la distribution, caractérisés par leur rareté et justifiés statistiquement. En revanche, les événements violents concernent des phénomènes météorologiques susceptibles de provoquer des conséquences significatives ou graves sur la société, l'économie ou l'environnement. La principale différence réside dans le fait que cette étude se focalise sur les conséquences potentielles, plutôt que sur la rareté ou l'intensité des événements. Bien que dans certains cas les deux types d'études travaillent sur des événements identiques, il n'est pas nécessaire qu'un événement soit extrême pour avoir un impact. Par ailleurs, dans les études de prévisions axées sur les impacts, il est impératif de disposer d'un nombre suffisant de cas pour mener des analyses et des validations significatives en vue de la calibration de modèles statistiques. Dans ce contexte, les phénomènes à fort impact seront donc au cœur de notre étude.

En Afrique de l'Ouest, les risques associés aux aléas naturels et au changement climatique représentent des défis majeurs auxquels sont confrontés les sociétés de la région. Ces risques ont des répercussions profondes sur les populations, les économies et les écosystèmes. Ces aléas naturels exacerbent les vulnérabilités déjà existantes dans de nombreuses communautés ouest-africaines. Les populations vivant dans des zones côtières ou arides sont particulièrement exposées aux effets dévastateurs des tempêtes et des sécheresses. Les inondations peuvent détruire les infrastructures vitales telles que les habitations, routes, cultures et troupeaux, entraînant des pertes humaines et économiques importantes et des déplacements massifs de populations. De plus, le changement climatique aggrave ces risques en amplifiant l'intensité et la

fréquence des événements météorologiques extrêmes. Les modèles climatiques prévoient une augmentation des températures et des précipitations irrégulières. Ces changements climatiques ont des conséquences directes sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et la santé des populations, mettant en péril les moyens de subsistance et exacerbant les inégalités sociales déjà présentes. Ces conséquences sont souvent amplifiées quand plusieurs aléas apparaissent simultanément ou successivement.

Pour faire face à ces enjeux sociétaux, il est important d'investir dans la prévention, la préparation et la résilience aux catastrophes. Cela est essentiel pour réduire les impacts socio-économiques des aléas naturels et du changement climatique et assurer un avenir plus sûr et plus durable pour les populations d'Afrique de l'Ouest. Face à ces enjeux, plusieurs questions scientifiques apparaissent qui peuvent se poser dans un processus itératif :

- Comment objectivement définir un tel événement à potentiel fort impact ? Est-il possible de fixer, dans le contexte d'un aléa unique, des seuils spécifiques d'impacts ?
- Ces dernières définitions sont-elles dépendantes lorsqu'on aborde les risques multi-aléas ?
- Quelles sont les facteurs sociaux qui peuvent influencer ces risques ? Quel rôle joue l'environnement associé à l'évènement (la concomitance ou la succession d'évènements, l'importance des facteurs environnants) ?
- Est-il possible de prévenir ces risques ? Une fois le lien entre les aléas et les impacts établi, est-il possible de transférer ces connaissances dans un contexte de prévision et de proposer des prévisions basées sur ces risques ?
- Les informations sont-elles bien reçues et comprises ?
- Comment prendre en compte l'adaptation des populations, des sociétés face à un (ou plusieurs) aléas ?
- Quelle est l'efficacité réelle et la valeur intrinsèque du système en question ? Où résident les principaux obstacles rencontrés ?

Bien que mes expériences passées aient couvert l'échelle globale et diverses régions spécifiques, la région la plus fréquemment étudiée où mes travaux ont été largement menés demeure l'Afrique de l'Ouest. De plus, et comme mentionné précédemment, les enjeux climatique, météorologique et sociétaux (croissance de la population, pauvreté et faible résilience, vulnérabilité), sont considérables. Il est prioritaire de mieux comprendre les relations causales entre les événements violents et leurs impacts dans cette région. C'est la raison pour laquelle la région principale de mes projets de recherche reste l'Afrique de l'Ouest, bien qu'une exploration plus tard vers d'autres régions soit envisageable.

1.2 État de l'art

1.2.1 Les secteurs

Il convient, dans un premier temps, de présenter les différents secteurs visés par les études antérieures et le projet proposé dans ce document.

1.2.1.1 DRR et santé

La région de l'Afrique de l'Ouest est confrontée à une série de défis en matière de santé des populations affectées par les aléas naturels extrêmes tels que les sécheresses, les inondations, les vagues de chaleurs et les épidémies. Ces événements peuvent avoir des impacts dévastateurs sur la santé des populations locales. Les inondations ont eu des répercussions directes très fortes sur les populations dans les 20 dernières années en Afrique de l'Ouest. Des événements avec de très lourds bilans humains ont été enregistrés :

- 2009, Afrique de l'Ouest, près de 200 victimes
- 2010, Niger, 10 victimes
- 2012, Nigéria, plus de 300 victimes
- 2022, plusieurs pays Ouest Africains, plus de 600 victimes au Nigeria, plus de 150 au Niger, au moins 15 en Côte d'Ivoire
- 2023, Niger, au moins 30 victimes lors de plusieurs événements.

Les causes peuvent être des noyades et accidents ou liées à la propagation des maladies qui contaminent les sources d'eau potable créant ainsi des conditions propices à la reproduction des moustiques vecteurs de maladies (paludisme, la dengue et le choléra, [Watts et al. 2015](#), [Suhr and Steinert 2022](#)). La santé des populations est aussi très impactée par les vagues de chaleurs [[Faye et al., 2021](#), [Ncongwane et al., 2021](#)] et la qualité de l'air. Pour faire face à ces impacts, il est absolument nécessaire de développer des stratégies d'anticipation à ces catastrophes. Des mesures telles que l'amélioration des systèmes de surveillance des aléas naturels (dont le système Early Warning for All de WMO) et le développement de prédicteurs des vecteurs de maladies pour les rendre plus résilientes aux chocs climatiques, et de prévention des maladies peuvent aider à atténuer les impacts des aléas naturels sur la santé.

1.2.1.2 Agriculture et sécurité alimentaire

L'agriculture et la sécurité alimentaire sont des secteurs évidemment fondamentaux en Afrique de l'Ouest. Ils représentent des activités économiques vitales et centrales dans la subsistance de millions de personnes. Ces secteurs font face à de nombreux défis, notamment le changement climatique [[Defrance et al., 2020](#)], la dégradation des terres [[Mukura et al., 2023](#)], la désertification [[Darkoh, 1998](#)] et les conflits entre usagers [[Shettima et al., 2008](#)]. La croissance démographique rapide exerce une pression supplémentaire sur ce dernier point car les ressources naturelles déjà limitées sont surexploitées entraînant une diminution de la fertilité des sols et de la ressource en eau [[Lutz et al., 2010](#)]. Les conséquences de mauvaises conditions météorologiques sur l'agriculture peuvent poser des problèmes de sécurité alimentaire. Les sécheresses récurrentes et l'augmentation des températures ont un impact négatif sur la production agricole et la disponibilité des pâturages, ce qui rend difficile la subsistance des agriculteurs et des éleveurs [[Roudier et al., 2011](#)]. Avec l'augmentation des événements de précipitations extrêmes menaçant les systèmes agricoles pluviaux [[Sultan and Gaetani, 2016](#)], il est nécessaire

de mieux identifier et comprendre l'impact de ces aléas sur ces services afin de fournir des indicateurs de sécurité alimentaire aux services d'information climatique.

1.2.1.3 Énergie

La plupart des habitants de l'Afrique, surtout en milieu rural, manquent d'accès à l'électricité, et une grande partie de la population rurale dépend toujours de la biomasse traditionnelle [Outlook, 2014]. L'accès à l'électricité est l'un des principaux problèmes même si la demande est bien plus faible (entre 50 et 100 fois, Lee and Leal 2014) par rapport aux pays développés. Or, il est indéniable que la fourniture de services énergétiques est un élément essentiel, mais pas le seul, pour sortir l'Afrique subsaharienne de la pauvreté [Casati et al., 2023, Moner-Girona et al., 2021]. De même, il est clair que les services énergétiques doivent être envisagés comme un moyen d'atteindre un objectif plus vaste, plutôt que comme une fin en soi.

L'accès au réseau électrique national dans les zones péri-urbaines et rurales est très coûteux, lent et financièrement non viable [Szabo et al., 2011]. De plus, l'Afrique produit 81 % de son électricité à partir de sources thermiques [GWEC, 2019]. Cette dépendance aux combustibles fossiles expose les pays aux fluctuations des prix mondiaux des matières premières [Letcher, 2023]. Les systèmes électriques décentralisés basés sur des sources Energie Renouvelable Variable (ERV) telles que l'énergie éolienne ou solaire peuvent fournir une énergie abordable, fiable et à faible émissions de CO₂, en cohérence avec les Accords de Paris. Bien que l'Afrique de l'Ouest possède des ressources importantes d'ERV, de telles sources sont sensibles à la variabilité et aux caractéristiques de la ressource, ce qui peut compromettre l'intérêt et la fiabilité d'un tel système.

La ressource énergétique naturelle la plus abondante sur le continent est l'énergie solaire [Abdelrazik et al., 2022]. En tant que source d'énergie renouvelable, le solaire est propre et le coût de l'énergie solaire diminue rapidement [Sanoh et al., 2014]. Des analyses sur la faisabilité et l'exploitation de cette énergie prometteuse sont déjà lancées dans la plupart des régions d'Afrique de l'Ouest [Ofosu-Peasah et al., 2021, Antonanzas-Torres et al., 2021, Oyewo et al., 2023, Neher et al., 2020]. Ainsi de nombreux projets d'énergie photovoltaïque solaire sont actuellement en cours de planification et/ou de développement afin de combler de manière durable le fossé croissant entre la demande et l'offre d'électricité [Ozoegwu and Akpan, 2021, Ramdé et al., 2013, Ramde et al., 2020, Azoumah et al., 2010, Kanté et al., 2023]. Cependant, le changement climatique affectera probablement la production d'énergie solaire et les facteurs atmosphériques qui la contrôlent [Sawadogo et al., 2020, Feron et al., 2021].

Bien que seulement 1% de la production électrique en Afrique provenant de l'éolien [GWEC, 2019], cette source d'ERV pourrait être intéressante dans un contexte de mix énergétique [Sterl et al., 2018, 2020]. De plus le continent dispose d'importantes ressources dans cet ERV puisque 4 des 10 pays les plus dotés en énergie éolienne dans le monde se trouvent en Afrique [Buys et al., 2009], particulièrement en

Egypte, au Maroc et en Tunisie, même s'il existe encore des incertitudes dans notre compréhension du potentiel éolien et de sa variabilité à différentes échelles de temps, en particulier. Il conviendra donc de mieux comprendre et anticiper les périodes de faible ressource. L'évaluation des variations spatiales et temporelles du potentiel éolien en vue d'analyses de faisabilité de production d'énergie éolienne a été fait et a souligné à de nombreuses reprises l'intérêt de telles installations sur le continent et en particulier en Afrique du Nord [Mentis et al., 2015, Mas' ud et al., 2017, Didane et al., 2017, Sedzro et al., 2022, Kazimierczuk, 2019]. Cependant, il manque des informations robustes et pratiques sur les périodes de sécheresses énergétiques. Ces travaux doivent s'inscrire pour la période actuelle mais aussi pour les années à venir ou de forts changements et incertitudes persistes [Sawadogo et al., 2019, Akinsanola et al., 2021] Il reste urgent de contribuer au développement de ces énergies en anticipant mieux leurs productions, comme par exemple la présence de nuages et d'aérosols. Il sera particulièrement intéressant de mieux prévoir les sécheresses énergétiques, période durant lesquelles ces ressources sont très peu disponibles.

1.2.1.4 Économie et société

Avec des aléas extrêmes, augmentant en fréquence et en intensité dans une région avec une grande fraction de la population à très faibles revenus, apparaissent d'importants défis économiques et sociétaux. Par exemple, les communautés pastorales vendent souvent leurs troupeaux à des prix bas pour amortir les chocs climatiques (ou aléas), ce qui peut contribuer à les piéger dans des cycles de pauvreté [Jensen et al., 2017]. Ces impacts peuvent renforcer certaines inégalités. En effet, Quisumbing et al. [2018] constatent que les actifs des femmes sont les premiers à être liquidés lorsqu'ils font face à un choc. La variabilité climatique affecte aussi les taux de mariage à un jeune âge [Corno et al., 2020]. Il existe des outils et des services pour apporter de l'aide aux ménages ou à des communautés dans ces régions. Les résultats préliminaires suggèrent que la conception, le type de choc et le contexte influencent l'efficacité de l'aide. Une anticipation (ou une réponse rapide) des aides financières est essentielle pour réduire les pertes d'actifs des ménages [Pople et al., 2021, Balana et al., 2023]. Une meilleure prévision des impacts d'événements violents et une identification rapide et détaillée d'un événement qui s'est produit permet de contribuer à l'amélioration de ses efforts.

1.2.2 Les aléas

A la vue des secteurs présentés précédemment, les aléas les plus impactant peuvent être mieux définis. Il s'agit principalement des aléas suivant :

- les périodes de déficit ou d'excédent de pluie (incluant les sécheresses et les événements courts et violents),
- les vagues de chaleur,
- les périodes à fortes concentrations de poussières et de détérioration de la

qualité de l'air.

Les motifs qui ont conduit à la sélection de ces risques dans la région d'étude sont assez cohérents, cependant, je vais résumer ici quelques informations justifiant ces choix.

1.2.2.1 Phases sèches et humides

Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, l'Afrique a connu l'un des signaux climatiques interdécennaux les plus significatifs. Une sécheresse sévère du Sahel a affecté la région des années 1970 aux années 1980 [Held et al., 2005]. Depuis 1990, de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest ont signalé des événements de crues fréquents. Un nouveau schéma de variabilité des précipitations a émergé depuis les années 1990 [Lebel and Ali, 2009, Nicholson et al., 2007], caractérisé par un mélange de fortes précipitations et crues [Panthou et al., 2012, 2014, Maidment et al., 2015, Sanogo et al., 2015, Tazen et al., 2019, Zahiri et al., 2016, Trambly et al., 2020] et de longues périodes sèches [Salack et al., 2014, Sarr et al., 2015]. Les sécheresses peuvent avoir un impact majeur sur les activités humaines telles que l'agriculture et la gestion des ressources en eau, la production d'énergie, le tourisme et les loisirs [Wilhite et al., 2014, Fraser et al., 2013]. Les sécheresses figurent parmi les catastrophes naturelles les plus coûteuses, surtout lorsque les impacts de la sécheresse sont répartis sur de vastes régions et durent plusieurs mois [Lloyd-Hughes and Saunders, 2002, Below et al., 2007]. Ces impacts sont aussi violents à l'échelle locale sur les populations [Lottering et al., 2021]. En ce qui concerne les moyens de détecter ces événements, il existe une large variété de définitions de sécheresse. Elle peut être météorologique, hydrologique, ou agricole avec des moyens de les définir et de les caractériser qui leur sont propres, avec un souci de s'adapter temporellement et spatialement aux conditions locales [Pietzsch and Bissolli, 2011]. Comme on l'a vu précédemment, la région a aussi enregistré plusieurs événements de fortes précipitations très impactants [Di Baldassarre et al., 2010, Merz et al., 2021]. Les impacts peuvent être aussi sur l'agriculture, le pastoralisme et l'économie [Balgah et al., 2023].

Cette distribution hybride des précipitations, avec une intensification des alternances de phases humides et sèches, est attribuable au réchauffement climatique par le biais de la variabilité interne des facteurs dynamiques de l'atmosphère régionale [Salack et al., 2016]. Ces impacts sur le nexus eau-alimentation-énergie comprennent la perte de rendement/biomasse, la croissance réduite et le développement des cultures, mais aussi les inondations agricoles, l'engorgement en eau des cultures en terres basses et l'érosion des sols arables (par ruissellement excessif).

1.2.2.2 Aérosols

D'autre part, l'Afrique du Nord est la plus grosse source d'émission de poussière au monde [Evan et al., 2016]. Une fois soulevée dans l'atmosphère avec des sources comme la région de Bodélé [Todd et al., 2007], la poussière est ensuite généralement transportée vers le sud et l'Ouest, à travers le Sahel, ou vers le nord en direction

de l'Europe [Engelstaedter et al., 2006]. Il a été noté une augmentation de ces soulèvements depuis les années 70s [Prospero and Lamb, 2003], essentiellement causée par le changement d'usage des sols et les sécheresses au Sahel et Sahara [Giannini et al., 2003, Mulitza et al., 2010]. Les impacts sur la santé humaine sont significatifs en détériorant localement la qualité de l'air et affectant les systèmes respiratoires. Le lien entre les aérosols et le développement d'épidémies mortelles de méningite ou des corrélations ont été établies entre le vent, la poussière, la température et ces épidémies pendant la saison sèche [Martiny et al., 2007, De Longueville et al., 2010, 2013]. D'autre part, les tempêtes de sable peuvent paralyser l'économie du pays pendant plusieurs jours : la perte de visibilité impacte les liaisons routières et aériennes, la diminution du fonctionnement des fermes solaires ou la détérioration des sols et impacter les rendements des cultures [Mahowald et al., 2007, Ben-tayeb et al., 2020, Monteiro et al., 2022, Sivakumar, 2005]. Enfin les aérosols ont un impact direct et indirect fort sur l'atmosphère en influençant le rayonnement et la convection [Choobari et al., 2014].

Les événements de poussière dépendent principalement de l'intensité et des rafales de vent, de la taille des particules, de l'humidité, du couvert végétal, et enfin de la topographie. Des indices de vent, tel le Dust Uplift Potential DUP [White, 1979], ont été mis en place afin d'identifier les événements météorologiques susceptibles de soulever ces panaches. Des réseaux d'observations et les données satellites ont permis de bien caractériser les panaches en Afrique de l'Ouest et d'avoir dorénavant une bonne connaissance de leurs variabilités spatio-temporelles et leurs caractéristiques [Marticorena et al., 2010]. Parce que très impactants, d'important efforts ont été menés pour mieux les simuler et les anticiper [Grell et al., 2005, Khvorostyanov et al., 2013] et des études ont permis de valider des modèles régionaux sur la représentation de leurs impacts sur l'atmosphère notamment en Afrique [Schmechtig et al., 2011, Mazzeo et al., 2022].

1.2.2.3 Vagues de chaleur

Les anomalies de température extrême ont des impacts importants sur la santé humaine et les activités. Une vague de chaleur peut entraîner une augmentation de la mortalité et des hospitalisation, surtout pour les plus jeunes, les plus âgés ou les personnes sensibles (dépressives, troubles cardio-vasculaires ou cerebro-vasculaires, et diabétiques, Kovats and Hajat 2008). La surveillance et la caractérisation de ces événements sont primordiales pour replacer un événement dans son contexte historique et évaluer les impacts potentiels sur la santé humaine et les activités en combinant les informations avec des données d'autres catalogues (comme EM-DAT¹, qui inclut des informations sur les impacts).

L'intensité et la durée de la vague, mais aussi la période de l'année, sont des déterminants importants de l'impact sur la santé [Montero et al., 2012, Rocklov et al., 2012]. Il existe un grand nombre de paramètres sur lesquels il est possible de jouer pour détecter et caractériser ses vagues. Tout d'abord la durée. McGregor

1. <http://www.emdat.be>

et al. [2015] considèrent une durée minimale de 2 ou 3 jours consécutifs pour définir un tel évènement. En ce qui concerne les variables, il est aussi possible d'utiliser un grand nombre d'indices, soit la température seule, soit associée à d'autres variables. Certains de ces indicateurs ont été développés pour décrire les conditions complexes d'échange de chaleur entre le corps humain et son environnement thermique. Les indices consistent généralement en des combinaisons de température et de différentes mesures d'humidité ou de vitesse du vent - tels que l'humidex [Smoyer-Tomic et al., 2003], la température nette efficace [Li and Chan, 2000], le Heat Indiex [Steadman, 1979] ou la température apparente [Steadman, 1984]. Ces indices sont plus ou moins utiles suivant les saisons, les régions et le climat. Enfin, la plupart des études se focalisent surtout sur les conditions diurnes, mais les conditions nocturnes peuvent également jouer un rôle important sur la capacité du corps à récupérer [Zuo et al., 2015]. Cet aléas est particulièrement important car les vagues de chaleur pourraient toucher plus de 1 milliard de personnes dans les villes africaines si on prend en compte les îlots de chaleur urbains [Marcotullio et al., 2021].

1.2.3 Outils de prévisions et d'aide à la décision

1.2.3.1 Court et moyen termes

Contrairement aux origines frontales dans les latitudes plus élevées, les variables météorologiques dans les tropiques sont principalement influencées à des systèmes de plus petite échelle [Mathon et al., 2002, Fink et al., 2006, Houze Jr et al., 2015], compliquant les modèles [Haiden et al., 2012]. Cependant, lorsque des forçages synoptiques sont forts, la prévisibilité peut s'améliorer [Söhne et al., 2008, Van der Linden et al., 2017]. Dans ce contexte, les régions tropicales peuvent être considérées comme des régions où la prévision des précipitations est particulièrement difficile. TIGGE, "THORPEX Interactive Grand Global Ensemble" [Swinbank et al., 2016] est un programme de recherche météorologique de World Meteorological Organization (WMO) pour fournir des données de prévision ensemblistes opérationnelles à la communauté internationale de recherche. Il a permis par exemple l'étude de produits d'alertes précoces des fortes précipitations, des vents violents et vagues de chaleurs [Matsueda and Nakazawa, 2015], la capacité des modèles à prévoir les principales caractéristiques des précipitations de la mousson ouest-africaine [Louvet et al., 2016] ou l'importance des méthodes de post-traitement des sorties de ces modèles pour considérablement améliorer les prévisions [Vogel et al., 2018]. Enfin en ce qui concerne les aérosols, la prévision reste un important défi, mais elle présente des capacités intéressantes pour des courtes échéances, malgré certaines incertitudes sur l'altitude des panaches ou leur intensité notamment [O'Sullivan et al., 2020, Akritidis et al., 2020, Menut, 2023].

Selon plusieurs études [Vitart, 2014, Vitart et al., 2017], il existe un fossé, connu sous le nom de "désert de prévisibilité", entre les prévisions temporelles de moyen terme (quelques jours) et long terme (quelques mois). C'est d'autant plus regrettable que de nombreuses décisions (agriculture, sécurité alimentaire, gestion de l'eau, ré-

duction des risques de catastrophe, santé) peuvent être prises à ces échéances. Pour cette raison, le projet Subseasonal to Seasonal prediction project (S2S) a été mis en place par WMO. Le programme fournit aussi une riche base de données de modèles probabilistes étendues. A ces échéances il devient d'utile d'intégrer les grands modes d'oscillations océaniques ou régionales. Les compétences prédictives des différents modèles S2S ont été largement étudiées, par exemple pour l'alerte précoce au paludisme [Tompkins and Di Giuseppe, 2015]. En Afrique, des études ont porté sur la predictibilité de la mousson [Moron et al., 2020, Moron and Robertson, 2020, Moron et al., 2018]. Vigaud et al. [2019] ont montré que les prévisions étaient statistiquement significatives au delà de 3 semaines. Cela prouve qu'il est possible d'obtenir des prévisions qui dépassent les horizons temporels habituels à l'échelle météorologique et qui ne sont pas simplement liées aux signaux ENSO ou MJO.

1.2.3.2 Saisonnier et climatique

Aux horizons de prévisions plus longues comme les prévisions saisonnières, les modes de variabilités sont fortement contrôlés par la variabilité des SST. Des prévisions statistiques utilisant plusieurs variables ont été développées : Nicholson [2014] avec des champs de vent et de pression ; Vellinga and Milton [2018] avec des indicateurs MJO et QBO. La capacité des modèles statistiques à produire des prévisions en temps réel est souvent limitée en raison de la méthode de leur construction, les erreurs courantes étant une sur-adaptation au modèle et l'utilisation de trop de prédicteurs. Ils omettent également souvent de prendre en compte la relation non stationnaire entre les précipitations et les prédicteurs [Bahaga et al., 2019].

Les modèles dynamiques ont considérablement progressé et sont de plus en plus utilisés pour produire des prévisions saisonnières. Cela est principalement dû au fait que les conditions initiales et les limites sont prises en compte [Doblas-Reyes et al., 2013]. La qualité des prévisions dépend également des influences des forçages à grande échelle tels que l'oscillation australe El Niño (ENSO, Landman et al. 2019). Pour certaines régions africaines, Tompkins and Feudale [2010] ont constaté qu'il était possible de reproduire la progression de la mousson africaine. et que la capacité du modèle à prédire l'anomalie des précipitations de la mousson en Afrique de l'Ouest a augmenté ces dernières années. Dutra et al. [2014] ont montré que les prévisions saisonnières ont le potentiel de prévoir les sécheresses et/ou les anomalies de précipitations, de température de l'air de surface et d'humidité du sol en Afrique jusqu'à plusieurs mois à l'avance, à condition de viser les prévisions sur de longues accumulations.

Les modèles climatiques sont des outils essentiels pour comprendre les processus climatiques et leur évolution à l'échelle mondiale [Rockel et al., 2008, Rodríguez-Fonseca et al., 2011, Ruti et al., 2011]. Cependant, il a été établi qu'il est nécessaire de corriger les sorties [Cannon et al., 2015] car notamment ils manquent de résolution spatiale pour résoudre adéquatement les processus méso-échelles qui sont essentiels pour contrôler la variabilité dans cette région [Sylla et al., 2019].

La réponse régionale au réchauffement climatique était incertaine dans les modèles de la troisième phase du projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP3; Meehl et al. 2007) utilisés pour le quatrième rapport d'évaluation (AR4) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui diverge même sur le signe des anomalies futures de précipitations sur le Sahel [Biasutti and Giannini, 2006]. Roehrig et al. [2013] indiquent qu'en Afrique de l'Ouest, les modèles CMIP5 n'ont pas encore atteint un degré de maturité qui permettrait de les utiliser directement pour anticiper le changement climatique et ses impacts, en particulier en ce qui concerne les précipitations. De nombreuses études ont évalué la capacité des modèles climatiques régionaux en Afrique, à reproduire la climatologie actuelle de l'Afrique [Panitz et al., 2014, Dosio et al., 2015, Klutse et al., 2016]. Un des principaux bénéfices est la capacité des RCM à simuler des événements extrêmes [Giorgi et al., 2014]. Dosio et al. [2019], à l'aide d'une large gamme de modèles climatiques régionaux et globaux montrent une cohérence générale entre les RCM et les GCM, mais des incertitudes persistent dans certaines régions, notamment en Afrique centrale et dans certaines parties de l'Afrique de l'Ouest.

1.2.3.3 Services climatiques

Le développement et l'utilisation d'outils de soutien à la décision dans le domaine de la météorologie et du climat, y compris les services climatiques, sont devenus primordiaux pour relever les défis posés par des schémas météorologiques de plus en plus variables et extrêmes [Lemos and Rood, 2010]. Ces outils englobent un large éventail de technologies et de méthodologies, allant de modèles informatiques sophistiqués à des applications conviviales accessibles à divers acteurs [McNie, 2007]. Les services climatiques, par exemple, offrent des informations et des prévisions sur mesure pour aider les processus décisionnels dans divers secteurs, notamment l'agriculture, la réduction des risques de catastrophe et la santé publique [Buizer et al., 2016]. En intégrant des données historiques, des techniques de modélisation avancées et une analyse experte, les outils de soutien à la décision permettent aux décideurs politiques, aux entreprises et aux communautés d'anticiper et de réduire les impacts de la variabilité et du changement climatiques [Wilbanks and Kates, 2013]. De plus, ces outils facilitent les stratégies d'adaptation et les mesures de renforcement de la résilience, favorisant ainsi des réponses plus éclairées et proactives aux risques liés aux conditions météorologiques et climatiques [Rayner et al., 2005]. Alors que le changement climatique s'intensifie, le perfectionnement continu et l'adoption généralisée d'outils de soutien à la décision seront essentiels pour promouvoir le développement durable et renforcer la résilience sociétale face aux risques climatiques évolutifs.

En Afrique, plusieurs services climatiques sont portés par les Regional Climatic Center définis par WMO pour le projet ClimSA (RCC)s. Il est important de soutenir ces outils mais aussi de bien évaluer la plus value apportée. Bliefert et al. [2019] ont évalué la performance des prévisions PRESASS, pour l'Afrique de l'Ouest, et

ont révélé des problèmes à "surprévoir" la catégorie proche de la normale. Les auteurs identifient également que de petits changements dans la probabilité rapportée peuvent entraîner de grands changements dans la valeur prévisionnelle. Ces résultats soutiennent la nécessité pour les RCCs d'utiliser des méthodes plus objectives pour atténuer ces résultats. Ces travaux sont confirmés par [Pirret et al. \[2020\]](#)

Finalement, un des plus grand défi de ces services reste l'approvisionnement en données sans embargo [[Tompkins et al., 2019](#)]. Ceci est particulièrement vrai pour les prévisions étendues ou très peu de centres météorologiques proposent leurs sorties de modèles en temps réel.

Animation de la recherche

Contents

2.1	Expérience dans l'animation de la recherche	15
2.1.1	Introduction aux principaux grands programmes	15
2.1.2	Animation dans les programmes de recherches	20
2.2	Collaborations, reconnaissances nationales et internationales	23
2.3	Valorisation des travaux de recherche	24
2.4	Implications institutionnelles	25

2.1 Expérience dans l'animation de la recherche

2.1.1 Introduction aux principaux grands programmes

2.1.1.1 ClimSA

Les régions tropicales sont des régions particulièrement vulnérables aux impacts de la variabilité et du changement climatique. Pratiquement chaque pays, îles et sous-région sont affectés par des phénomènes météorologiques et climatiques violents, les obligeant à ajuster continuellement leurs programmes de développement, souvent à des coûts considérables. La capacité limitée de ces régions à fournir des informations adéquates et fiables sur le changement climatique et la variabilité climatique affecte ses efforts pour renforcer sa résilience face aux impacts de ces phénomènes. C'est dans ce but que la Déclaration d'Addis-Abeba, appelant à la mise en œuvre du Cadre sur les services climatiques dans ces régions, a été signé entre l'African Union Commission (AUC), le groupe des États membres du groupe The African, Caribbean and Pacific Group of States (ACP) avec des partenaires européens : Directorate General International Partnership of the European Commission (DG INTPA), Directorate General Joint Research Center of the European Commission (DG JRC) et EUMETSAT. Cela a conduit à identifier le développement et la fourniture de services climatiques comme l'une des priorités de la Onzième Fonds européen de développement pour la coopération intra-ACP. L'objectif est de "renforcer la production, la disponibilité, la fourniture et l'application de prévisions et services climatiques basés sur la science". Deux résultats liés aux services climatiques sont attendus, tout d'abord une amélioration de la qualité et de la quantité des produits et services climatiques offerts par les Centres climatiques régionaux ou

RCCs et les Services Météorologiques et Hydrologiques Nationaux (SMHN), initialement pour 5 secteurs sensibles au climat : l'agriculture et la sécurité alimentaire, la santé, l'eau, la réduction des risques de catastrophe et l'énergie. D'autre part, au cours de ce programme, les RCCs seront certifiés par WMO et reconnus comme des centres régionaux d'excellence par les États membres de l'Union Africaine '.

Le programme ClimSA contribue donc à la réalisation des objectifs de plusieurs cadres de développement internationaux : Agenda 2063 pour l'Afrique, Objectifs de développement durable des Nations unies pour 2030, l'Accord de Paris sur le changement climatique, accord de Sendai, la voie d'action accélérée des petits États insulaires en développement ou SIDS Accelerated Modalities of Action (SAMOA), la Convention des Nations unies sur la diversité biologique (UNCDB) et la Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD). Les états membres du Groupe de ACP, sont les bénéficiaires de ce programme.

Doté au total de 85M€, l'objectif principal du programme ClimSA est de favoriser le développement durable sur le continent en améliorant les processus de prise de décision et les pratiques grâce à des options d'adaptation informées à la variabilité et au changement climatiques. Grâce à des approches innovantes, de l'utilisation de données satellitaires, de modèles climatiques avancés et de systèmes d'information géographique, le programme permet aux RCCs et pays participants de mieux évaluer et de prévoir les impacts des événements violents, et des changements climatiques sur leurs territoires. Plus spécifiquement, le programme vise à renforcer l'ensemble de la chaîne de valeur des services climatiques, de l'accès à l'information à la génération et à la fourniture de services climatiques, en passant par l'engagement des parties prenantes et le renforcement des capacités des utilisateurs pour assurer une utilisation efficace des services.

Cinq principaux résultats sont attendus de ce programme :

- a Une interaction structurée entre les utilisateurs, les chercheurs et les fournisseurs de services climatiques en Afrique via des plateformes d'interface utilisateur ou User Interface Platform (UIP)s ;
- b Un renforcement de la fourniture de services climatiques aux niveaux continental, régional et national, ainsi que des systèmes d'information sur les services climatiques ou Climate Service Information System (CSIS) ;
- c Un meilleur accès aux informations climatiques grâce au renforcement des systèmes d'observation et de surveillance, ainsi que de la recherche, de la modélisation et de la prédiction ;
- d Un renforcement de la capacité des régions africaines à générer et à appliquer des informations climatiques et des produits pertinents pour leurs préoccupations spécifiques ;
- e Une prise de décision basée sur le climat en Afrique, y compris l'intégration du climat dans les processus décisionnels.

2.1.1.2 GMES & Africa phase 2

Le programme Global Monitoring for Environment and Security (GMES) & Africa II vise à soutenir les organisations africaines, les décideurs politiques et les praticiens afin de faire un usage plus efficace des données d'observation de la Terre pour développer des services d'information opérationnels pertinents afin de soutenir la gestion durable des ressources naturelles. Il s'agit de soutenir en particulier la chaîne de valeur des services d'information sur l'eau et les ressources naturelles, les zones marines et côtières, de l'accès à l'information à la génération et à la fourniture de services, ainsi que de l'engagement et de la capacité des utilisateurs à assurer l'utilisation de ces services.

La logique d'intervention repose sur deux piliers principaux : (i) le cadre politique et institutionnel ; et (ii) l'accès aux données d'observation de la Terre et aux services d'information, complétés par trois axes transversaux d'intervention : (iii) le renforcement des capacités ; (iv) la gestion des connaissances et (v) la sensibilisation, l'adoption et la diffusion. Des informations fiables sont cruciales pour renforcer la résilience et améliorer les moyens de subsistance, en particulier pour les groupes vulnérables. La gestion efficace des ressources naturelles est essentielle pour prévenir l'épuisement et atténuer les risques, notamment les maladies infectieuses émergentes issues de la faune et des changements environnementaux. La science et la technologie spatiales, en particulier l'observation de la Terre, jouent un rôle primordial dans le soutien à la gestion durable des ressources et la résolution des défis dans un contexte de changement climatique. Renforcer le lien entre les données scientifiques et la prise de décision politique est nécessaire pour garantir une appropriation et un financement adéquats des initiatives régionales et nationales. Une mise en œuvre coordonnée des politiques et des efforts de renforcement des capacités est nécessaire pour fournir des services d'information basés sur l'observation de la Terre aux décideurs et au public, en alignant les objectifs de gestion à long terme des ressources naturelles et de l'eau.

2.1.1.3 Copernicus EMS : GDO et GLOFAS

Copernicus Emergency Management Service (Copernicus EMS) est un service européen qui fournit des informations géospatiales en temps quasi réel lors de situations d'urgence, telles que des catastrophes naturelles ou des crises humanitaires. Il utilise des données provenant de satellites et d'autres sources pour surveiller et évaluer les situations d'urgence, fournissant ainsi un soutien crucial aux autorités locales, nationales et internationales dans la gestion des crises. Il est composé de 3 activités :

- l'activité de mapping à la demande, pour produire, soit dans les heures qui suivent, des informations géospatiales sur les impacts d'un aléas météorologiques, soit avant ou longtemps après un événement (plusieurs mois) des informations sur la prévention, la préparation et les recovery des risques.

- l'activité de mapping de l'installation et la distribution des populations afin de proposer des indices d'exposition
- l'activité de suivi et d'alerte précoce des aléas météorologiques, et plus spécifiquement pour 3 aléas majeurs, les sécheresses via l'Observatoire des Sécheresses ou Global Drought Observatory (GDO)¹, le système mondial d'alerte sur les inondations ou Global Flood Awareness Service (GloFAS)² et le système mondial d'information sur les incendies ou Global Wildfire Information System (GWIS)³.

Plus spécifiquement, dans les observatoires GDO et GloFAS, les travaux scientifiques portent sur la définition et l'évolution des sécheresses, des vagues de chaleurs ou des inondations. Un travail de recherche est aussi dédié au développement et à l'amélioration des alertes précoces de ces aléas. En outre, il s'agit de proposer des indices robustes pour les caractériser pour l'unité traitant de l'exposition.

2.1.1.4 STEWARD

Le projet de recherche Statistical Early Warning systems of weather-related Risks from probabilistic forecasts, over cities in West Africa (STEWARD) est axé sur la prévision et la gestion des risques liés à plusieurs aléas météorologiques dans les villes de Dakar et d'Abidjan. Financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), il a été lancé en 2020 avec une dotation de 470 000 euros. Face aux défis croissants posés par les changements climatiques et la croissance démographique rapide dans ces villes côtières d'Afrique de l'Ouest, il devient de plus en plus urgent de développer des stratégies efficaces pour faire face aux risques associés aux événements météorologiques violents. STEWARD met en œuvre des approches novatrices de prévision des risques en combinant des données satellites, des modèles météorologiques et hydrologiques, ainsi que des techniques de modélisation statistique. En utilisant ces outils, le programme vise à améliorer la capacité des autorités locales à anticiper et à répondre aux menaces potentielles telles que les inondations, les sécheresses, les vagues de chaleur et la dégradation de la qualité de l'air, tout en renforçant la résilience des communautés urbaines face à ces événements extrêmes. À Dakar et à Abidjan, la population est confrontée à des vulnérabilités élevées en raison de l'urbanisation rapide et de l'insuffisance des infrastructures organisée, STEWARD travaille en étroite collaboration avec les chercheurs locaux et les acteurs communautaires pour développer des outils de prévision de ces risques. Ces outils permettront aux décideurs de prendre des mesures préventives et de planifier efficacement les interventions d'urgence pour protéger les populations vulnérables et réduire les pertes économiques causées par ces événements. En outre, le programme STEWARD s'engage à renforcer les capacités des institutions locales et des parties prenantes à Dakar et à Abidjan dans

1. <https://drought.emergency.copernicus.eu/>

2. <https://global-flood.emergency.copernicus.eu/>

3. <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/>

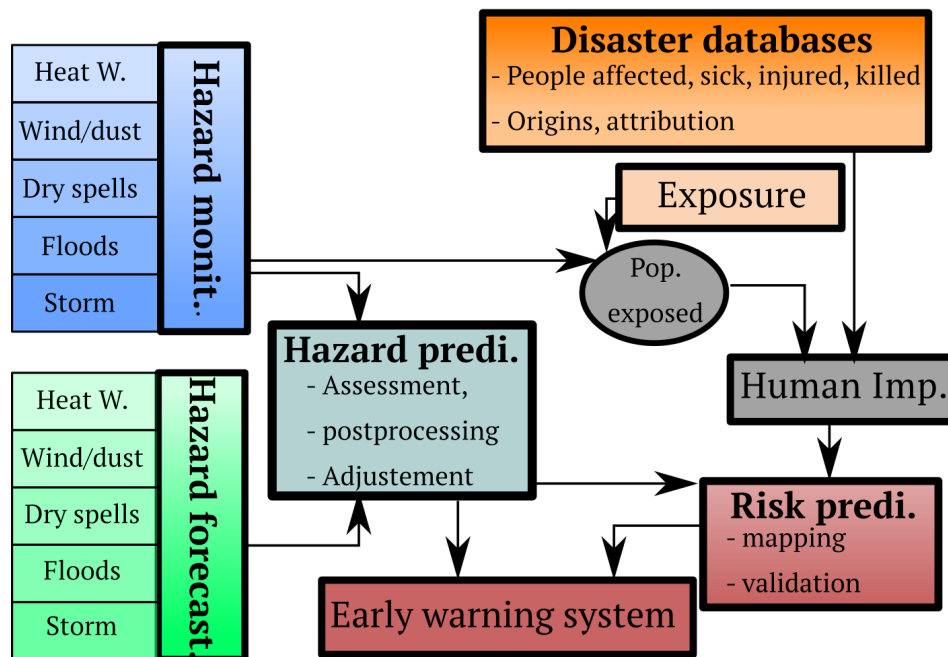


FIGURE 2.1 – Schéma du projet ANR STEWARD (2020-2025) comportant trois volets, WP1 aspects impacts (en orange), WP2 aléas (bleu et vert) et WP3 les risques (rouge)

le domaine de la prévision des risques en fournissant une formation spécialisée, en facilitant les échanges de connaissances et en soutenant le développement de partenariats durables. Pour ce faire et comme présenté sur la Figure 2.1, le programme est composé de 3 parties. La première consiste à faire une étude épidémiologique et une étude sociétale sur la vulnérabilité et les impacts des habitants des villes suivant les aléas. Il s'agit, en collaboration avec des instituts locaux, de collecter des données sur la mortalité et morbidité, les entrées dans les dispensaires ou hôpitaux. Il s'agit aussi de comprendre la variabilité sociétale de la vulnérabilité des populations et d'étudier les potentielles sources d'augmentation de cette vulnérabilité suivant les conditions environnantes et les aléas. Le deuxième volet étudie les aléas, leurs définitions, caractérisations et prévisions. Enfin la dernière partie croise les informations issues des deux premières parties et estime le risque associé à ces épisodes, pour proposer des seuils et des méthodes transférables aux services opérationnels. Actuellement, les deux premières parties sont bientôt finies, le dernier volet débute en mai 2024.

2.1.2 Animation dans les programmes de recherches

Au cours des dernières années, j'ai eu l'opportunité de m'impliquer activement dans l'animation de la recherche, en particulier à travers mes responsabilités dans des grands programmes européens et français dont les principaux ont été présentés précédemment.

Dans le cadre du programme ClimSA, j'ai assumé le rôle de responsable de la coordination scientifique, de conseil et d'évaluation des projets dans les RCCs pour DG INTPA. En outre, j'ai été chargé de coordonner les activités entre le DG JRC et les RCCs, ainsi que de superviser le développement d'outils d'aide à la décision. En charge de la coordination avec les RCCs, j'ai travaillé en étroite collaboration avec chacun d'entre eux sur l'identification des besoins et les défis pour proposer des solutions. Responsable de la validation des nouveaux produits, je me suis assuré de la disponibilité et de la conformité des produits et du transfert vers les partenaires, en supervisant une petite équipe composée d'ingénieurs développement, et en coordonnant les travaux de chercheurs du DG JRC pour ce programme (environ 15 chercheurs et agents). J'ai pris part aux Forums annuels ClimSA, aussi bien en présentiel qu'en visioconférence, depuis l'édition de 2020 jusqu'à celle de 2023. Au cours de ces événements, j'ai eu le rôle de co-organisateur et de responsable de sessions, notamment lors des éditions de 2022 à Samoa et de 2023 aux Seychelles. Mes responsabilités comprenaient la préparation des journées, la proposition de tables rondes et de discussions parallèles, ainsi que la présentation des principaux résultats et des points bloquants. En outre, j'ai été impliqué dans plus de 16 comités de pilotage des programmes ClimSA régionaux, principalement pour l'Afrique, où j'ai identifié les besoins et lacunes actuels et apporté des conseils sur des produits et des avancées en matière de télédétection et de prévisions climatiques. J'ai également collaboré à la régionalisation des produits et à l'amélioration de leur pertinence et de leur robustesse.

Dans le cadre de GMES & Africa, j'ai joué un rôle similaire sur la coordination scientifique des chercheurs du DG JRC impliqués dans le programme, ainsi qu'en participant au Forum annuel 2022 à Dakar. J'ai contribué aux discussions sur les avancées des consortiums concernant les aspects continentaux et océaniques, telles que les ressources en eau, l'agriculture, l'érosion côtière, la pêche, et la préservation des mangroves. J'ai par ailleurs organisé des formations notamment sur les produits de pêche et indices climatiques en Afrique de l'Ouest au Cap avec le Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) en décembre 2019.

Enfin, j'ai participé à quatre comités de pilotage globaux, deux pour ClimSA et deux pour GMES, où j'ai contribué à l'organisation du programme, à la validation des besoins budgétaires et à l'évaluation des avancées par rapport aux objectifs de recherche et opérationnels. De plus, j'ai assisté à plusieurs Climate Outlook Forum (COF) où j'ai pu identifier les besoins sectoriels, les erreurs et les problèmes antérieurs pour améliorer les prévisions, les décisions et la communication. Ces forums étaient aussi l'occasion de présenter des avancées scientifiques, techniques et technologiques (CSIS) et donc de transférer les nouvelles connaissances dans le do-

maine.

Au fil du temps, j'ai vu ma prise de responsabilité croître en termes de suivi et de gestion de projets. Cela s'est reflété dans l'obtention de financements et dans le pilotage de projets de plus en plus importants. En 2017, j'ai obtenu un financement S. De Champlain, un projet franco-qubécois d'une valeur de 12 000 euros. Cette première expérience m'a permis de développer mes compétences en gestion de projet et de prendre conscience des défis liés à la coordination et au suivi financier. En 2018, j'ai été lauréat d'un projet Initiatives d'Excellence (IDEX), d'une valeur similaire de 12 000 euros. Cette opportunité m'a offert la possibilité de consolider mes acquis en matière de gestion de projet et de renforcer mes capacités à mener à bien des initiatives de recherche. Au cours de mon expérience au JRC, bien que je n'étais pas responsable principal du projet, j'étais en charge de plusieurs responsabilités (coordination scientifique avec les collègues du DG JRC et avec les consortium ou les RCCs des pays partenaires, responsable de la partie développement des outils d'aide à la décision des prévisions et détections des aléas climatiques. D'autre part, j'étais évaluateur et représentant du DG JRC dans les comités de pilotage.

Actuellement, je suis impliqué dans le pilotage du projet ANR STEWARD. Ce projet représente un défi majeur en termes de coordination, de gestion des ressources et de suivi des activités, mais aussi une occasion unique de contribuer à des avancées significatives dans mon domaine de recherche. Parallèlement à ces engagements, j'assume également la co-responsabilité de l'animation de la partie Afrique de l'équipe HydroMétéorologie, Climat et Interactions avec les Sociétés (HMCIS) à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE). Cette fonction implique la coordination des activités de recherche entre nous et avec les autres équipes du laboratoire.

L'ensemble de ces expériences m'a permis d'acquérir une expertise solide en matière de pilotage de projets, ainsi que les compétences nécessaires pour gérer avec succès des initiatives complexes et ambitieuses. Je reste déterminé à poursuivre cette voie et à contribuer activement au développement de la recherche dans mon domaine d'expertise.

Au cours de ma carrière, j'ai été activement impliqué dans l'organisation de séminaires, colloques et workshops, contribuant ainsi à la diffusion des connaissances et au développement des collaborations scientifiques. J'ai créé et organisé des cycles de formation et des workshops sur les produits et l'usage de la ClimSA Station (UaF), visant à partager les connaissances sur les produits et la technologie du CSIS. Ces réunions mensuelles ont rassemblé entre 50 et 100 participants des différents centres régionaux climatiques africains et des Caraïbes, offrant une plateforme pour des présentations scientifiques ainsi que des discussions ouvertes et des échanges sur les besoins des partenaires. En plus de ces cycles de formation, j'ai également participé à l'organisation de plusieurs colloques et workshops. J'ai contribué au programme GMES sur le volet océanique, en développant des produits de caractérisation physique de l'océan, des ressources halieutiques et de l'érosion côtière en Afrique, lors d'un événement organisé par le CSIR à Cape Town en décembre 2019. En juin 2023, j'ai organisé un colloque sur l'information climatique régionale pour la Southern African Development Community (SADC) à Johannesburg, en Afrique du Sud, et

en décembre 2023, j'ai été l'organisateur d'un colloque sur les produits d'observations de la Terre pour soutenir l'agriculture, la biodiversité et la pêche au Centre de Suivi Ecologique (CSE) à Dakar.

Parallèlement à ces événements, j'ai également animé des formations, notamment sur les inondations en Afrique de l'Ouest (en collaboration avec le Nigeria) et sur l'utilisation de la ClimSA Station et le développement d'indices climatiques pour les régions de l'ACP lors d'un training à Ispra. J'ai également dispensé des formations en Afrique du Sud sur la régionalisation du climat et des aléas, ainsi que sur l'utilisation des outils d'observation de la Terre pour des applications agricoles et la préservation des aires protégées et de la biodiversité au Sénégal.

Enfin, j'ai eu l'opportunité de présenter mes recherches lors de séminaires scientifiques, notamment à European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) et au Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), ainsi que lors de conférences internationales telles que l'AGU, l'EGU et l'IUGG. Ces occasions m'ont permis de partager mes résultats de recherche et d'échanger avec d'autres experts du domaine.

D'autre part, j'ai acquis une solide expérience en tant que relecteur pour des journaux scientifiques et des évaluations de bourses et de projets. Dans le cadre du programme ClimSA, j'ai eu l'opportunité d'évaluer les financements des RCCs en proposant des recommandations pour soutenir les propositions. J'ai également dispensé des conseils et participé à des entretiens avec l'INTPA et certains RCCs, contribuant ainsi à l'amélioration continue du programme. Par ailleurs, j'ai eu l'honneur de servir en tant que reviewer pour des projets du Natural Environmental Research Council (NERC) pour le domaine Sciences for Humanitarian Emergencies and Resilience.

En tant que relecteur pour des revues de renom, j'accepte de relire entre 3 et cinq articles par an pour des revues de rang A telles que Nature, Nature Climate Change, Nature Communication, Climate Dynamics, Ocean and Atmosphere, NHESS, HESSD, ACP, Int. Journal of Climatology, Geophysical Research Letter, Journal of Atmospheric Sciences et Journal of Geophysic Research.

Enfin, j'ai également participé en tant qu'invité au jury de thèse de Ridha Gebsy, à l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) dont le sujet était Impact de la vapeur d'eau et des aérosols désertiques sur le bilan radiatif et leurs contributions à l'intensification de la dépression thermique en Afrique de l'Ouest. J'ai d'autre part été dans le comité de pré-admission en thèse de Yves Ngueto, à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), dont le sujet était Énergétique des systèmes météorologiques de l'Afrique de l'ouest.

J'ai eu l'opportunité d'encadrer et de former plusieurs étudiants à différents niveaux académiques, contribuant ainsi à leur développement académique et professionnel. J'ai supervisé la thèse de Noreyni Fall, dont la soutenance a eu lieu en novembre 2020, en assurant un encadrement à hauteur de 75%. De même, j'ai été impliqué dans l'encadrement de la thèse de Cedric Gacial, soutenue en octobre 2023, en assumant un rôle de co-encadreur à hauteur de 60%. Actuellement, je co-encadre Leo Clauzel, avec un financement du ministère de la recherche, et Tanguy Jonville,

thèse de l'Ingénieur des Ponts, Eaux et Forêts (IPEF), à hauteur de 50% chacun. En outre, j'ai eu l'occasion de superviser huit mémoires de master au cours de mes différentes missions de recherche. Enfin, je débute une collaboration avec Ivana Cvijanovic, post-doctorante, qui travaillera sur le volet 3 du projet STEWARD.

2.2 Collaborations, reconnaissances nationales et internationales

Mes collaborations et ma reconnaissance nationale et internationale, m'ont amené à contribuer à l'écriture de chapitre d'ouvrage. Le premier sur les prévisions S2S. Le chapitre traite de la prédiction S2S de deux catégories d'événements extrêmes : les événements météorologiques extrêmes à grande échelle, individuels et de longue durée, dont le début, l'évolution et le déclin pourraient être prévus quelques semaines à l'avance ; et les événements à petite échelle à fort impact qui ne peuvent pas être prédits individuellement des semaines à l'avance, mais dont les statistiques pourraient être prévisibles à l'échelle de temps S2S en raison de leur interaction avec la circulation à grande échelle.

D'autre part, dans le cadre d'un livre collaboratif proposé par le collectif Santé Environnement dans les Villes Africaines et Malgache (SEVAM), je suis co-auteur d'un chapitre qui analyse les îlots de chaleur urbain comme un facteur de vulnérabilité croissante pour les habitants des villes africaines, mettant en lumière les défis liés à la transition climatique et aux transitions socio-environnementales et sanitaires. À travers des études de cas urbaines, il présente des outils d'information environnementale et d'analyse sociétale et de santé, offrant ainsi des perspectives pour le développement de services climatiques urbains interdisciplinaires visant à mieux comprendre et à répondre à ces défis.

Dans mes expériences actuelles et à venir, la collaboration occupe une place prépondérante. Au fil des années, j'ai eu l'occasion de travailler avec un éventail diversifié de partenaires, tant au niveau local qu'international, couvrant une variété de thématiques et d'échelles d'étude. Mes collaborations ont été particulièrement riches et fructueuses dans les domaines de la physique et chimie atmosphérique, de la statistique, de l'étude des aérosols et du climat. Ces collaborations ont été essentielles pour mener à bien mes travaux de prévision et de modélisation, ainsi que pour évaluer les impacts des phénomènes étudiés.

Au niveau national, j'ai eu le privilège de collaborer avec des institutions renommées telles que Météo France, le LATMOS, l'UMI Resilience et Espace Dev. À l'échelle européenne, mes partenaires incluent particulièrement le KIT (Allemagne), Centro Internazionale in Monitoraggio Ambientale (CIMA) (Italie), l'Université de Bologne, l'Université de Cologne, le Barcelona Super Computer et l'Université di Padova. Mais dix années à la Commission Européenne m'ont permis de me familiariser et de nouer des contacts avec plusieurs agences et Directoires comme DG JRC, Research Executive Agency of the European Commission (REA), DG INTPA, European Environment Agency (EEA), et European External Action

Service of the European Commission (EEAS). Ces collaborations européennes ont été essentielles pour approfondir mes recherches et élargir mes perspectives.

En outre, mes liens avec les partenaires africains ont joué un rôle crucial dans mes travaux. J'ai eu le privilège de collaborer avec les centres régionaux climatiques de WMO (African Centre of Meteorological Application for Development (ACMAD), Agronomie et Hydrologie pour le développement des Systèmes de Cultures de l'Afrique de l'Ouest (AGRHYMET), Centre d'Analyse et de Prévision des Crues - Afrique Centrale (CAPC-AC), IGAD region Climate Prediction and Applications Centre (ICPAC), SADC, Secretariat of the Pacific Regional Environment Program (SPREP) et Caribbean Institute for Meteorology and Hydrology (CIMH)), ainsi qu'avec des centres de recherche de premier plan comme le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) à Abidjan et le CSE à Dakar. Les universités africaines telles que l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) et le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAOSF) à Dakar, ainsi que le Société D'Exploitation de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF) à Abidjan, ont également été des partenaires clés dans mes recherches. Au sein des programmes européens, j'ai eu l'opportunité de rencontrer et de travailler avec un grand nombre d'autres instituts et de services opérationnels dans les régions Afrique - Caraïbes - Pacifique, renforçant ainsi les liens entre les différentes communautés scientifiques et usagers finaux. Je tiens à souligner que ces partenariats ne se limitent pas seulement à des collaborations académiques, mais qu'ils ont également permis des échanges enrichissants sur les plans humain et culturel. Ces collaborations multiples et diversifiées ont été un moteur essentiel de mes travaux de recherche, me permettant d'aborder les défis scientifiques complexes liés à l'atmosphère et au climat dans une perspective globale et multidisciplinaire.

2.3 Valorisation des travaux de recherche

Au cours de mes recherches, j'ai élaboré plusieurs indicateurs météorologiques et climatiques afin de répondre à des questions scientifiques. Ces travaux ont été soumis à des vérifications rigoureuses et ont été publiés dans des revues scientifiques. Répondant à des enjeux sociétaux, plusieurs de ces indicateurs ont ensuite été transférés dans des contextes opérationnels, nécessitant des efforts spécifiques de développement, tels que l'accès aux données en temps réel, la garantie de la qualité de l'information pour les services d'alerte, et la formation à l'utilisation de ces nouveaux indicateurs. Ces efforts ont contribué à soutenir des recherches en Afrique, notamment dans le cas de la base de données sur la détection des ondes d'Est Africaines et de la caractérisation climatologique de la dépression thermique Saharienne. Ces indices ont apporté un soutien aux décideurs en matière de systèmes d'alerte précoce et d'informations sur les services climatiques, comme dans le cas de la détection et de la prévision des vagues de chaleur et des fortes anomalies de précipitations.

Les résultats de ces recherches sont reflétés dans des thèses et des publications, ainsi que dans des plateformes opérationnelles telles que la ClimSA Station, la [GMES eStation](#) et [Copernicus EMS](#). Par ailleurs, dans le cadre du projet [ANR](#) que je pilote, les produits d'alerte précoce concernant les risques liés aux événements extrêmes, ainsi que les recommandations telles que les seuils des aléas et les techniques de prévision, seront transférés aux Services météorologiques nationaux et aux services de protection civile des pays concernés dans le dernier volet du projet, prévu pour 2024-2025. La réussite de ces travaux repose sur l'établissement d'un solide réseau de partenaires, comprenant des universités, des instituts nationaux et des centres régionaux climatiques. Le transfert d'outils et de connaissances s'appuie également sur les structures des Laboratoire Mixte International ([LMI](#)), favorisant ainsi les discussions et la co-construction de projets futurs. La confiance et la solidité de ce réseau sont le fruit de près de deux décennies de collaboration, notamment avec des chercheurs du [LPAOSF](#), de [AGRHYMET](#) et de [ACMAD](#).

2.4 Implications institutionnelles

Conscient des possibles collaborations et de la complémentarité des instituts, j'ai activement contribué à renforcer les liens et à promouvoir la reconnaissance mutuelle entre l'IRD et le JRC. Mon implication institutionnelle s'est manifestée à plusieurs niveaux. Tout d'abord, j'ai facilité le rapprochement entre les deux institutions en organisant une rencontre stratégique entre Mme Verdier, Présidente Directrice générale de l'IRD et Mme Salla Saastamoinen, Directrice Générale Adjointe du JRC, en mai 2023. Cette rencontre, préparée en collaboration avec Stéphanie JUBAN, Chargée de mission affaires européennes à l'IRD, a permis d'explorer des opportunités de collaboration, et des actions ciblées avec les partenaires. J'ai également organisé des rencontres scientifiques entre les départements scientifiques de l'IRD et les unités de recherche du JRC. En travaillant étroitement avec Andy Ramorasata, responsable des affaires européennes à l'IRD, et les directeurs des différents départements, j'ai facilité les échanges scientifiques. Des pistes ont été définies, notamment en terme de formation et de partage d'expériences. Par ailleurs, j'ai participé à la préparation et à la représentation de l'IRD lors de réunions à Bruxelles sur des forums portant sur la biodiversité et la science de la durabilité, en collaboration avec Vincent Fautrel, représentant de l'IRD à la Commission Européenne. J'ai contribué à mettre en avant les initiatives de recherche de l'IRD et à promouvoir la coopération avec les partenaires européens. Enfin, j'ai facilité la mise en contact entre les porteurs de projets Horizon Europe pour l'IRD et les chercheurs du JRC, afin de mieux estimer les activités du JRC et de mieux intégrer le JRC dans les calls où le JRC est identifié comme partenaire. Dans l'ensemble, mes actions institutionnelles ont contribué à renforcer la collaboration et le partenariat entre l'IRD et le JRC, ouvrant la voie à de nouvelles opportunités de recherche et de coopération internationale.

Je suis membre d'un consortium EuropaAID, dont l'IRD est porteur intitulé 'EU Global Support Facility for Nationally Determined Contributions'. L'objectif global

est d'encourager les pays partenaires à effectuer une transition vers des économies à faible émission de carbone, plus efficaces en matière de ressources et résilientes, en accord avec le Pacte vert pour l'Europe, l'Accord de Paris, le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe et les Objectifs de développement durable. Ce contrat vise spécifiquement à fournir une assistance technique ad-hoc de haut niveau et des conseils politiques sur mesure aux niveaux national, régional et mondial. Son objectif principal est de soutenir la conception, la mise à jour et la mise en œuvre des Contributions Déterminées au niveau National, des stratégies à long terme et des plans nationaux d'adaptation des pays partenaires.

Ma contribution aux LMI Eclairs et NEXUS s'articule autour de la présentation des outils et des produits disponibles pour répondre à différents besoins. J'ai organisé des séminaires ou fait des réunions pour informer sur les actions en cours et faciliter la compréhension des outils disponibles. En outre, je participe à l'évaluation et à l'arbitrage des demandes budgétaires.

Données et outils

Contents

3.1 Observations	27
3.2 Modèles	28
3.3 Méthodes développées	29
3.4 Diversité des échelles temporelles et spatiales	31

3.1 Observations

Au cours de mes travaux antérieurs, j’ai eu recours à une grande quantité de données modèles (grandes échelles) aux stations (locales). J’ai utilisé plusieurs jeux de ré-analyses comme les données du centre Européen (ERA40, ERAI, ERA5), ou les réanalyses américaines NCEP et MERRA. Plus de 6 réseaux différents d’observations de surface et atmosphériques ont été mis à profit comme les données pluviométriques des Directions Météorologiques Nationales Africaines et de l’observatoire Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA)-CATCH en Afrique de l’Ouest, la base de données SAFRAN, E-Obs et ECAD pour les températures, le vent et les précipitations en Europe ainsi que les données issues des radiosondages et des dropsondes. Les stations METAR, SYNOP et SHEFF ont été utilisées au Canada et aux USA. L’incertitude des différents produits de données de pluie a été menée, permettant d’identifier, au Sénégal leurs forces et faiblesses et leurs impacts sur les rendements agricoles ont été estimés [Fall et al., 2021, 2022].

J’ai participé à la validation de ballons dérivants (driftsondes), lancés en Afrique de l’Ouest et qui, dérivant vers l’Ouest dans la haute troposphère, largue des dropsondes (Drobinski et al. 2010, 2012). En participant aux campagnes FENNEC et HYMEX, j’ai travaillé sur les données lidars au sol ou embarquées (Cuesta et al. 2009, Flamant et al. 2009a,b) permettant de déterminer les charges et la distribution verticale en aérosols des masses d’air. Pour déterminer l’activité convective en Afrique de l’Ouest, différents produits satellites ont été utilisés tels que MSG (Meteosat Second Generation, Lavaysse et al. 2010a), CLAUS (Lavaysse et al. 2011, 2010b) et les produits OLR (Outgoing Longwave Radiation, Lavaysse 2006, Lavaysse et al. 2006b) de la NOAA. A plus fine échelle, j’ai utilisé les produits de précipitations issus de TRMM. Pour valider les réanalyses en Afrique de l’Ouest (région où l’assimilation des données reste faible), le sondeur AMSU a été mis à profit [Lavaysse et al., 2013b] en collaboration avec Laurence Eymard (LOCEAN). Enfin les

produits satellites ont aussi été utilisés pour détecter et caractériser les panaches d'aérosols désertiques (composition colorée de MSG, produit d'épaisseur optique de SEVIRI et MODIS, [Lavaysse et al. 2011](#)).

Pour la caractérisation des rendements agricoles [[Fall et al., 2022](#)] et pour proposer des outils d'aide à la décision dans le contexte de sécurité alimentaire du programme GMES & Africa, les produits d'indice de végétation par différence normalisée NDVI et de fraction de rayonnement absorbée par les plantes FAPAR de différentes plate-forme ont été confrontés. Des études ont aussi été menées pour l'intégration des nouveaux jeux de données issus de Sentinel 1 et 2 pour la caractérisation des zones inondées et pour la caractérisation des états de surface.

3.2 Modèles

La modélisation numérique a été mis à profit dans le but de mener à bien des études de sensibilité ou des études de processus. Il s'agissait, dans le cadre de différents projets, d'utiliser cet outil afin de valider des hypothèses mis en évidence par des analyses statistiques. Ces dernières utilisent soient des observations ou des réanalyses qui n'ont pas à disposition des variables spécifiques ou la spatialisation ou l'homogénéisation qu'offre l'outil numérique. Ainsi, j'ai contribué à des travaux sur un modèle simplifié représentant la circulation 2D et ainsi mieux comprendre la contribution des différents forçages qui s'exercent sur le système de mousson et de mieux comprendre les interactions entre la dépression thermique ouest africaine et celle située dans la péninsule arabique [[Dalu et al., 2018](#)]. J'ai utilisé le modèle régional WRF pour évaluer l'évolution climatique des extrêmes de températures, précipitations et vents sur le bassin Méditerranéen [[Lavaysse et al., 2012b](#), [Vrac et al., 2012](#)]. Cette étude s'est prolongé avec l'étude de l'impact radiatif des aérosols dans WRF-CHEM (visite scientifique au NCAR, Boulder, USA). Meso-NH a été utilisé pour étudier l'impact des aérosols sur la mousson africaine [[Lavaysse et al., 2011](#)].

Au cours des quatre campagnes aéroportées dont trois portants sur les précipitations et les aérosols désertiques du Sahara : HyMeX, FENNEC, DACCIWA [[Knippertz et al., 2017](#)], CADDIWA [[Flamant et al., 2021](#)], les sorties ARPEGE, ECMWF-ENS, AROME et Meso-NH m'ont servi pour la prévision des vols de l'ATR ou du Falcon de Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (SAFIRE).

A McGill et Environnement Canada, Je me suis initié à l'utilisation de la prévision probabiliste. avec le système de prévision d'ensemble pour analyser l'impact des incertitudes des conditions de surface sur les prédictions des événements violents de précipitations et de ressources en eau ([Lavaysse et al. 2012a](#)). Cette expérience s'est approfondie lors de mes travaux au JRC dans le contexte de COPERNICUS EMS où j'ai utilisé le système d'ensemble mensuel et saisonnier (ENS, S4 et SEAS5) pour la prévision des précipitations et des régimes de temps [[Lavaysse et al., 2015, 2016, 2019](#)]. Enfin, j'ai travaillé avec les données de prévisions probabilistes multimodèles

(9 modèles) étendues (30 à 45 jours) issues du projet S2S pour l'estimation de la prédictibilité des événements extrêmes et leurs incertitudes [Vitart et al., 2019].

Pour le projet ANR STEWARD et la bourse IDEX, les prévisions étendues et saisonnières de ECMWF, Météo France et UKMetOff sont utilisées afin de mieux prédire les événements à fort impact ainsi que d'identifier leurs prédicteurs. Ces mêmes produits sont mis à profit dans la thèse IPEF de T. Jonville.

J'utilise enfin les données issues de (opernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5)) pour suivre et prévoir les panaches d'aérosols et la qualité de l'air dans les villes africaines (projet ANR en cours), la prévision des ressources en énergie renouvelable, les impacts sur les retombées des aérosols sur les Alpes françaises [Baladima et al., 2022] et sur la prévision saisonnière des charges en aérosols au Sahel (étude de Josephine Schmutz).

3.3 Méthodes développées

J'ai développé et validé des outils novateurs afin de répondre à différentes questions scientifiques. L'analyse spectrale en ondelettes a permis de fournir un indice et les variabilités fréquentielles et temporelles des modes vibratoires des vents en moyenne troposphère permettant d'identifier les ondes africaines. Couplée à un filtrage spatio-temporel des vents, ces méthodes ont été utilisées pour caractériser l'activité des ondes au cours de la campagne AMMA (Lavaysse 2006, Lavaysse et al. 2006b, Janicot et al. 2008, Cuesta et al. 2009). Au cours de mon séjour postdoctoral au LATMOS, j'ai défini une méthode de détection de la dépression thermique Ouest Africaine à partir de l'épaisseur atmosphérique des basses couches (Lavaysse et al. 2009). À l'aide d'analyses spectrales exploitant ce nouveau produit, nous avons mis en évidence les principales périodes d'oscillations saisonnières et intra-saisonnières de cette composante pendant la période estivale.

Lors de mon séjour au LMD portant sur la prévision des événements extrêmes sur le bassin Méditerranéen dans un contexte de changement climatique (projet MEDUP), j'ai travaillé sur une méthode statistique de descente d'échelle. Celle-ci développée au LSCE pour les vitesses de vent (Michelangeli et al. 2009) a été adaptée à d'autres variables (température et précipitations, Lavaysse et al. 2012b, Vrac et al. 2012).

Au Canada, j'ai développé une méthode de perturbations stochastiques sur un jeu de paramètres de surface et de variables pronostiques dans le modèle de surface ISBA adapté au modèle atmosphérique Canadien. Celles-ci, générées par des chaînes de Markov, ont été implémentées dans le système d'ensemble régional pour estimer l'impact des conditions de surface sur les prévisions et pour améliorer le système [Lavaysse et al., 2012a].

Dans un second temps, j'ai utilisé le système d'analyse des précipitations Canadien forcé par le système d'ensemble régional pour fournir une analyse des précipitations et un indice de confiance associé basé sur la cohérence entre les membres [Lavaysse et al., 2013a]. Au JRC, j'ai estimé la prédictibilité des sécheresses (de 10

jours à 1 mois) et des vagues de chaleurs en Europe et en Afrique en développant et combinant différents types de produits issus de la prévision probabiliste. Ces travaux ont été menés en développant des indices basés sur l'historique climatique des régions. Pour les précipitations, il s'agissait d'utiliser les Standardized Precipitation Index (SPI) et pour les vagues de chaleurs un indice de distribution non paramétrique des températures minimums et maximums. L'objectif étant de proposer un système d'alerte précoce robuste pour les décideurs et utilisateurs locaux. Parallèlement j'ai travaillé sur l'utilisation des types de temps afin d'estimer l'intérêt des prévisions basées sur des prédicteurs atmosphériques [Lavaysse et al., 2016]. Pour ce faire une classification a été mise en place par des k-means imbriquée dans un algorithme génétique. A l'échelle globale, un travail a été mené pour optimiser les prévisions des vagues de sécheresse longues (de 1 à 3 mois) à partir des prévisions saisonnières SEAS5. Ce travail a permis de montrer la grande variabilité de cette prévisibilité et l'influence majeure des scores de prévision des modes de variabilité océaniques qui influencent ces déficits.

Dans le cadre du projet ANR STEWARD, une méthode de machine learning est en cours de développement pour optimiser les prévisions des aléas météorologiques. Il s'agit de cibler les variables synoptiques de moyennes et haute troposphère, généralement mieux prédites, pour les utiliser comme prédicteurs. Ce travail, en cours, quantifie la valeur ajoutée par rapport aux prévisions directes. Pour mieux comprendre les patterns météorologiques favorables aux soulèvements des aérosols, une étude en Self Organizing Mapping (SOM) a permis de montrer les principaux champs de géopotentiel et vent associés.

En matière de modélisation, au Canada, j'ai conçu, pour des études de sensibilité, une méthode de perturbations stochastiques appliquées à un ensemble de paramètres de surface et de variables dans le modèle de surface ISBA, adaptée au modèle atmosphérique canadien. Ces perturbations, générées par des chaînes de Markov, ont été intégrées dans le système d'ensemble régional pour évaluer l'impact des conditions de surface sur les prévisions et pour améliorer le système. Au JRC, j'ai élaboré des indices de surveillance des événements potentiellement à fort impact tels que les vagues de chaleur, les vagues de froid, les déficits et excès de précipitations, à partir des réanalyses et des observations. Ces indices ont également été appliqués aux produits de prévision des modèles hydrologiques probabilistes GloFAS et des modèles météorologiques ENS ECMWF dans le cadre de Copernicus EMS. Les prévisions ont été obtenues grâce à des méthodes de correction et d'optimisation des prévisions ensemblistes. Pour les précipitations, l'approche reposait sur l'utilisation des indices de prévisions extrêmes ou Extrem Forecast Index (EFI) des précipitations standardisées (SPI), tandis que pour les vagues de chaleur, un indice de distribution non paramétrique des températures minimales et maximales a été employé. Cette dernière a été utilisée et adaptée récemment pour d'autres indices recommandés dans le conseil sur le développement de systèmes d'alerte (Guidance on warning system development, WMO 2015). Enfin, j'ai intégré des caractérisations de types de temps pour évaluer l'intérêt des prévisions basées sur des prédicteurs atmosphériques. À cette fin, une classification a été mise en place à l'aide de k-moyens imbriqués dans

un algorithme génétique. En ce qui concerne les descentes d'échelle, afin d'établir des liens entre les données des modèles, les réanalyses ou les observations satellites et les observations locales, j'ai exploré les techniques et les incertitudes des méthodes statistiques de descente d'échelle adaptées et validées pour les températures et les précipitations. Des outils tels que le CDFt ont été régulièrement utilisés par la suite pour débiaiser les ensembles de données de prévisions, permettant ainsi de proposer des prévisions plus locales.

3.4 Diversité des échelles temporelles et spatiales

Les diverses expériences ont abordé une large gamme d'échelles, à la fois spatiales et temporelles. Sur le plan spatial, j'ai travaillé à plusieurs niveaux : à l'échelle globale, j'ai contribué à la fourniture de prévisions pour tous les continents dans le cadre du projet Copernicus, et j'ai également pris en compte les grands modes de variabilité des températures de surface des océans qui ont des répercussions globales. À l'échelle synoptique, mes recherches ont porté sur les différents types d'ondes qui affectent l'Afrique de l'Ouest dans le cadre du projet AMMA. C'était également l'échelle principale des indicateurs développés et partagés avec les RCCs dans le cadre du projet ClimSA. J'ai étudié à l'échelle régionale les principaux forçages atmosphériques lors de campagnes de mesures aéroportées, telles que Clouds-Atmospheric Dynamics-Dust Interactions in West Africa (CADDIWA), Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa (DACCIWA) et Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment (HYMEX), ainsi que les sensibilités aux aérosols et aux conditions de surface dans le cadre de projets FENNEC en Afrique et REPS au Canada. Il s'agissait également des principales échelles dans le cadre du projet GMES & Africa, où l'objectif était de proposer des indicateurs issus des observations ou des modèles pour des instituts nationaux ou régionaux. Enfin, j'ai abordé des problématiques à des échelles locales, que ce soit pour la représentation ou les impacts des villes dans le cadre du projet STEWARD, ou pour les problématiques de descentes d'échelle dans le projet CDFt.

En lien avec ces diverses échelles spatiales, la diversité des échelles temporelles est aussi large. Celle-ci découle d'abord de l'étroite relation entre les échelles spatiales et temporelles. De plus, les oscillations des variables hydro-météorologiques sont multiples. Il est important de les distinguer pour mieux les définir et les analyser. Il s'agit aussi de répondre à des besoins spécifiques des partenaires de différents secteurs qui sont sensibles à des modes spécifiques. Dans le cadre des prévisibilités, il a aussi été noté l'importance de mettre en place des 'seamless forecasts' (prévisions continues, c'est à dire qui couvrent tout le spectre des échéances de la prévision saisonnière aux prévisions immédiates), pour proposer des outils aux différents secteurs qui ont des besoins spécifiques en terme d'adaptabilité. Ainsi des travaux ont été menés :

- aux échelles événementielles (ce qui concerne les études de cas individuels de quelques jours, thèses de Léo Clauzel, et de Tanguy Jonville, ou dans le cas

- d'événements violents de poussières en Afrique [Cuesta et al., 2009], ou en Europe [Baladima et al., 2022]),
- aux périodes de quelques jours, dans le cas des travaux sur les déficits ou excès de pluie (thèse de Noreyni Fall), vagues de chaleur (thèse de Cedric Gacial, Lavaysse 2016b), des prévisions étendues S2S [Lavaysse, 2016a] ou des inondations fluviales [Alfieri et al., 2019],
 - aux périodes mensuelles, cas des SPI et des évolutions des sécheresses dans le cadre de Copernicus EMS [Lavaysse et al., 2016],
 - aux échelles climatiques, avec des travaux sur les études sur les tendances des vagues de chaleur, des extrêmes de pluie (thèse de Noreyni), des poussières (stage de Josephine Schmutz), de la dépression thermique [Lavaysse et al., 2013a] ou des problématiques de descentes d'échelles.

Deuxième partie

Résultats scientifiques

Synthèse des travaux de recherches

Mes recherches s'articulent autour des événements à fort impact, couvrant l'ensemble de la chaîne allant de la compréhension de leur formation et des mécanismes conduisant à leur impact (processus et forçages atmosphériques) au développement de produits adaptés à l'aide à la décision en étudiant leur représentation et leur prédictibilité dans les modèles de recherche et opérationnels. L'objectif ultime de cette démarche est de contribuer aux efforts visant une meilleure anticipation et atténuation des impacts des événements dans des régions vulnérables, en proposant des prévisions basées sur les impacts des aléas météorologiques, répondant aux besoins spécifiques des régions étudiées. Mes premiers travaux se sont concentrés sur l'identification et la caractérisation des forçages modulant les systèmes convectifs et les précipitations en Afrique de l'Ouest (thèse au LTHE et postdoc LATMOS 2003-2008), abordant la variabilité des composantes synoptiques aux échelles intra-saisonnières, saisonnières et climatiques. À des échelles locales, j'ai exploré l'impact des conditions de surface sur les prévisions et les analyses des précipitations (McGill, Env. Canada 2009-2012). J'ai également étudié l'impact radiatif des aérosols désertiques sur le système de mousson et la variabilité des précipitations grâce à des modèles régionaux (Boulder, 2012-2013). Un volet de mes recherches actuelles porte sur la prise en compte des aérosols dans la cyclogénèse (2022-2025). Mes travaux portent également sur la prévisibilité des événements extrêmes et leurs incertitudes, utilisant des prévisions d'ensembles au sein d'Environnement Canada et du programme Copernicus EMS (JRC, 2013-2017). J'ai obtenu un financement de l>IDEX (PrediSAHLIM, 2018-2021) sur la prévision de l'intensité de la dépression thermique en été, ainsi qu'un financement (ClimAO - S. de Champlain, 2020-2022) pour les prévisions saisonnières de charge en aérosol, en collaboration avec l'UQAM. J'ai également abordé les incertitudes associées aux méthodes de descente d'échelle pour les impacts locaux issus de ces données issues des modèles globaux. Mes importantes responsabilités scientifiques et administratives dans des programmes européens ClimSA et, plus limitées, pour GMES&Africa au JRC (2019-2024) ont renforcé ma capacité à dialoguer avec des partenaires et chercheurs internationaux et plus particulièrement en Afrique. Cette expérience a également contribué à la conception et à la mise en œuvre du projet ANR (STEWARd, 2020-2025) visant à étudier les risques multi-aléas sur les populations dans deux villes africaines (Dakar et Abidjan). Ces études ont été réalisées en étroite collaboration avec des spécialistes internationaux,

particulièrement Européens et Africains, dans différentes disciplines et m'ont permis d'acquérir une expertise solide dans les domaines que j'ai abordés. Au cours de ces expériences, j'ai aussi eu l'occasion d'enseigner pour des licences, et j'ai encadré plus de 8 masters, deux ingénieurs et j'ai été (et suis) le codirecteur de trois thèses (Noreyni Fall 75% soutenu en 2021, Cedric Gacial 60%, soutenu en 2023, Leo Clauzel, 50% en cours, Tanguy Jonville, 50% en cours). Ce 1er mai 2024, je débute le coencadrement de Ivana Cvijanovic, postdoctorante, sur le volet impact du programme STEWARD.

Dans cette partie sont présentés les principaux résultats de mes travaux. Ceux-ci s'articulent autour de trois étapes qui mènent de la compréhension physique de l'origine des événements extrêmes aux outils d'aide à la décision intégrant leurs impacts, en passant par leurs représentations dans les modèles de recherche et de prévisions opérationnels.

Compréhension des phénomènes météorologiques

Contents

5.1 Modes de variabilité et aléas naturels	37
5.1.1 Détection suivi et tendance des aléas	37
5.1.2 Système de grande échelle, mousson	45
5.2 Forçages synoptiques et locaux des évènements	46
5.2.1 Ondes d'Est Africaines	46
5.2.2 Dépression Thermique Ouest Africaine	47
5.2.3 Aérosols désertiques	50

La première étape de mes travaux correspond à une meilleure connaissance des phénomènes à potentiel fort impact et des principaux modes de variabilités des précipitations, en étudiant leur formation, leurs caractéristiques et les forçages associés.

5.1 Modes de variabilité et aléas naturels

5.1.1 Détection suivi et tendance des aléas

Des indicateurs novateurs ont été développés pour plusieurs aléas. Cela implique d'abord la mise en place d'une définition robuste généralement basée sur des études précédentes (comme [McGregor et al. 2015](#) pour les vagues de chaleurs) mais qu'il est généralement nécessaire d'adapter aux contraintes locales surtout Ouest Africaines (en terme de données disponibles et de spécificité climatique locale). Basée sur cette définition, il est alors possible de localiser et estimer l'intensité de chacun des aléas. Afin d'améliorer la pertinence et l'utilité de ces indicateurs, il a été à chaque fois nécessaire de mener à bien d'importants tests en jouant sur différents jeux de données disponibles, des définitions de détection et des intensités de seuil. Étant donné les exigences différentes, selon les secteurs et les applications, cette diversité d'indicateurs permet d'évaluer la sensibilité de ces choix, de quantifier les incertitudes et de sélectionner les produits les plus adaptés.

La faisabilité de détecter les vagues de chaleur et de froid en utilisant une méthode basée sur la persistance du dépassement des quantiles des températures minimales et maximales quotidiennes au niveau des points de grille a été proposée dans [Lavaysse et al. \[2018a\]](#). Dans une première étape, trois méthodes de détection et

de quantification des intensités des vagues de chaleur et de froid ont été évaluées (Figure 5.1). L'utilisation de T_{min} , T_{max} et des deux valeurs simultanément a été examinée.

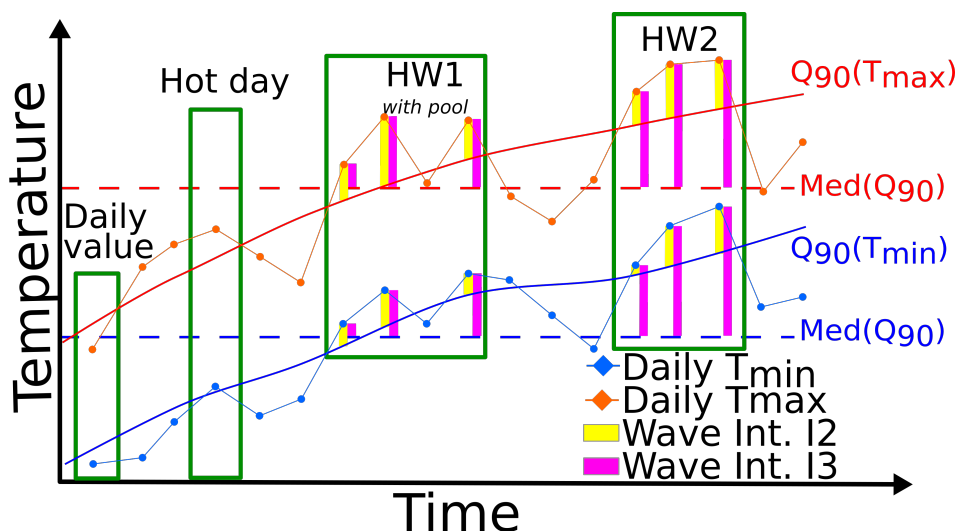


FIGURE 5.1 – Définition d'une vague de chaleur avec deux propositions de caractérisation de son intensité, HWI2 pour l'agriculture et HWI3 pour les risques pour les populations. Issues de Lavaysse et al. 2018

Pour rendre l'analyse plus robuste, trois ensembles de données ont été comparés, deux dérivés de données de station (LisFlood et eOBS) et un de données de réanalyse (ERA1). Les deux ensembles de données d'observation ont montré seulement de légères différences dans les occurrences et les intensités des vagues de chaleur et de froid (Figure 5.2).

Cela est probablement dû à un bon accord dans la représentation à la fois de T_{min} et T_{max} . En utilisant ERA1, certaines différences sont apparues, principalement en raison de la résolution plus grossière de la grille d'origine et de l'utilisation de seulement quatre valeurs par jour pour définir T_{min} et T_{max} . Dans ce cas, la persistance et la corrélation spatiale ont augmenté, générant moins de distinction spatiale et des vagues plus intenses par rapport aux deux autres ensembles de données. Cependant, les principaux résultats sont globalement cohérents pour les trois ensembles de données et montrent un risque plus élevé de vagues de chaleur et de froid dans la partie continentale de l'Europe.

Par la suite [Ngoungue Langue et al. \[2022\]](#) a adapté la précédente étude à la région Ouest Africaine, en prenant en compte, dans l'analyse de sensibilité, l'humidité et avec des spécificités saisonnières différentes. L'évolution de l'occurrence et des caractéristiques des différentes vagues de chaleur ont montré une grande variabilité spatiale et temporelle au cours des saisons (Figure 5.3). Des sous-régions (Continental, Atlantique et Golf de Guinée) ont pu être isolées avec des caractéristiques similaires. Une autre importante différence a été notée entre ERA5 et MERRA.

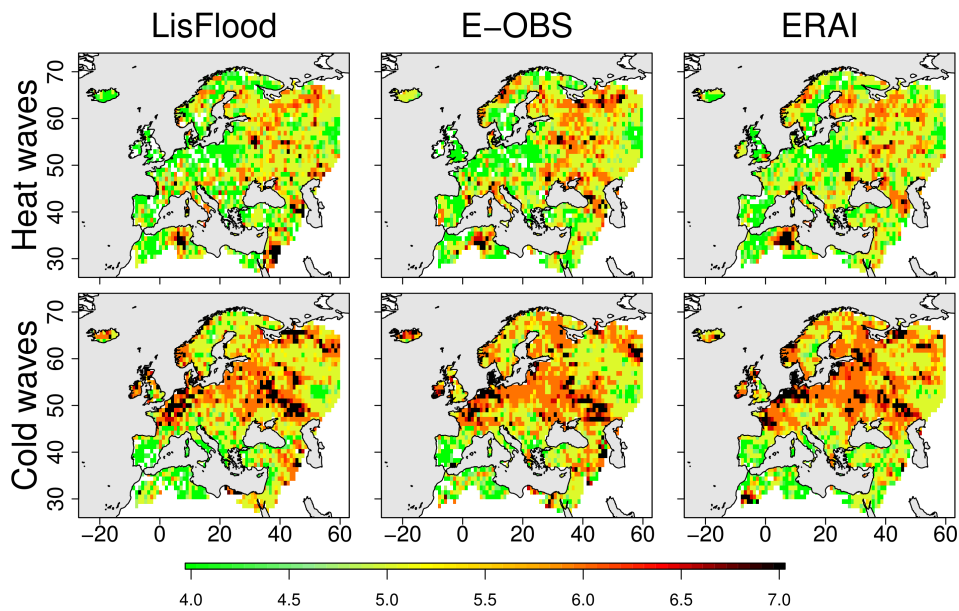


FIGURE 5.2 – Incertitude de la climatologie de la fréquence des vagues de chaleurs et de froids en Europe suivant les bases de données utilisées. Issues de Lavaysse et al. 2018

Celle ci réside sans doute dans la résolution verticale des profils des variables atmosphériques sous 2 km d'altitude. ERA5, avec plus de niveaux, a une représentation plus précise des processus dans la couche limite (confirmant les travaux de [Taszarek et al., 2021]). D'autre part, une évaluation des origines des vagues de chaleur est discutée. Un des facteurs déterminants des vagues de chaleur à l'échelle mondiale est le blocage anticyclonique, lorsqu'un système de haute pression persiste. Cependant, dans les régions côtières Ouest Africaines, nous avons montré que la variabilité de la température de surface de la mer était très liée aux années avec un net renforcement des vagues de chaleur (et de leur intensité). Un réchauffement est observé surtout sur le nord-est de l'océan Atlantique tropical et affecte toute la région côtière de l'Afrique de l'Ouest. Certaines années correspondent également à la survenue d'événements El Niño. Nous pouvons suggérer de ce résultat qu'il y a une contribution des forçages océaniques dans le renforcement des vagues de chaleur dans la région côtière.

En ce qui concerne la détection des anomalies de précipitation, j'ai, dans la plupart des études sur les modes de variabilités, mis en place une méthodologie assez simple de détection de ces épisodes. J'ai d'abord travaillé sur des événements violents soudain. Ainsi, l'influence de la mousson ouest-africaine sur les précipitations au Hoggar (sud de l'Algérie) pendant l'été 2006 a été examinée lors de deux épisodes de pluie survenus du 23 au 27 juillet 2006 (pendant la campagne AMMA), représentant près de la moitié des précipitations de cette année dans cette région. Ces événements se sont produits accompagnés de deux renforcements consécutifs de

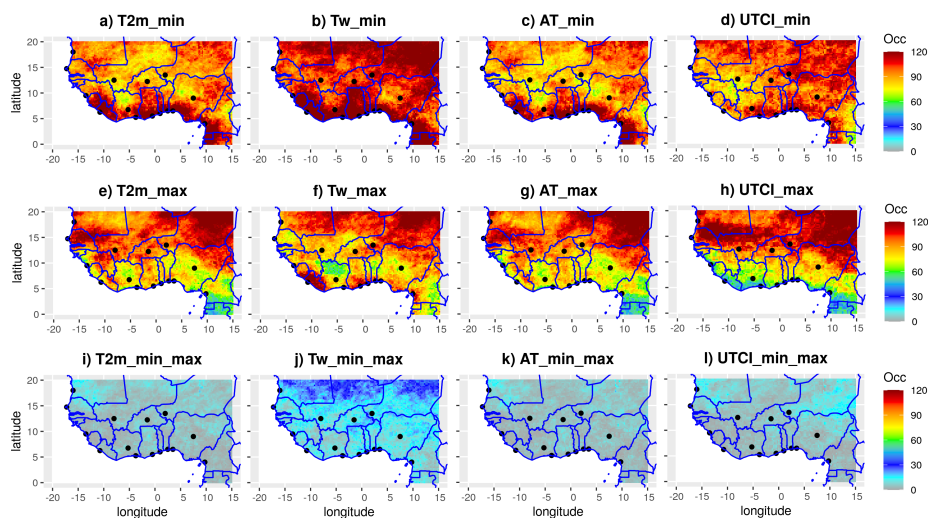


FIGURE 5.3 – Fréquence des vagues de chaleur sur toute la période 1981-2020 en Afrique de l’Ouest, suivant la définition utilisée (colonne) et l’utilisation seulement de Tmin, seulement de Tmax ou les deux conjointement (lignes), issue de Ngonje et al. 2022

flux de mousson vers le nord, provoquant une augmentation de l’humidité à basse altitude. Ce fort flux était associé à la fois à un secteur sud d’une onde d’est africaine (AEW) et à la circulation cyclonique autour de la dépression thermique Saharienne ou Saharan Heat Low (SHL). De plus, les excursions vers le nord de la mousson ont été soutenues par des écoulements de masses d’air froid convectif venant du Niger. L’analyse climatologique confirme la relation entre les précipitations sur le Hoggar et les secteurs sud des AEWs et montre également un affaiblissement marqué du SHL suite aux précipitations [Cuesta et al., 2009], Figure 5.4 et 5.5.

Pour des études avec des pas de temps plus longs des proxis à la précipitation ont été utilisés avec des températures de brillances satellites par exemple (discuté dans la partie données, produits de TRMM, CLAUS, OLR, MSG). Plus spécifiquement, dans Fall et al. [2021], nous avons comparé plusieurs ensembles de données pour évaluer les incertitudes de la détection des périodes sèches et humides au Sénégal, pour diverses applications hydrologiques et agronomiques en définissant un large éventail de métriques de pluie (voir Tableaux 5.1 et 5.2).

Des différences significatives sont observées entre les produits, et notamment avec les observations in situ identifiées comme la référence. Les résolutions originales étant différentes, des méthodes de krigeage des données stations ont aussi été prises en compte (Figure 5.6). Les produits à plus basse résolution montrent plus de périodes sèches. Les données satellites combinant infrarouge et micro-ondes montrent une bonne correspondance avec les observations in situ. Enfin, les réanalyses (ERA5 et NCEP) atteignent rapidement leurs limites pour reproduire ces événements de

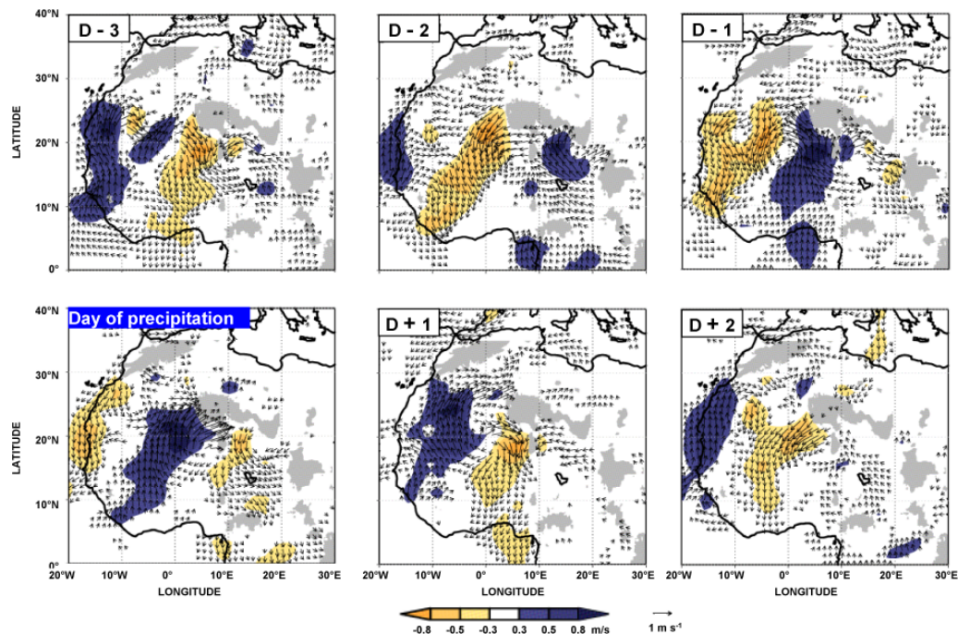


FIGURE 5.4 – Etude composite moyenne de l'activité des AEWs des trois jours précédents (D-3) aux deux jours suivants (D+2) le jour de précipitation D sur le Hogar du 1er juillet au 15 septembre sur la période 1979 et 2001.

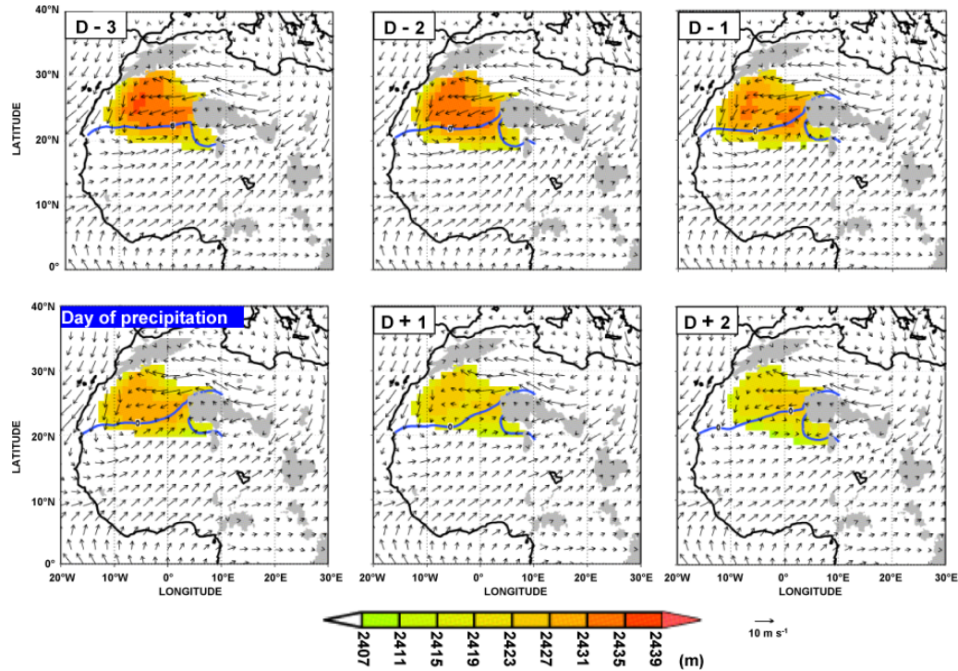


FIGURE 5.5 – Idem que 5.4 pour l'activité du SHL

Indice	Définition
DSC5	5 jours avec moins de 5 mm de précipitations
DSC10	10 jours avec moins de 10 mm de précipitations
DSC15	15 jours avec moins de 15 mm de précipitations
DSC20	20 jours avec moins de 20 mm de précipitations
DSs	1 à 3 jours secs consécutifs
DSm	4 à 7 jours secs consécutifs
DSl	8 à 14 jours secs consécutifs
DSxl	Jours secs consécutifs dépassant 15 jours

TABLE 5.1 – Définitions des indices de sécheresse

Indice	Définition
WS1	1 jour avec précip. > au XX percentile des précip. quotidiennes
WSM	2 jours ou plus avec précip > au XX percentile des précip. quotidiennes
WSC5	5 jours de précip cumulées > au XX percentile des précip. cumulées
WSC10	idem pour les cumuls de 10 jours
WSC15	idem pour les cumuls de 15 jours
WSC20	idem pour les cumuls de 20 jours

TABLE 5.2 – Définitions des indices de périodes humides

précipitation.

Ainsi, malgré une bonne corrélation avec la précipitation saisonnière, il existe une incertitude considérable dans la détection des périodes sèches et humides à l'échelle intra-saisonnière. TRMM semble être un choix prometteur pour extrapoler ces résultats à d'autres régions d'Afrique de l'Ouest (Figure 5.7).

Dans le but de prédire la charge en aérosols pour la saison sèche à venir, un stage d'ingénieur de Josephine Schmutz, dans le cadre de STEWARD a été effectué en 2022. Les événements à fortes charges en aérosols sahéliens ont été définis, leurs origines et leurs variabilités étudiées. Dans un premier temps, les concentrations issues des réanalyses de CAMS ont été validées à l'aide des observations disponibles de PM10. En utilisant des méthodes de descentes d'échelles et de corrections de biais les données de CAMS corrigées ont permis une spatialisation des données ainsi qu'une extension de la période d'étude. Par la suite la variabilité temporelle de la poussière et de la vitesse du vent à 10 m ont été analysées. Certains processus locaux (lié au jet nocturne, à l'harmattan, au front inter tropicale) associés aux soulèvements en période sèche ont été vérifiés. Des indices intra-saisonniers et inter annuels de vent du DUP [Bergametti et al., 2017], construits avec des vitesses de vent seuils associées aux soulèvements, ont été calculés. Des analyses statistiques (via des analyses en composantes principales du DUP) ont permis de définir des modes importants

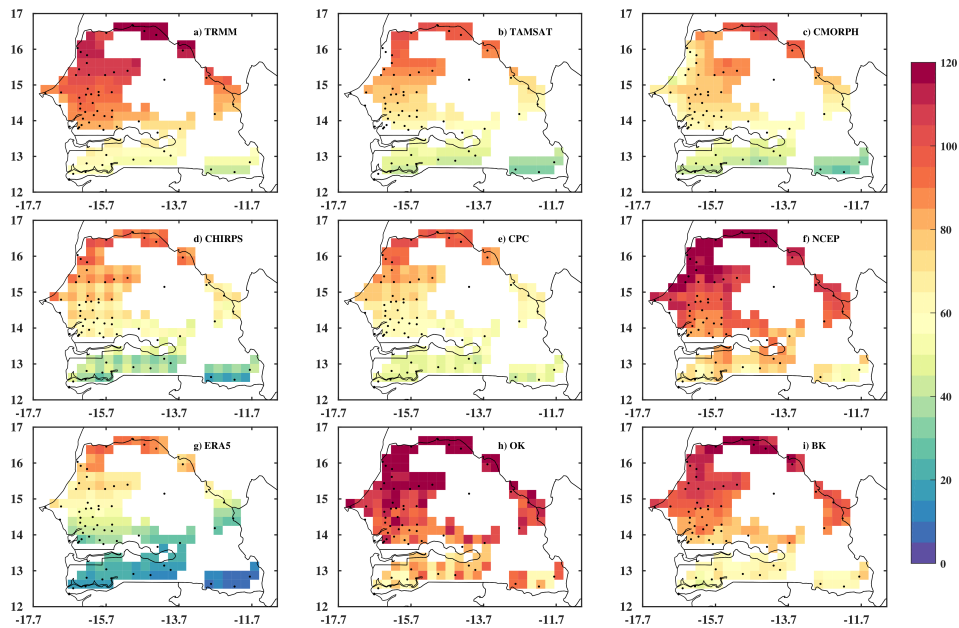


FIGURE 5.6 – Climatologie des jours secs au Sénégal pendant la saison des pluies, suivant les jeux de données et les méthodes de krigeages des données stations utilisées

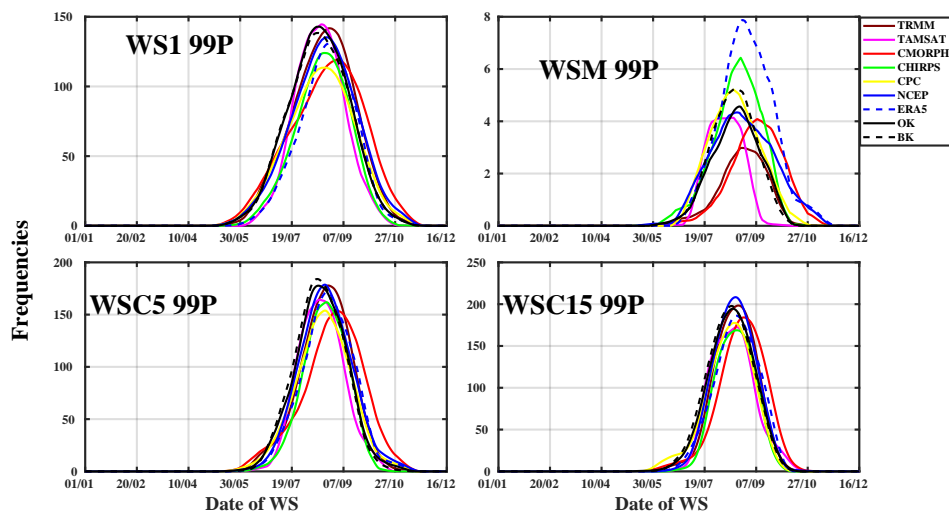


FIGURE 5.7 – Climatologie saisonnière des différents indices de wet spells définis dans Fall et al. 2021, suivant les jeux de données utilisés

dont certains étant clairement liés aux (Figure 5.8). A partir d'études composites des jours où les concentrations de PM10 sont supérieures à 380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (niveau considéré très malsain selon WHO), certains dipôles de l'ACP se sont révélés actifs et semblent être des bons prédicteurs. Ainsi par l'utilisation des prévisions saisonnières SEAS5

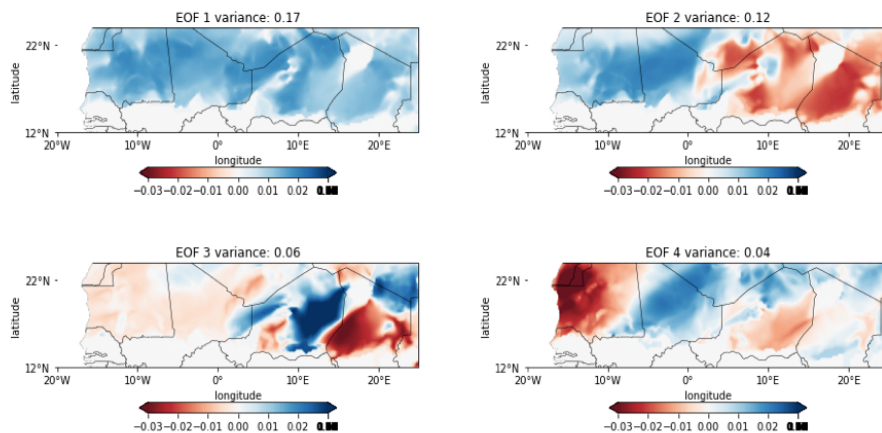


FIGURE 5.8 – Analyse en composante principale des indices de vents DUP sur la saison sèche de la période 1991-2020

initialisées à la fin de la saison humide, juste avant la saison sèche (Octobre-Avril). Les diagrammes de fiabilité montrent que dans l'ensemble, les événements extrêmes sont bien prédits, même en avril (plus de 5 mois d'échéance). Au niveau spatial, il est possible de retrouver les zones sources d'émission de poussière. Ces résultats font actuellement l'objet de l'écriture d'un article [Schmutz et al., 2024]. L'étude s'est poursuivie par l'analyse de variables météorologiques à plus haute altitude (à 500 et 850 hPa) pour identifier des motifs météorologiques prédominant associés aux événements extrêmes de poussière. En utilisant une carte auto-organisatrice SOM, un réseau neuronal qui permet de classer de grands ensembles de données en tenant compte de leur topologie, a permis d'identifier des mécanismes de cut-off low qui pourraient expliquer la plupart des événements violents rencontrés pendant la saison sèche.

L'étude de ces grands soulèvements de poussière s'est poursuivi dans l'étude de Foteini Baladinma [Baladima et al., 2022] dans laquelle la compréhension des facteurs qui contrôlent la déposition de poussière sur la neige dans les Alpes françaises a été menée. Pour ce faire, un cas d'étude en avril 2018 a été étudié et simulé avec des données de télédétection par satellite, des modélisations et des observations. L'objectif est de lier les processus aux échelles locale et régionale qui influent sur la déposition de poussière dans les régions montagneuses éloignées des sources. Les résultats montrent que la météorologie simulée par le modèle WRF-Chem est très sensible à la résolution du modèle, en raison de la représentation améliorée de la topographie. L'utilisation des jeux de données d'aérosols, issus de la télédétection ou d'observations au sol, est également utile pour évaluer les modèles WRF-Chem et CAMS sur la représentation de ces événements. Ainsi, les résultats ont montré les limites des modèles dans la simulation des événements, surtout dans les processus de déposition des poussières.

5.1.2 Système de grande échelle, mousson

Dans les travaux antérieurs, les forçages de grande échelle ont fait l'objet d'études pour mieux comprendre leurs mécanismes et leurs impacts.

Lancé en 2002, AMMA a réuni des scientifiques de diverses disciplines pour étudier les processus météorologiques, climatiques, hydrologiques et environnementaux associés à la mousson africaine. L'objectif principal du programme était de mieux comprendre les variations de la mousson africaine, ainsi que ses implications pour les populations locales en termes de sécurité alimentaire, de santé et de gestion des ressources naturelles. Il a permis d'approfondir notre compréhension des processus impliqués dans la mousson et de leur interconnexion. Des travaux auxquels j'ai contribué [Lafore et al., 2012] ont permis de souligner les interactions entre la mousson et les régions avoisinantes (les latitudes tempérées, la péninsule arabique, l'Atlantique, la mousson indienne et toute la ceinture tropicale). Ces conclusions ont ouvert la voie à une meilleure compréhension de la variabilité intra-saisonnière de la mousson africaine. Lors de la campagne intensive sur le terrain qui a eu lieu pendant l'été 2006, les processus spécifiques et les systèmes météorologiques à différentes étapes clés de cette saison de mousson ont été analysés avec une très grande quantité d'observations [Janicot et al., 2008]. Sur des périodes plus longues, et bénéficiant d'un réseau d'observations plus large, les principaux modes de variabilité aux échelles intra-saisonnières ont été identifiés [Janicot et al., 2010]. Il s'agit encore d'une période remarquable où des avancées majeures ont été faites et où la quantité de données collectées permet de valider certaines hypothèses. Au cours du programme AMMA, il a aussi été montré que le déplacement de l'ITD (front intertropicale) étaient liés à la présence et au déplacement de systèmes convectifs de méso-échelle. Le courant d'air froid se propageant vers le nord modifie la thermodynamique de la couche limite planétaire sahélo-saharienne sur un front d'au moins 1000 km de long et environ 200 km de large [Flamant et al., 2009b]. Les mesures de dropsonde ont révélé que le courant d'air froid apportait de l'humidité vers le nord sur le Sahel et vers les franges méridionales du Sahara, tout en refroidissant la surface du désert. Plus au nord, sur la partie du Sahara non impactée par le courant d'air froid, les observations aéroportées suggèrent aussi que les importantes quantités de poussière dans la partie supérieure de la couche d'aérosols sahariens ont également pu avoir un impact en refroidissant, par effet direct, la couche limite saharienne. Une amélioration quantitative a été observée dans la prévision de ces jours, lorsque les informations pertinentes de la propagation de l'ITD ont été assimilées. Les analyses ont pu reproduire la poussée d'humidité vers le nord associée au courant d'air froid, suggérant que les analyses ECMWF peuvent être utilisées pour analyser le rôle des courants denses propagatifs sur le mécanisme de début de la mousson.

A plus long pas de temps, une étude a porté sur les oscillations décennales entre des périodes de sécheresse et des précipitations abondantes. A partir de [Evan et al., 2015], il a été souligné le rôle du SHL dans la fin de la période de sécheresse sahélienne des années 1980. En utilisant des observations et des réanalyses, une hausse de la

température du SHL a été détectée avec la fin de la période de sécheresse. Une analyse du bilan de chaleur et d'humidité du SHL suggère que l'augmentation de la température est due au réchauffement par effet de serre par la vapeur d'eau, mais que ces changements dans la vapeur d'eau dépendent fortement de la température du SHL. Il a donc été démontré que la cessation de la période de sécheresse est en accord avec le réchauffement du SHL, ce qui suggère un rôle essentiel, bien que non exclusif, du SHL dans l'augmentation récente des précipitations de la mousson sahélienne.

5.2 Forçages synoptiques et locaux des événements

L'objectif de cette partie des travaux était d'analyser les différentes composantes atmosphériques synoptiques et forçages locaux qui influent sur les variations de l'activité convective à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans cette partie sont présentés les résultats portant sur l'analyse des ondes d'Est, de la dépression thermique et les aérosols désertiques.

5.2.1 Ondes d'Est Africaines

Les travaux de thèse ont mis en lumière l'origine atmosphérique et les impacts des précipitations fortes sur le cumul annuel et la variabilité interannuelle. Or l'occurrence des fortes précipitations augmente distinctement dans les secteurs propices des ondes Est Africaine ou Ondes d'Est Africaines (AEW), flux de nord et secteur dépressionnaire de l'onde. Spatialement, l'activité des AEW apparaît plus forte sur la côte Sénégalaise qu'au Niger [Lavaysse et al., 2006b,a]. Cette étude s'est prolongée récemment avec les travaux de thèse de Tanguy Jonville portant sur l'impact de ces mêmes AEW sur la cyclogenèse. Ainsi, en septembre 2021, lors de la campagne CADDIWA, trois ondes d'est actives sur le plan convectif ont été observées au-dessus de l'océan Atlantique Nord-Est [Jonville et al., 2023]. Il a été mis en évidence des processus qui ont empêché le développement de la première onde (qui est devenue la perturbation tropicale Pierre-Henri) et qui ont joué un rôle dans le développement des deux suivantes en tempêtes tropicales Rose et Peter le 19 septembre 2021. Des distinctions ont été faites entre les ondes et le possible développement en tempêtes, notamment le rôle joué par une poche dans les basses couches associée à un vortex, protégeant efficacement le système des intrusions d'air sec et poussiéreux. Ce travail a aussi mis en lumière des comportements différents des AEW Nord et Sud et les interactions entre les deux trajectoires. Cette identification a poussé une seconde étude, en cours de rédaction (Jonville et al. TBS), qui introduit un nouveau protocole de suivi basé sur un filtrage spectral de la vorticité à 700 hPa sur deux périodes de fréquence distinctes, adaptées à la trajectoire spécifique de chaque onde : 2,95-4,55 jours pour le mode de propagation plus rapide et 4,55-6,35 jours pour le mode de propagation plus lent. Appliquée à une série de données de réanalyses couvrant plus de 30 ans, cette analyse a permis de détecter efficacement l'activité des trajectoires nord, même en présence de signaux dominants des trajectoires sud,

améliorant ainsi l'identification et le suivi des vortex se déplaçant vers le nord. Des caractéristiques distinctes entre les deux types d'onde en termes de propagation et de positionnement vertical ont été identifiées. Cette nouvelle approche permet une détection accrue des AEW au Nord même lorsque l'activité des AEW au Sud domine le signal de 2 à 10 jours, conduisant à une meilleure compréhension des fusions entre les deux types d'ondes qui peuvent avoir des conséquences importantes sur la cyclogénèse.

Une partie de mes travaux ont aussi visé à améliorer les observations dans la région des AEW. Ces travaux ont été mis en place, soit en développant des observations novatrices, soit comme contributeurs de campagnes d'observations. Pendant AMMA, des ballons stratosphériques transportant des nacelles appelées driftsondes capables de larguer des sondes météorologiques ont été déployés sur l'Afrique de l'Ouest et l'océan Atlantique tropical. Les objectifs du déploiement étaient de tester la technologie et d'étudier les ondes équatoriales africaines, souvent associés à de la cyclogénèse. Au total, plus de 124 sondes ont été larguées sur les sept ondes équatoriales qui se sont déplacées à travers l'Afrique dans l'Atlantique. Les conditions comprenaient des ondes qui se sont développées en tempête tropicale Florence et les ouragans Gordon et Helene. Grâce à des collaborations avec Météo France, des sorties de modèles de prévision numérique du temps ont été comparées aux sondages pour évaluer l'assimilation de ces données sur la qualité des analyses et des prévisions [Drobinski et al., 2010]. De plus il a été noté une amélioration de la prévision des trajectoires des cyclones représentant un énorme avantage en termes de coûts et des dommages [Drobinski et al., 2012].

5.2.2 Dépression Thermique Ouest Africaine

La dépression Ouest Africaine (dépression thermique de basse couche située dans la basse troposphère, SHL) est un autre élément clef du système de mousson situé en été au Sahara à l'Ouest du Hoggar. Cette zone de basse pression renforce le gradient de pression avec la côte guinéenne et tend à renforcer les flux de masses d'air humide en provenance du Golfe de Guinée. Mes travaux ont permis de définir les caractéristiques de son cycle saisonnier pendant la période 1979–2001, en définissant l'épaisseur atmosphérique aux basses altitudes (LLAT) dans les réanalyses ERA-40 [Lavaysse et al., 2009]. L'équation de tendance de température a été utilisée pour étudier les processus contrôlant le déplacement de la dépression en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement le chauffage aux basses altitudes. Le lien entre les variations intra-saisonniers du flux de mousson et des advections d'humidité au Sahel avec l'activité de la dépression thermique dans sa période estivale a été mis en évidence (Figure 5.9). Les phases d'intense dépression de SHL sont liées à des anomalies positives de température, un renforcement du flux de mousson, une intensification du jet équatorial africain (AEJ) et une augmentation de la convection au Sahel central (Figure 5.10). En revanche, les phases faibles du SHL sont associées à une anomalie négative de convection au Sahel central, liée à une subsidence anormale au sud du front de mousson intertropical (ITD) et à une circulation anticyclonique

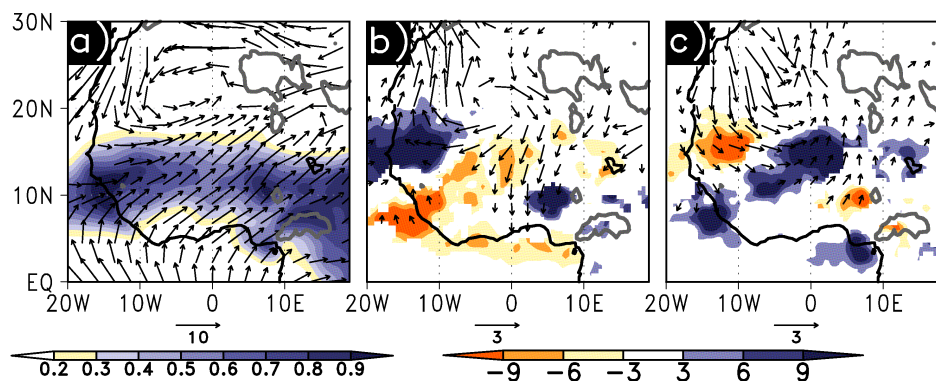


FIGURE 5.9 – (a) Fréquence moyenne d’occurrence de la température de brillance sous 230 K et moyenne de la circulation du vent à 925 hPa pendant la saison estivale (en m s^{-1}). Anomalie significative par rapport à la moyenne estivale de l’activité convective (en %) et anomalie par rapport à la circulation moyenne estivale du vent à 925 hPa pour le composite du SHL faible (b) et le composite du SHL fort (c), calculés par rapport à (a).

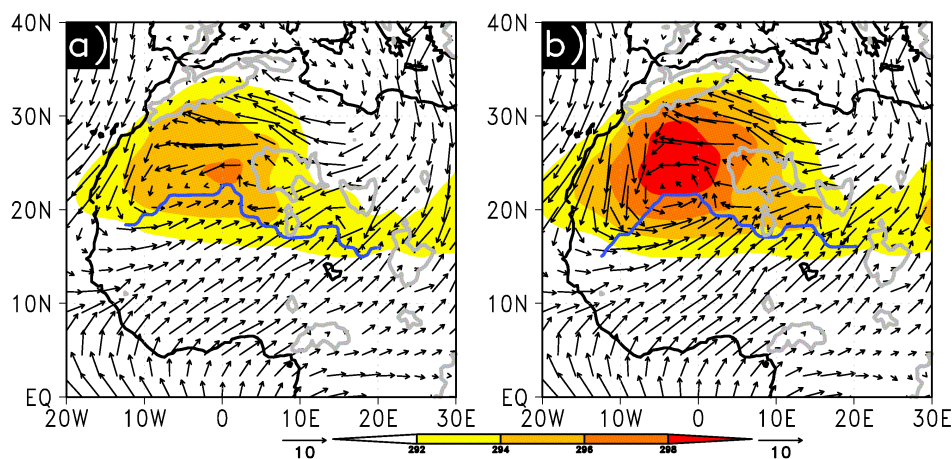


FIGURE 5.10 – Température à 850 hPa et vent à 925hPa moyens sur la période 1981-2010 en saison humide lors de faible (a) et fortes (b) phases de SHL. La position du front inter-tropical est indiquée en bleu.

marquée [Lavaysse et al., 2011, 2010a]. Enfin, la SHL interagit avec les ondes d’est via le jet et, rétroactivement, les ondes modules des flux d’humidité qui affaiblissent la dépression [Lavaysse et al., 2010b].

Grâce aux outils développés, j’ai par la suite contribué à plusieurs études pour caractériser l’état de la dépression. Il s’agissait notamment de proposer une utilisation des températures de brillance de AMSU-A à 52,8 GHz (A4) et à 53,6 GHz (A5) pour détecter et caractériser le SHL à l’échelle saisonnière et intra-saisonnière [Lavaysse et al., 2013a]. Ce travail avait deux objectifs, comparer les données issues

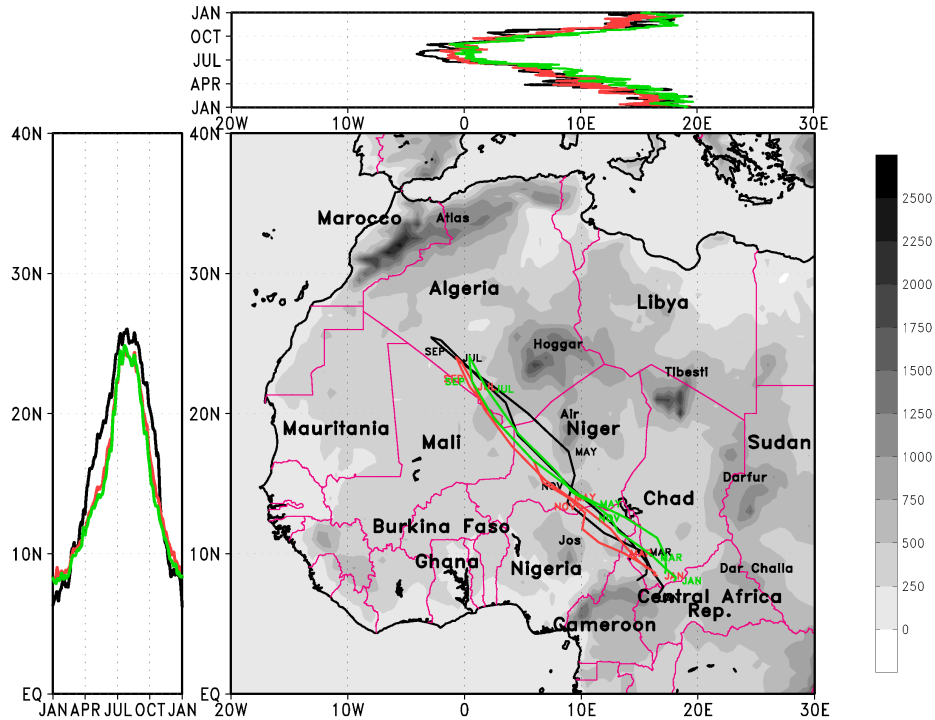


FIGURE 5.11 – Localisation climatologique du SHL pendant toute l'année en utilisant le barycentre de la dépression détectée suivant les données AMSU, et les reanalyses

des observations satellites par rapport aux données des réanalyses et de proposer des indicateurs opérationnels de détection et caractérisation de la SHL via des observations. Il a été souligné le bon accord entre les mesures indépendantes de AMSU-A à l'échelle saisonnière et leurs homologues dérivés de ERA-I (Figure 5.11). De plus, l'utilisation du Tb de AMSU-A4 semble également appropriée pour détecter et caractériser la variabilité saisonnière et intra-saisonnière de la dépression thermique en Afrique de l'Ouest. Nous considérons donc que l'utilisation du Tb de AMSU-A4 est adaptée pour fournir une estimation précise de l'intensité du SHL et peut être utilisée comme un produit quasi-temps réel pour contribuer à la surveillance du système de mousson ouest-africain. Il a aussi été étudié le rôle de la dépression thermique sur les émissions et le transport des poussières. En utilisant des observations satellites de l'épaisseur optique de la poussière (AOD) et des profils verticaux, il a été montré que les poussières émisent depuis la dépression du Bodélé sont progressivement advectées vers l'ouest en raison du renforcement du Jet d'Est Africain, lié au réchauffement du SHL. Ainsi, la présence de fortes valeurs d'AOD à l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest était surtout liée à des conditions de SHL chaud et une combinaison d'advection de poussière depuis l'est et d'émission locale [Wang et al., 2017].

Puis le lien avec les précipitations a été étudié. En effet, une corrélation négative a souvent été observée entre la poussière et les précipitations. Dans Wang et al. [2015], nous démontrons que la variabilité inter-annuelle des précipitations au Sahel et des vitesses du vent en surface sur le Sahara résulte des changements de température de l'air en basse troposphère au niveau de la dépression thermique saharienne. Avec le réchauffement de la SHL, une circulation troposphérique de basses couches se forme, entraînant une diminution des vitesses du vent sur le Sahara et un déplacement des précipitations de mousson vers le nord, ce qui augmente simultanément les précipitations au Sahel tout en réduisant les émissions de poussière des principaux points chauds de poussière dans le Sahara.

Une contribution a été faite pour mieux comprendre les mécanismes régissant la circulation atmosphérique peu profonde estivale en Afrique du Nord via un modèle idéalisé [Dalu et al., 2018]. Il a été montré qu'au printemps, le SHL entraîne une cellule avec de l'air ascendant sur l'Afrique de l'Ouest et de l'air descendant sur l'Atlantique. L'AHL (dépression Arabique) plus faible entraîne une cellule avec de l'air ascendant sur l'Arabie et de l'air descendant sur l'Afrique de l'Est. En été, l'AHL plus fort entraîne une cellule avec de l'air ascendant sur l'Arabie et de l'air descendant sur la Libye, et le SHL plus faible entraîne une cellule avec de l'air ascendant sur l'ouest du Sahara et de l'air descendant sur l'Atlantique. Les contributions simultanées des vents d'est, de la convergence en basse altitude de la mousson et du réchauffement saisonnier de la poussière aérienne renforcent le SHL, rendant ses vents plus forts que ceux de l'AHL. Ces contributions renforcent les anticyclones sur l'est de la Méditerranée et à l'ouest de Gibraltar et expliquent mieux le rôle clé de la SHL sur le système de mousson.

A l'échelle climatique, j'ai travaillé sur la récente évolution climatique de la dépression thermique pour souligner son évolution particulièrement forte au Sahara [Lavaysse et al., 2012b]. Il a été souligné une forte augmentation dans les années 90 qui a eu des répercussions fortes sur la circulation dans les basses couches, comme l'illustre la Figure 5.12.

Mon expérience dans l'analyse de la dépression thermique et la région saharienne m'a permis de publier une note dans Nature Climate Change sur le réchauffement particulier des températures sahariennes par rapport aux régions environnantes [Lavaysse, 2015]. Dans cette étude, on constate une augmentation renforcée de la température dans la région Saharienne (Figure 5.13).

5.2.3 Aérosols désertiques

L'Afrique de l'Ouest se distingue en tant que principale source mondiale d'émissions d'aérosols désertiques. Ces particules de poussière engendrent d'importants impacts radiatifs, tant au niveau local que dans d'autres régions. Il était donc primordial que ce forçage soit pris en compte dans les études. Que ce soit pour les aspects de détection, de compréhension de leurs variabilités, mais aussi sur les aspects impacts en terme de rayonnement direct et indirect. Ces travaux sont présentés ici.

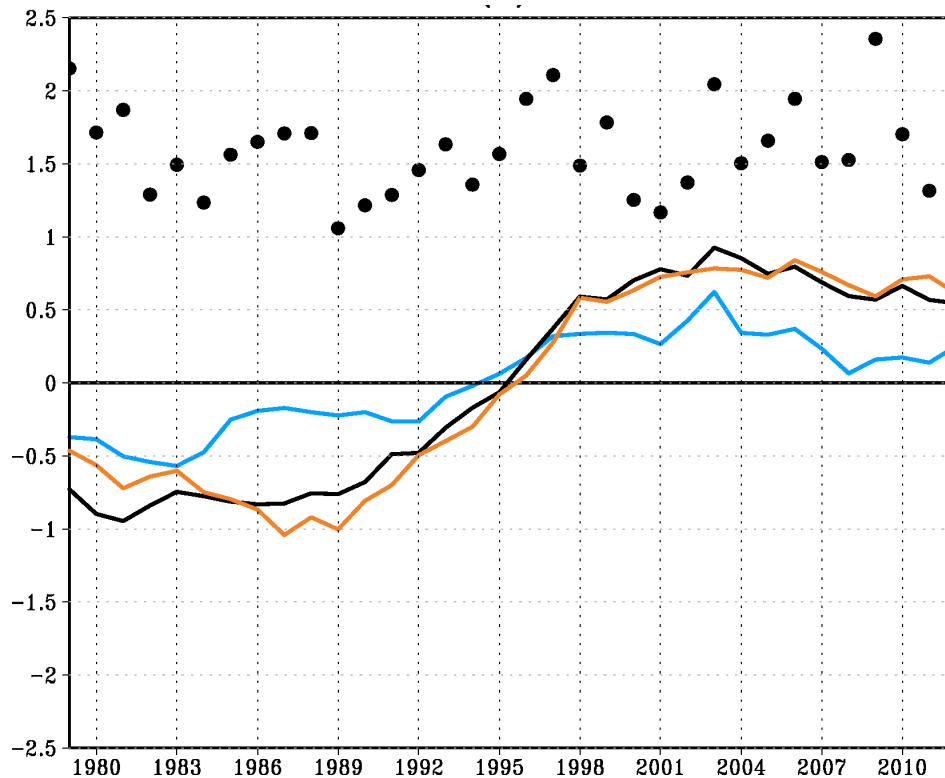


FIGURE 5.12 – Évolution temporelle du quantile 10 (bleu), du quantile 90 (rouge) et de la médiane de l'intensité du SHL (noire) pour chaque année de 1979 à 2012 en utilisant le signal non filtré d'ERA-Interim soulignant la forte augmentation dans les années 90. Les points noirs indiquent l'écart-type annuel de chaque signal.

Des travaux axés sur la caractérisation de l'environnement à grande échelle et l'analyse de l'impact de la dynamique sur le transport des panaches d'aérosols, en utilisant des données locales ainsi que des campagnes de terrain, ont été menés. Ainsi la structure de la couche d'air saharienne au-dessus du Niger et du Bénin a été étudiée lors d'un important événement printanier de poussière provenant de la région de Bodélé et du Soudan, à l'aide de mesures de lidar aéroporté et de dropsondes lors de la campagne AMMA. Il a ainsi été mis en évidence le rôle du front inter-tropical et des montagnes du Darfour dans l'injection des aérosols provenant de Bodélé et du Soudan sur le flux de mousson et dans la région du jet d'est africain [Flamant et al., 2009b]. L'impact d'un système convectif de mésoéchelle (MCS), sur la charge de poussière et la distribution verticale observées au-dessus du Bénin et du sud du Niger, a également été étudié. L'impact sur la distribution de la poussière est associé à une subsidence généralisée dans le sillage du MCS, sur le nord du Bénin et du Niger. Au sud du Bénin, la distribution de la poussière semble ainsi principalement être contrôlée par les processus affectant la couche limite sur le Nigeria ou le Tchad.

Les émissions de poussières minérales, à partir de sédiments alluviaux dans la

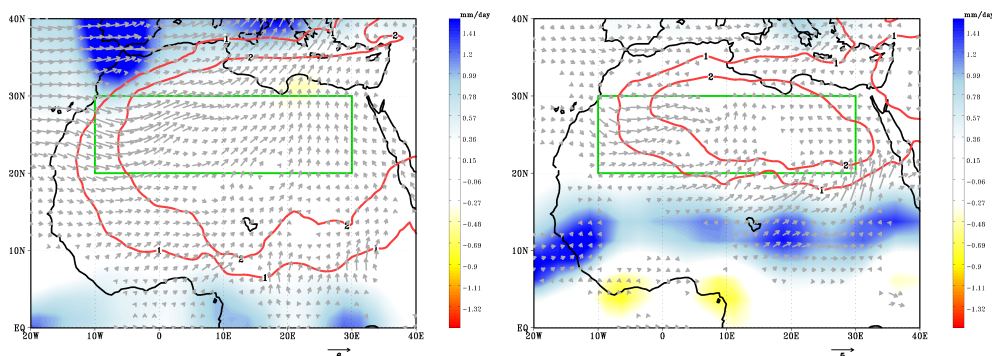


FIGURE 5.13 – Anomalies de la température à 850 hPa (provenant de ERAI, contours), du vent à 925 hPa (provenant de ERAI, vecteurs) et des précipitations (provenant de GPCP, couleurs) pendant les 5 années les plus chaudes par rapport aux 5 années les plus froides de la période 1979-2012 pendant la saison sèche (à gauche) et la saison des pluies (à droite).

région montagneuse du nord de la Mauritanie, ont aussi été analysées [Schepanski et al., 2013]. Les mesures de la charge de poussière atmosphérique locale, obtenues à partir d’observations aériennes satellite et de simulations de modèles confirment l’importance des sédiments alluviaux au fond des vallées en tant que source de poussière, et le rôle du jet nocturne en basse altitude comme déclencheur d’émission de poussière dans cette région. Certains modèles régionaux sous-représentent ces sources de poussières alluviales.

Les rétroactions des aérosols sur la dynamique atmosphérique et les précipitations sont importantes dans cette région. Ces études ont surtout été menées grâce à des campagnes aéroportées auxquelles j’ai participé et activement contribué. La campagne Fennec, observations renforcées en juin 2011 et 2012, visait à améliorer notre compréhension de la dynamique atmosphérique et de la thermodynamique dans la région centrale du Sahara, en particulier pendant l’été boréal lorsque les interactions avec la mousson ouest-africaine sont significatives. Au cours de cette campagne [Flamant et al., 2021], l’objectif était d’améliorer la compréhension du système climatique saharien grâce à une synergie d’observations et de modélisations. Les interactions des poussières minérales et la couche limite ont été analysées par les instruments embarqués à bord des avions du FAAM BAe146 britannique et du F20 de SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement). Au début de la campagne, la SHL s’est déplacée vers le nord avec une influence maritime donc faiblement chargé en d’aérosols, tandis que la deuxième partie de la campagne était caractérisée par des conditions chaudes et poussiéreuses avec l’advection vers l’ouest de poussières sahariennes [Todd et al., 2013]. De forts contrastes de températures et d’humidité à la surface, ont conduit à des soulèvements de poussière. Il a été montré que ces soulèvements de petites tailles restent un défi pour les modèles de prévisions qui ont montré leurs limites. Les résultats

contribuent aussi à mieux comprendre le rôle de la SHL dans le système climatique régional et à améliorer la représentation des modèles climatiques des dynamiques sahariennes et des interactions avec les aérosols.

Pendant la campagne de terrain **DACCIWA** (juin-juillet 2016), les interactions entre différents facteurs météorologiques, allant des schémas de température de surface de la mer à la convection, ont été étudiées [Knippertz et al., 2017]. L'analyse du début de saison des pluies cette année là, révèle une période précoce de pluie caractérisée par une arrivée précoce de l'onset de la mousson et une intensification suivie d'un déplacement vers l'ouest de la SHL. L'analyse souligne l'impact de ces facteurs sur les nuages, les précipitations, les vents et le transport de pollution et de poussières. Les résultats suggèrent une grande complexité dans la dynamique atmosphérique de la région et un impact potentiellement fort des charges en aérosols (issues de la pollution des villes Ouest Africaines, des feux de forêt en Afrique Centrale et des poussières sahariennes).

Les données acquises pendant la campagne **CADDIWA** (Septembre 2021 au Cap Vert) constituent une base solide pour répondre aux objectifs scientifiques qui concernent la compréhension du rôle des interactions nuage-atmosphère-poussière dans le développement des tempêtes tropicales en Atlantique Tropicale. Les mesures aéroportées acquises pendant la campagne de **CADDIWA** [Flamant et al., 2024] ont permis de documenter une variété de situations météorologiques impliquant ces interactions lors de développement de perturbations tropicales. Les mesures ont permis de mieux contraindre les simulations numériques, en particulier pour comprendre l'impact des différents effets des ondes et radiatifs des aérosols sur le cycle de vie de perturbations tropicales. Elles ont permis d'aboutir à des avancées sur notre connaissance des ondes d'Est, et plus particulièrement dans des processus de Cyclogénèse et d'interactions ondes nord et ondes sud (Jonville et al. 2024, Jonville et al. TBS).

Simulation numérique et prédictibilité

Contents

6.1 Représentation et Sensibilité	55
6.2 Prévisions court et moyen termes	57
6.3 Prévisions Saisonnières	59
6.4 Projections climatiques	62

La deuxième volet de mes travaux consiste à recourir à des modèles régionaux et globaux. Les objectifs sont

- de confirmer les hypothèses mises en évidence précédemment à l'aide d'études de sensibilités,
- de mieux quantifier les causalités des mécanismes à l'aide de la grande disposition de données et des simulations d'étude de cas
- d'évaluer les niveaux de prédictibilité à différentes échéances.

Dans cette partie, nous discutons les principaux résultats obtenus en lien avec ce thème.

6.1 Représentation et Sensibilité

Au sein d'Environnement Canada et de l'université McGill, des recherches visant à améliorer notre compréhension de la sensibilité de la dynamique atmosphérique et de la convection aux incertitudes des conditions de surface, ont été menées. Une liste des variables ayant le plus d'impact sur les paramètres atmosphériques des basses couches (température, vent, précipitations) a été établie. Ces efforts ont également contribué à l'amélioration de la simulation des événements de précipitations extrêmes [Lavaysse et al., 2013b]. Un deuxième volet de mes recherches portait sur l'impact des conditions de surface sur les analyses de précipitations canadiennes (CaPA), qui sont cruciales pour l'initialisation des modèles et la détermination des ressources en eau (agriculture, hydroélectricité, gestion des sécheresses et des inondations). Mon rôle consistait à produire et valider des séries d'analyses de champs de précipitations obtenues par l'assimilation d'observations sol et satellitaires dans les prévisions du modèle d'ensemble.

Des études de sensibilité ont aussi été menées sur l'impact des aérosols désertiques lors d'un cas d'étude en 2006. Différents jeux de simulations régionales

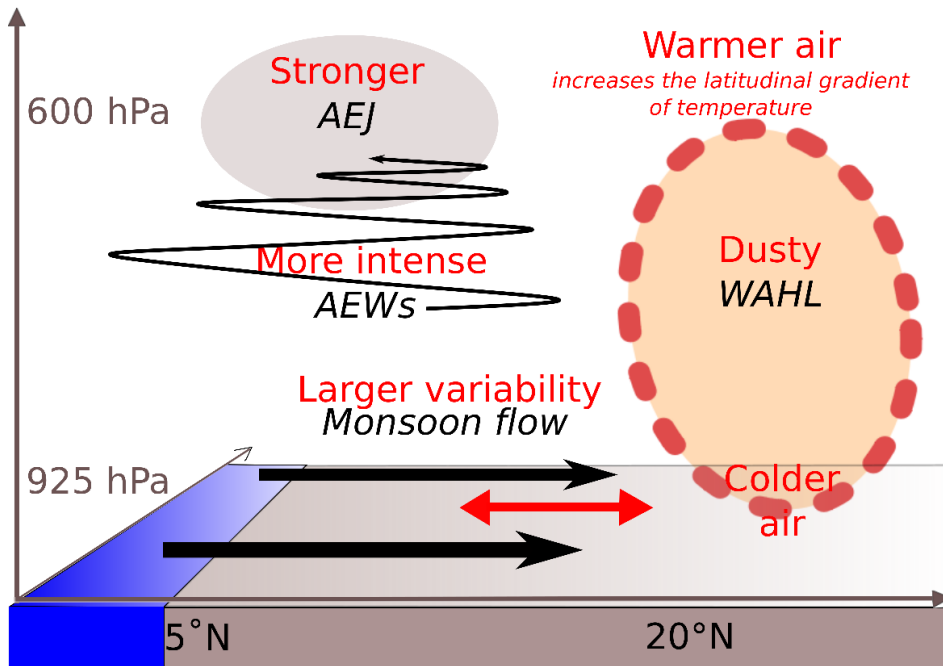


FIGURE 6.1 – Schéma des impacts de l'inclusion des aérosols désertiques sur les composantes synoptiques de la mousson lors d'événements pendant AMMA. Issue de Lavaysse et al. 2015

(Meso-NH) ont révélé les impacts radiatifs sur les composantes atmosphériques de la mousson [Lavaysse et al., 2015]. Toutes les simulations avec des aérosols pronostiques, climatiques ou sans, captent bien la variation de l'intensité du système de mousson, y compris la simulation sans poussière. Ces résultats montrent le rôle principal du forçage de grande échelle sur la pulsation du SHL (Figure 6.1). La simulation utilisant un schéma de poussière pronostique renforce l'advection alternée : vers le nord de l'air chaud et sec et vers le sud de l'air froid et humide associée à la propagation d'une onde d'est africaine, ce qui conduit à un renforcement des variabilités du SHL. Ainsi un effet direct associé au chauffage radiatif de la poussière augmente l'épaisseur du SHL, et un effet indirect intensifie à la fois le jet d'est africain et une onde d'est africaine associée.

Actuellement, des travaux de thèse de Leo Clauzel, portent sur l'impact des conditions initiales sur les simulations de la concentration en aérosols pendant la saison sèche en Afrique de l'Ouest. Il s'agit d'abord d'une première évaluation du couplage WRF-CHIMERE à simuler l'irradiance solaire globale lors d'un événement typique de poussière pendant la saison sèche en Afrique de l'Ouest. De plus, ce travail vise à estimer l'impact et les incertitudes des forçages initiaux et des forçages aux bords du domaine (Clauzel et al. accepted). Les résultats soulignent la capacité du couplage à représenter les soulèvements et les transports correctement. La localisation des zones sources et les caractéristiques des panaches sont proches de

ceux observés. Cependant, la performance est modérée par une surestimation de la densité des panaches en région de Sahara central où l'AOD est très significativement supérieur à celui observé, conduisant à une sous-estimation de GHI. Les tests ont souligné le fort impact du choix des forçages surtout pour les concentrations simulées de PM10 dans les basses couches et sur la distribution de taille des concentrations d'aérosols.

Les travaux de thèse en cours de Tanguy Jonville impliquent l'utilisation des modèles numériques Meso-NH et WRF-CHIMERE pour simuler les événements de la campagne CADDIWA. L'objectif est de reproduire les cyclogénèses observées (Pierre Henry, Rose et Peter), d'abord pour valider les simulations numériques et évaluer la capacité des simulations incluant des aérosols à reproduire cette étape cruciale avec une précision acceptable. Les simulations sont en cours de traitement et ont déjà montré des cyclogénèses pour ces événements, démontrant ainsi des premières qualités de simulation. Ensuite, ces outils seront utilisés pour quantifier précisément l'intensité et les caractéristiques des différents forçages impliqués lors de ces événements. Ces résultats seront ensuite comparés aux observations recueillies pendant la campagne. L'objectif ultime de cette démarche est de mieux comprendre l'impact des incertitudes liées aux facteurs clés (telles que les ondes d'Est et les aérosols) sur la précision des prévisions de cyclogénèse dans cette région.

6.2 Prévisions court et moyen termes

Dans cette section, je détaille les travaux qui ont été menés sur l'utilisation de sortie de modèles de prévisions à différentes échéances pour soit estimer la qualité des informations produites, soit développer des indicateurs robustes ou pour améliorer ses prévisions.

Aux échéances court à moyen termes (de quelques jours à quelques semaines), des travaux ont été déployés au cours de différents projets dans le cadre de différents programmes. Dans le cadre du projet Copernicus EMS, j'ai travaillé sur les systèmes d'alertes précoces dans le cadre de deux observatoires. GloFAS fournit des prévisions mondiales des crues à différentes échéances en utilisant le modèle hydrologique LIS-FLOOD forcé par le système de prévision de ECMWF. Dans ce cadre, nous avons testé une nouvelle méthode pour estimer les seuils de débit pour la prévision des inondations à moyen terme. Nous avons proposé une modification des seuils d'inondation issues des hindcasts plutôt que de ERA5 comme elles étaient précédemment définies [Alfieri et al., 2019]. Ces nouveaux seuils sont capables de compenser certaines dérives de prévisions dans les valeurs extrêmes, particulièrement utiles sur de plus longues échéances. Les travaux complémentaires ont montré leur intérêt dans un contexte opérationnel.

J'ai, toujours dans le cadre de Copernicus EMS, travaillé plusieurs années pour GDO. Cet observatoire, complémentaire à GloFAS, contribue aux efforts de détection et caractérise les sécheresses à l'échelle globale. Il permet en outre de proposer des outils tailorés pour les utilisateurs en terme de prévision et d'impacts de ces

événements En parallèle aux sécheresses, des outils ont été développés afin de détecter, caractériser et prévoir les vagues de chaleur. Dans ce contexte, une étude a évalué la prévisibilité des vagues de chaleur en Europe, s'appuyant sur 20 ans de hindcasts du modèle ensembliste de ECMWF [Lavaysse et al., 2019]. Les prévisions développées montrent des avantages significatifs jusqu'à 2 semaines à l'avance, avec une bonne représentation des événements observés. Les résultats soulignent également l'importance de prendre en compte des paramètres environnants (taille de la vague de chaleur, persistance) pour fournir des prévisions plus fiables.

Ma contribution est aussi dans le programme de S2S piloté par WMO et ECMWF et d'abord aux travaux par l'écriture du chapitre d'un livre [Vitart et al., 2019]. Celui-ci porte sur la prédiction S2S de deux catégories d'événements extrêmes : les événements météorologiques extrêmes à grande échelle, individuels et de longue durée dont l'apparition, l'évolution et la décroissance pourraient être prédites quelques semaines à l'avance ; et les événements à fort impact de petite échelle qui ne peuvent pas être prédits individuellement des semaines à l'avance, mais dont les statistiques pourraient être prévisibles à l'échelle S2S en raison de leur interaction avec la circulation à grande échelle.

D'autre part, les données du programme S2S ont aussi été mises à profit dans des études de prévisibilité de vagues de chaleur en Afrique pour le projet ANR STEWARD. Ngoungue Langue et al. [2022] a évalué la prévisibilité des vagues de chaleur dans les villes d'Afrique de l'Ouest. Pour cela des modèles faisant partie du projet de prévision S2S ont été confrontés à des données de réanalyse : ERA5 et MERRA sur la période 2001-2020. Différentes variables, avec ou sans informations d'humidité, ont été utilisées pour estimer les incertitudes sur différents types de variables atmosphériques. Des biais variables et complexes ont été mis en évidence, suivant les régions, les saisons, les modèles et les références. Avec des Brier scores significatifs, les modèles sont capables de détecter les événements de chaleur extrême jusqu'à 5 semaines à l'avance avec ECMWF extended comme étant le modèle le plus robuste. Évidemment certaines limites ont été montrées avec des difficultés à reproduire correctement l'évolution spatiale des caractéristiques des vagues de chaleur et une surestimation de la fréquence des vagues de chaleur au printemps et en été sur le Sahel. Finalement, respectivement 30% à 15% des jours de vagues de chaleur prédits sont observés pour les échéances à 2 et 5 semaines. Pour les vagues de chaleur humides (avec la prise en compte de l'humidité), UKMO surpasse ECMWF à la fois pour les prévisions à court et à long terme. Enfin, la prévision précise de l'intensité des vagues de chaleur, importante pour l'estimation des impacts, reste une tâche difficile pour les modèles.

En 2011, des prévisions de poussière ont été réalisées spécifiquement pour le programme FENNEC en utilisant trois modèles à domaine limité : ALADIN, AROME et Meso-NH [Chaboureau et al., 2016]. Les prévisions à basse résolution ont prédit moins d'AOD en raison de vitesses de vent plus faibles, contrairement aux prévisions à haute résolution qui ont montré une plus grande variabilité et intensité de ces valeurs. L'étude a donc souligné l'importance des courants de densité pour l'émission de poussière, et donc de la résolution du modèle utilisé. Elle a mis en évi-

dence des défis dans la représentation des processus de convection dans les modèles atmosphériques et sur la prévision de l'intensité des panaches.

L'évaluation des erreurs des prévisions opérationnelles a aussi porté sur les variables d'irradiance solaire globale (GHI) pour des centrales solaires en Afrique de l'Ouest. [Clauzel et al. \[2024\]](#) examinaient les incertitudes de prévisions en lien avec les conditions météorologiques locales, en particulier les nuages et la présence de panaches de poussière. Trois jeux de prévisions, GFS (américaines), IFS (européennes), et SteadyMet (d'une société française Steadysun) ont été utilisés et ont montré un lien entre les erreurs de prévision de GHI et les caractéristiques météorologiques locales suivant les saisons. La première source d'erreur est la présence de nuages bas et opaques pendant la saison humide. Les événements de poussière jouent aussi un rôle mais un peu plus limité et surtout pendant la saison sèche.

6.3 Prévisions Saisonnières

La prévisibilité saisonnière des événements à fort impact, tels que les sécheresses, les fortes précipitations et les vagues de chaleur, ont constitué une partie de mes travaux notamment en Europe et en Afrique. Ces pas de temps nécessitent l'utilisation de simulations ensemblistes et le plus souvent multi-modèles afin de mieux couvrir les incertitudes et extraire les informations les plus robustes. Ainsi diverses méthodes d'alerte ont été testées en utilisant des techniques de post-traitement et des méthodes directes ou indirectes (par prédicteurs).

À l'échelle globale, l'évaluation des performances d'une méthode visant à fournir des alertes précoces sur les conditions de précipitations exceptionnellement humides et sèches a souligné la possibilité d'extraire des informations robustes même pour des échéances à long terme [[Lavaysse et al., 2020](#)]. Ces prévisions sont basées sur un indicateur construit en trois étapes. Les étapes sont illustrées Figure 6.2. La première est le calcul des valeurs de SPI prévues pour des périodes d'accumulation de 1, 3 et 6 mois pour tous les membres. Dans un second temps, des alertes précoces concernant les périodes de précipitations inhabituelles sont calculées lorsque les prévisions sont considérées comme fiables (c'est-à-dire avec au moins 40% des membres de l'ensemble associés à des prévisions intenses) et correspondent à des valeurs de SPI significatives (c'est-à-dire inférieures à -1 pour des conditions sèches ou supérieures à +1 pour des conditions humides). L'intensité des événements prévus est déterminée en fonction de l'indice EFI des SPI prévues. Finalement, différents niveaux d'alerte sont évalués en fonction de la période de retour de l'intensité prévue et de la cohérence des membres de l'ensemble de prévisions (voir Figure 6.2). L'évaluation des performances de ces indicateurs, déterminée à l'aide des hindcasts de 25 membres sur la période 1981–2016, montrent que des informations significatives et utiles sont fournies même pour les prévisions à long terme. Il a été noté un fort lien entre les scores obtenues et les impacts des grandes oscillations océaniques.

Des études similaires ont été menées pour des applications régionales, comme en Amérique du Sud où l'agriculture et l'élevage jouent un rôle majeur dans de

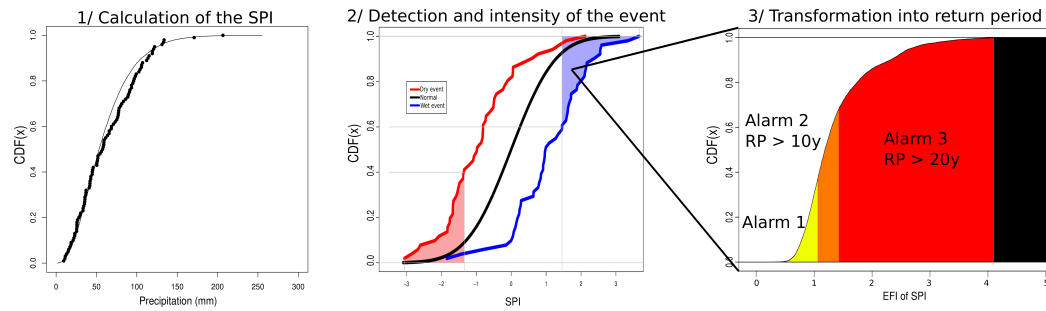


FIGURE 6.2 – Méthodologie pour la production des prévisions d’événements humides et secs. Dans un premier temps, le SPI est calculé, puis il est comparé aux courbes théoriques. Suivant des critères d’optimisation et de débiaisage, des seuils sont définis pour définir la prévision d’un événement. Lorsque ce seuil est dépassé, l’intégrale des queues de distribution est calculée et transformée en période de retour pour la dissémination d’une information compréhensible.

nombreuses économies locales. L’évaluation a porté sur les prévisions de SPI3 et 6 sur la période de 1981 à 2010. Il a été noté que la performance des prévisions dépendait de la saison, du lieu et de la période d’agrégation spécifique considérée. Les scores les plus importants sont principalement observés dans les régions présentant une forte variabilité intra-annuelle des précipitations, notamment à la fin des saisons sèches pour le SPI de 3 mois [Carrão et al., 2018]. En terme de variabilité spatiale le système de prévision est meilleur au nord de l’Amérique du Sud, le nord-est de l’Argentine, l’Uruguay, le sud du Brésil. Bien que les régions où les prévisions sont fiables soient similaires pour les SPI3 et -6. Elles sont réduites pour les catégories de sécheresse les plus sévères.

Sur le continent européen, dans Lavaysse et al. [2018a], nous avons étudié les performances des prévisions probabilistes des sécheresses pour le premier mois. Dans cette étude, il s’agissait aussi de regarder les prévisions de pluies standardisées. Dans cette étude, il a aussi été démontré l’intérêt d’utiliser ces prévisions d’événements de sécheresses, surtout lorsque ces dernières sont à grande échelle. Le grand intérêt de cette étude est surtout la proposition d’un indicateur binaire simplifié, issu des prévisions probabilistes afin d’émettre une alerte spécifique. Cet indicateur peut être réajusté en fonction des utilisateurs (et surtout de leurs sensibilités au misses et false alarms). Il a été montré que jusqu’à 40% des sécheresses sont correctement prévues un mois à l’avance.

Cette étude s’est prolongé avec une approche complémentaire, basée sur des prédicteurs atmosphériques liés aux régimes météorologiques sur l’atlantique. Les prédicteurs sont basés sur les anomalies d’occurrence mensuelle des régimes météorologiques, identifiées à l’aide d’un algorithme de clustering génétique [Lavaysse et al., 2018b]. Différents tests sont mis en place afin de mettre en évidence la qualité du lien entre les prédicteurs et le predictant (SPI-1), la prévisibilité et l’amélioration des prévisions via les prédicteurs (Figure 6.3). Les résultats montrent que la prévi-

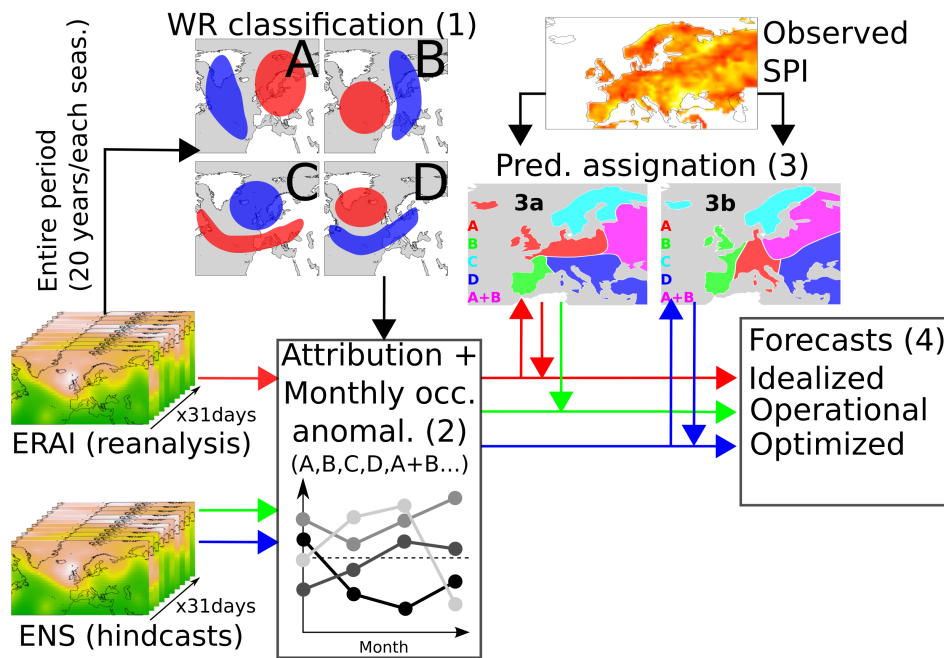


FIGURE 6.3 – Schéma de l'étude illustrant les différentes constructions d'expériences. Les régimes de temps sont définis par les réanalyses (1). Les attributions journalières sont projetées dans les réanalyses ou les prévisions (2). Enfin, les régimes de temps sont assignés à des SPI observés (3). On aboutit à un jeu de prévisions suivant les chemins suivis (4).

sion par les prédicteurs peuvent améliorer la prévision des sécheresses dans certaines régions. Malgré ces résultats encourageants, l'une des principales limitations de ces prévisions alternatives correspond à la bonne représentativité des liens entre les facteurs déclencheurs et les conséquences observées. Ainsi, les erreurs des modèles dans la prévision des sécheresses proviennent davantage d'une erreur dans la reproduction globale du régime météorologique qui entraîne ces impacts, que d'une erreur dans la connexion entre le facteur déclencheur et l'événement lui-même. L'ensemble de ces travaux ont été synthétisés dans un rapport stratégique destiné à la Commission européenne¹, visant à expliquer les possibilités et les incertitudes associées à ces simulations pour des décideurs.

Dans le cadre du financement IDEX PrediSAHLIM que j'ai obtenu en 2018, un ingénieur a été recruté dans le but d'évaluer la représentation et la prédictibilité de la dépression thermique dans les modèles saisonniers opérationnels (ECMWF et Météo France, [Ngoungue Langue et al. 2021](#)). Cette dépression thermique a de fortes interactions avec les températures et les précipitations en région Sahélienne, et pourrait potentiellement être un bon prédicteur pour la saison à venir. Pour ce faire, deux modèles de prévision saisonnière (SEAS5 et MF7 de respectivement ECMWF et Mé-

1. Lavaysse C. Early warning of drought in Europe. EU Policy report

téo France) ont été utilisés, confrontés aux réanalyses ERA5 et MERRA. Des biais, chaud pour MF7, froid pour SEAS5, ont été découverts mais efficacement corrigés par des outils statistiques (CDF-t et QMAP). Les modèles sont capables de représenter le cycle saisonnier moyen du SHL et de capturer certaines caractéristiques de sa variabilité interannuelle comme les tendances de réchauffement observées pendant les années 2010. Cependant, la bonne représentation de cette variabilité interannuelle reste un défi pour les modèles mêmes si les prévisions débiaisés mettent en évidence la capacité des modèles à représenter les plus fortes pulsations intrasaisonnières (les phases est-ouest) du SHL. Finalement les gains de prévision d'ensemble par rapport à la climatologie (comme le CRPS) restent relativement faible pour des échéances dépassant 1 mois.

6.4 Projections climatiques

En utilisant les données des modèles climatiques, nous avons examiné certaines évolutions des aléas pour des évolutions récentes (cas des tendances climatiques récentes) mais aussi travaillé avec les projections futures et différents scénarii.

Pour les évolutions récentes, l'analyse de l'activité du SHL a été réalisée en utilisant deux ensembles de réanalyses et des simulations du Projet d'Intercomparaison des Modèles Atmosphériques (AMIP) effectuées dans le cadre du 5ème exercice du Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés (CMIP5). Une forte augmentation locale de la température dans le Sahara pendant les années 90 a été observée dans les jeux de données [Lavaysse et al., 2015]. Cette augmentation est plus forte dans la région du SHL que dans les zones environnantes. En utilisant différents filtres temporels, nous avons mis en évidence une évolution des signaux hautes fréquences (inférieurs à 25 jours). Malgré une grande variabilité dans les tendances temporelles pour les 15 modèles climatiques du projet CMIP5, la tendance au réchauffement dans les années 90 est observée dans la moyenne des modèles. Néanmoins, de grandes disparités sont observées entre les réanalyses des modèles de prévision numérique du temps et les simulations des modèles climatiques concernant les évolutions spatiales et temporelles du SHL ainsi que son impact sur le climat ouest-africain. Ces comparaisons révèlent également que les modèles climatiques représentent les interactions de la mousson ouest-africaine avec les pulsations du SHL de manière assez différente Figure 6.4 et 6.5. Ces résultats montrent les grands défis qu'il reste pour bien représenter la mousson ouest africaine dans les modèles de climat. Ces défis sont clairement mis en évidence par les fortes divergences des modèles dans la région.

Gaetani et al. [2017] étudie l'influence opposée de la température de surface de la mer et des gaz à effet de serre sur l'évolution des précipitations en Afrique de l'Ouest dans les modèles climatiques. La faible qualité prédictive des modèles de climat dans cette région pourrait être due à la sensibilité des modèles climatiques à ces différentes forçages. Grâce à des simulations idéalisées en augmentant de 4K la SST ou en doublant la concentration de CO₂, des études de sensibilité montrent des réponses opposées dans la dynamique de mousson et des précipitations. Une réponse

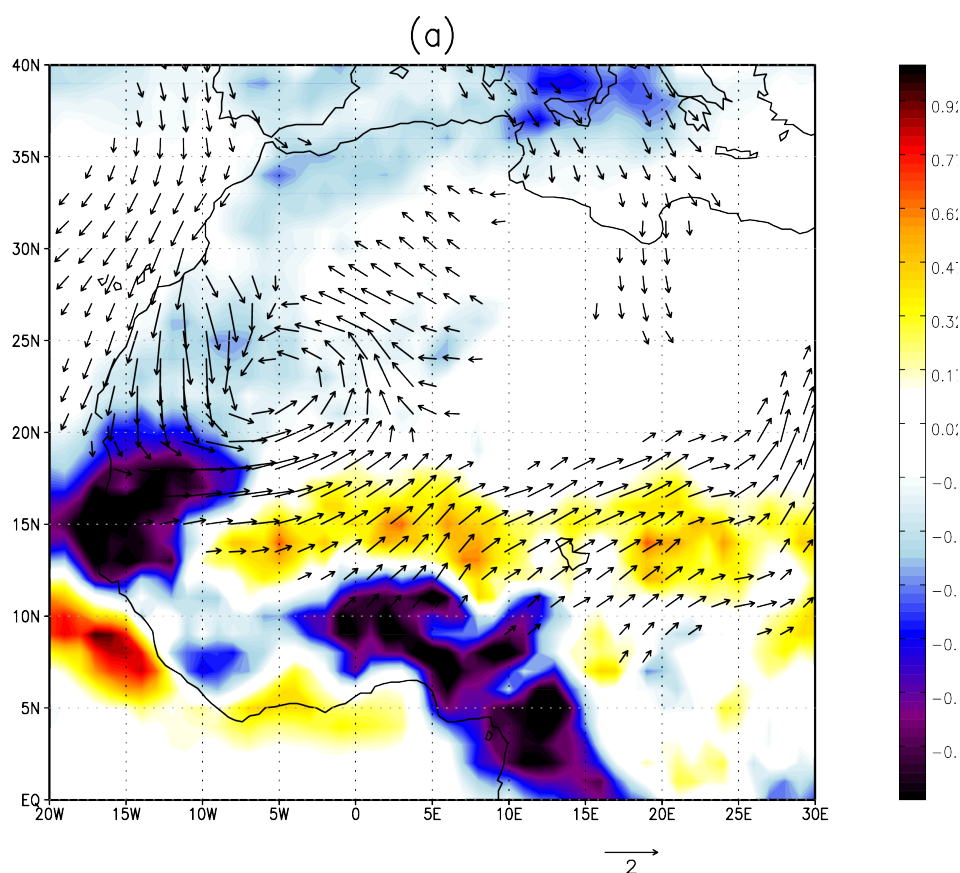


FIGURE 6.4 – Impact du changement climatique de la dépression thermique sur la mousson africaine et la convection. Issue de Lavaysse et al. 2015

sèche (-0,6 mm/jour) au réchauffement de la SST est simulée dans le Sahel alors que les simulations avec augmentation du CO₂ produisent des conditions humides (+0,5 mm/jour) dans le Sahel. Les réponses associées dans la dynamique atmosphérique sont également analysées, montrant que le réchauffement de la SST affecte les précipitations sahéliennes par des modifications dans la dynamique atmosphérique tropicale mondiale, tandis que l'augmentation du CO₂ renforce le couplage entre les précipitations et la dynamique régionale.

Enfin une attention particulière a été accordée aux efforts de descentes d'échelles des données issues des modèles climatiques aux échelles locales pour la température, le vent et les précipitations. Cette démarche a été motivée pour utiliser localement les sorties de modèles qui sont à des échelles trop grossières et à valider les données avec des données stations disponibles. Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet HYMEX dans le bassin méditerranéen, mais l'outil a été plus tard réutilisé dans beaucoup d'études où il était nécessaire soit de débiaiser des produits issus des modèles, soit de faire des descentes d'échelles. Dans Lavaysse et al. [2012a] une approche statistique appelée Cumulated Distribution Function transform (CDF-t) a

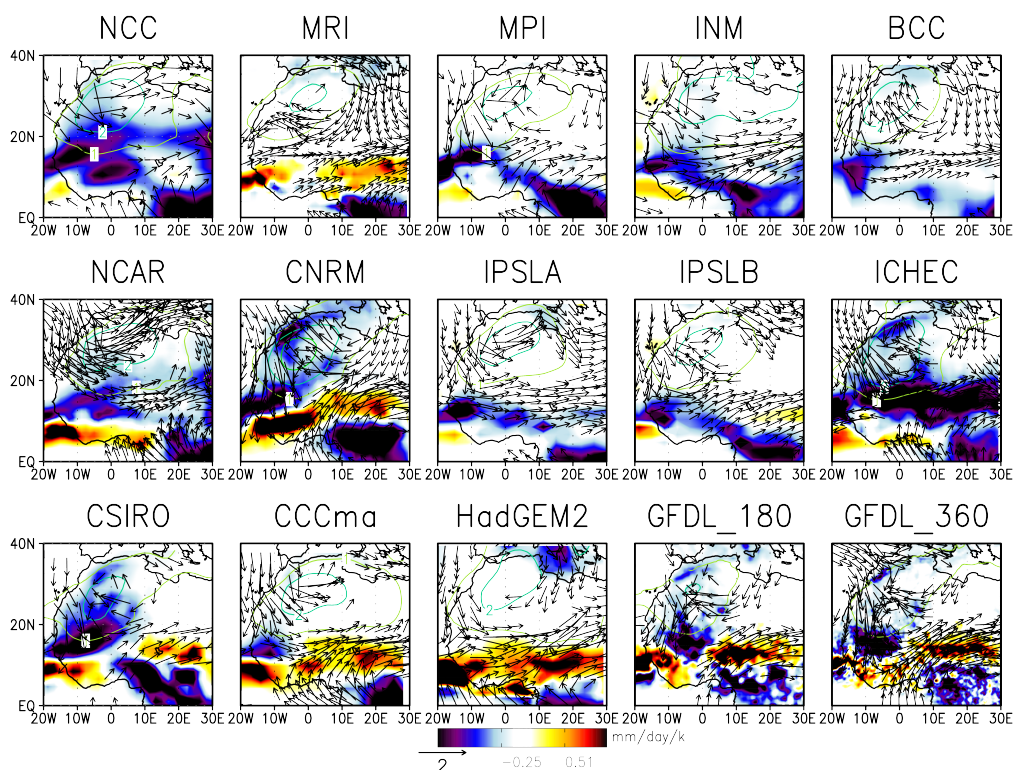


FIGURE 6.5 – Idem que Fig. 6.4 dans les modèle climatiques de CMIP5. Issue de Lavaysse et al. 2015

été validée pour les données de vent, température et précipitations dans huit stations météorologiques de la région méditerranéenne française. Les résultats ont montré une très bonne qualité de debiasage sur les données des modèles climatiques globaux et permettent de retrouver une distribution très proche de celle observée. En appliquant ces corrections aux projections climatiques, les tendances les plus marquantes sont observées pour la température, avec des augmentations à la fois de la médiane et des extrêmes. Les tendances pour la vitesse du vent et les précipitations sont plus faibles et moins certaines. Cette étude s'est poursuivie dans [Vrac et al. \[2012\]](#) où CDF-t est appliquée cette fois à trois modèles climatiques régionaux (ALADIN, LMDZ et WRF) pour évaluer l'incertitude dans la réduction d'échelle sur la vitesse du vent, la température et les précipitations pour des données stations. Le but est de quantifier le gain de passer par des RCMs lors de la descente d'échelles entre les données globales vers les données locales. Tout d'abord les trois RCM présentent des performances très similaires et apparaissent avec des scores meilleurs que ERA-40 pour les variables et CDF-t montre des résultats relativement bons pour tous les critères testés. En ce qui concerne la comparaison RCM vs. CDF-t (c'est à dire descente d'échelle dynamique ou statistique), les RCM tendent à améliorer les corrélations spatiales tandis que CDF-t ne modifie pas beaucoup la dépendance spatiale.

Par conséquent, si une étude spécifique se concentre sur la structure spatiale, les RCM doivent être privilégiés par rapport à CDF-t. En revanche, pour des études très locales, l'approche CDF-t est certainement plus adaptée que les RCM. Pour les résultats concernant les extrêmes simulés par les trois RCM pilotés par ERA-40 sont contrastés et dépendent de la variable étudiée, de la saison et du RCM lui-même. CDF-t montre plus de stabilité dans la reproduction correcte des propriétés statistiques des valeurs élevées (température, intensité du vent et précipitations).

Vers des outils d'aide à la décision

Contents

7.1 Secteurs agriculture et sécurité alimentaire	67
7.2 Secteurs réduction des risques et santé	69
7.3 Secteurs énergétique, économique et sociétal	70

L'objectif final de ces travaux est de contribuer au développement d'outils d'aide à la décision. Cela nécessite une compréhension approfondie des enjeux et des besoins spécifiques, la recherche et le développement de produits novateurs, robustes et compréhensibles, ainsi que le transfert de connaissances et d'outils vers des services opérationnels et des instituts de recherche partenaires. En collaboration avec des partenaires du monde académique, ces travaux fournissent un support technique et scientifique aux décideurs et aux pouvoirs publics, notamment dans l'élaboration de politiques environnementales et la prise de décisions lors de catastrophes naturelles. Ces travaux ont couvert plusieurs secteurs, que je vais présenter ici.

7.1 Secteurs agriculture et sécurité alimentaire

Au cours de la supervision de la thèse de Noreyni Fall au LAPAOSF (Dakar), nous avons mis en évidence les incertitudes liées à la détection ainsi que les impacts des périodes humides et sèches sur les rendements agricoles au Sénégal. Cette thèse a mis en lumière les défis posés par les événements météorologiques extrêmes au Sénégal, en particulier la variabilité accrue des précipitations depuis la fin de la grande sécheresse des années 80. Cette variabilité se traduit par des saisons hybrides, alternant entre fortes pluies et périodes de sécheresse, ayant un impact significatif sur l'agriculture et la sécurité alimentaire. L'analyse des données montre une augmentation des événements extrêmes depuis les années 2000, avec des sécheresses prolongées en début et fin de saison et des périodes de fortes pluies se produisant principalement en août et septembre. L'étude a utilisé une combinaison de données satellites et d'observations in situ pour détecter et caractériser ces événements météorologiques. L'impact de ces événements sur les rendements agricoles, et plus particulièrement du mil, a été examiné. Pour ce faire, un modèle de régression linéaire multiple via l'outil CST (développé au JRC) a été utilisé. Les résultats montrent que certains indicateurs de ces périodes intenses sèches et humides ont un impact sur les rendements du mil. En les intégrant au système de prévision opérationnel qui utilisait uniquement la précipitation et les indicateurs de végétation (NDVI, FAPAR), ces

nouveaux indicateurs d'aléas apportent un réel gain. Bien que les indicateurs de végétation sont très liées aux précipitation [Martiny et al., 2006], aucune information n'était capable de renseigner sur le type de précipitation. Ainsi, le nouveau modèle était capable d'expliquer plus de 80% de la variabilité des rendements, offrant ainsi une possibilité de proposer des outils d'alerte précoces pour les pénuries alimentaires. Ainsi, la capacité de prédiction, qui a aussi été testée, s'est montrée particulièrement bonne et fiable dans plusieurs régions importantes plusieurs semaines avant la fin de la saison Fall et al. [2022]. En parallèle à cette étude, la vulnérabilité des périodes sèches et humides a été créée à partir des résultats obtenues, identifiant le bassin arachidier comme une zone à haut risque. La base de données des aléas secs et humides développés au cours de cette thèse alimentent également les données du projet STEWARD.

Dans le cadre du programme GMES&Africa, ma responsabilité consistait à proposer des outils et des produits issus des observations satellites répondant aux besoins des partenaires africains surtout pour le secteur de l'agriculture et la sécurité alimentaire. Dans ce cadre, je coordonnais le développement des produits aux JRC, m'assurant de leur validation et leur fiabilité. Il s'agissait en outre de proposer des espaces de travail de la eStation (outil de visualisation des produits pour des utilisateurs finaux) pour répondre à des questions spécifiques des utilisateurs avec la création de cartes et graphiques des variables et indicateurs sélectionnés. Les indices de végétation et des anomalies spécifiques (NDVI, fAPAR, LAI, DMP ou FCOVER) pour identifier des événements ayant des impacts sur les rendements agricoles et sur l'état de la végétation ont été largement exploités. Il s'agissait d'adapter ces indicateurs pour répondre aux spécificités des climats tropicaux des plateformes SPOT et MODIS. D'importants efforts ont aussi porté sur la faisabilité d'utiliser les nouveaux produits à plus haute résolution de Sentinel 3. Il s'agissait de trouver et valider une référence climatique issue d'une autre plateforme pour calculer les anomalies de ce nouveau produit.

D'autre part, une analyse comparative de quatre produits d'estimations de précipitations basées sur des données satellites a été réalisée à l'aide de différentes mesures et méthodologies. L'objectif était d'évaluer l'accord entre ces produits, ainsi que leur capacité à prédire ou à décrire les comportements passés et présents des précipitations. Les tests statistiques ont montré que trois des produits testés (TAMSAT, FEWSNET et ARC2) étaient en accord remarquable avec CHIRPS, utilisé comme référence. L'analyse a également révélé une bonne concordance dans les distributions des tendances futures des précipitations, en particulier pour FEWSNET et ARC2. Cette collaboration étroite avec les instituts de recherche du Sud a conduit au développement d'un outil statistique permettant l'évaluation des incertitudes associées aux différentes plateformes de données satellites Cappucci et al. [2024].

Grâce à de tels programmes, notamment grâce aux comités de pilotage et aux forums, il a été possible de rencontrer l'ensemble des acteurs du monde académique, décisionnel et opérationnel. Cela offre une vision complète et précise des enjeux sociaux et défis scientifiques pour un secteur spécifique. Cela permet en outre d'estimer la valeur ajoutée du programme. Ainsi, une évaluation détaillée a été faite

de l'utilisation de la eStation et du programme par les partenaires locaux dans un contexte opérationnel. La valeur ajoutée des produits, les points forts et faibles de la station, ainsi que les usages qui en sont faits ont été mis en évidence [Lavaysse et al. \[2021\]](#). Les fortes demandes auxquelles le programme a répondu sont les fonctionnalités adaptées du logiciel et ses bases de données pertinentes. Des lacunes subsistent, notamment en ce qui concerne la connectivité et les problèmes techniques qui peuvent entraver le fonctionnement optimal du logiciel. L'étude identifie des domaines d'amélioration pour les services basés sur les observations de la terre, comme par exemple une meilleure communication entre les bénéficiaires et les utilisateurs, la formation et l'inclusion de nouveaux types de données. L'enquête révèle des informations précieuses sur les besoins et attentes des partenaires, soulignant l'importance de maintenir un dialogue ouvert pour le développement de services climatiques efficaces.

Dans le programme Copernicus EMS, une partie des activités visait à proposer un examen détaillé du risque associé de sécheresse en Europe et dans le monde. Un rapport a été produit ([Van Lanen et al. 2016](#)) pour que d'abord les décideurs aient conscience des différents types de sécheresses (météorologique, d'humidité du sol et hydrologique). La sécheresse en tant que danger naturel doit également être distinguée de l'aridité ou de la rareté de l'eau induite par l'homme à cause d'une surconsommation. Il est aussi important de bien faire comprendre les enjeux autour des sécheresses déclenchées par la variabilité climatique, les impacts à l'échelle d'un bassin versant et des vulnérabilités des sociétés. D'autre part, dans cette étude, la vulnérabilité à la sécheresse à travers l'Europe a été évaluée grâce à l'analyse de la capacité d'adaptation ou à un ensemble de facteurs économiques, sociaux et d'infrastructures. Cela a conduit à une estimation d'une superficie légèrement supérieure à 20% avec une vulnérabilité élevée à très élevée dans toute l'Europe, abritant environ 37% de la population européenne.

Ces travaux ce sont poursuivi dans [Vogt et al. \[2017\]](#) où les indices des aléas ont été discutés. L'Observatoire Européen de la Sécheresse (EDO) a été développé en réponse au besoin de mieux comprendre, surveiller et prévoir les phénomènes inter connectés de la pénurie d'eau et de la sécheresse en Europe et de fournir des éléments, pour l'élaboration de politiques fondées sur des données probantes dans ce domaine.

7.2 Secteurs réduction des risques et santé

Comme il a été montré précédemment, le programme Copernicus a permis d'opérationnaliser plusieurs indices pour la détection, la caractérisation et la prévision d'aléas, en particulier les vagues de chaleur, les fortes précipitations et les sécheresses. En outre, ces produits sont des entrées pour les travaux sur l'estimation des risques humains. Ils ont été utilisés dans les produits du DRMKC¹ (Disaster Risk Management Knowledge Centre) du JRC. il s'agit de fournir des analyses et des

1. <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/>

outils pour aider les décideurs, les gestionnaires de crises et les acteurs de la société civile à mieux comprendre et à gérer les risques notamment des aléas naturels. Au sein de l'équipe, il s'agissait de rassembler des données, des rapports, des cartes et des informations sur les risques de catastrophe, afin de soutenir une gestion plus efficace des situations d'urgence et des crises. Les données de sécheresses et de vagues de chaleurs sont partagées avec ce projet afin de prendre en compte ces aléas dans leurs diagnostics.

Dans l'ANR STEWARD les événements météorologiques à fort impact tels que les pluies intenses, les sécheresses, les vagues de chaleur et les tempêtes de poussière à Dakar et Abidjan sont étudiés. L'objectif est de proposer et développer, en collaboration avec des partenaires locaux, des outils d'aide à la décision pour l'alerte précoce opérationnelle des risques pour les populations. Les indicateurs de détection et de prévision des aléas ont été développés et validés (WP2). D'autre part des études épidémiologies et des enquêtes terrains sont mis en place (WP1) dans les deux villes principalement étudiées (Abidjan et Dakar) pour estimer les impacts sur les populations et pour mieux identifier la sensibilité des populations à ces événements. À partir de mai 2024, un postdoc va débiter ses recherches sur le lien entre les aléas et les impacts dans ces villes (WP3). Le but étant de proposer des seuils spécifique de dangerosité des populations, d'estimer l'impact de la présence de plusieurs aléas simultanément. Les deux ultimes objectifs seront de développer des outils statistiques de prévisions des risques associés à ces aléas (pris collectivement), et de transférer les résultats et les outils, fruits de ces recherches, aux partenaires.

Au cours de mon expérience au JRC et plus particulièrement dans le projet ClimSA, mes activités se sont concentrées sur l'identification des besoins en données climatiques dans le domaine de la réduction des risques et sur les impacts des aléas. Dans ce cadre, avec les partenaires des différentes régions, un portfolio de données pour le service climatique a été co-construit. Le but était de tester et de valider l'utilisation de ces produits de détection et prévision pendant les COF régionaux. Pendant ces réunions annuelles, des groupes de travail visant à co-produire des services climatiques et des avis étaient organisées. Une occasion était donner de croiser des informations sur les impacts observées et les indices construits des observations et des prévisions. Une partie de ces forums portaient donc sur la validation et un retour d'expérience de la saison passée. En partageant les informations des aléas, issues des recherches et les impacts constatés par les partenaires, il s'agissait de proposer des améliorations aux produits développés. Même si l'aspect de diminution des risques était primordial, d'autres domaines tels que l'agriculture, le pastoralisme, la biodiversité et l'énergie étaient également abordés.

7.3 Secteurs énergétique, économique et sociétal

J'ai consacré une partie de mes recherches au secteur de l'énergie. J'ai ainsi contribué à des études visant à améliorer la compréhension et la prévisibilité de la variabilité de la nébulosité, des aérosols et du vent afin de mieux appréhender les

incertitudes des productions photo-voltaïques et éoliennes pour la période actuelle et les projections climatiques.

En utilisant les estimations horaires de la vitesse du vent de ERA5, [Seyedhshemi et al. \[2021\]](#) a examiné la variabilité temporelle du potentiel éolien local à travers l’Afrique sur la période 2000-2017. Les résultats ont indiqué que les exigences de conception des systèmes éoliens sont, en moyenne, remplies dans les régions du Nord, du Sud et de la Corne de l’Afrique à différentes échelles de temps. Cependant, il a été démontré que les périodes de faible ressource ont un impact significatif sur la fiabilité du potentiel éolien dans la majorité du continent. La flexibilité de la demande peut réduire la gravité de ces périodes et aider à atteindre les exigences de conception. En outre il s’agit de proposer une autre production d’énergie renouvelable complémentaire à l’éolien.

En effet l’énergie éolienne est sans nul doute la première source d’énergies renouvelable sur le continent. Même si les ressources sont importantes, il a été noté la grande difficulté de prédire précisément la production énergétique de cette ressource. La raison est la faible prédictibilité des nuages et des aérosols dans la région due à notre manque de connaissances de ces modes de variabilités et des processus associés.

[Danso et al. \[2019\]](#) a analysé et documenté l’occurrence et la variabilité des types de couverture nuageuse en Afrique de l’Ouest. Ce travail s’inscrit dans une volonté de mieux estimer l’impact des nuages sur le rayonnement. Les investigations sont donc menées avec un enregistrement horaire de 10 ans de deux produits de données sur les nuages. Pour cela, les différents couverts nuageux en fonction de leurs altitudes (souvent un proxy à leurs opacités) sont décomposés. Il a été souligné le bon accord entre les observations satellites de CERES et la réanalyse ERA5. Cependant, il existe un défi à détecter les nuages optiquement minces dans l’atmosphère. Dans la région Sahélienne et Saharienne, il a été noté un fort défi de distinguer les nuages bas de panaches denses d’aérosols dans les produits d’observation.

Dans la continuité de cette étude pour la prolonger sur les aspects de prévision, [Clauzel et al. \[2024\]](#) ont examiné les sources d’incertitudes des prévisions irradiance horizontale globale pour les centrales solaires de Zagtouli (Burkina-Faso) et de Socim (Sénégal) en relation avec les conditions météorologiques rencontrées. Pour cela, trois produits de prévision opérationnelle de GHI ont été testés, issue du modèle Américain GFS (NCEP), européen (IFS, ECMWF), et un modèle statistique développé par une société partenaire de la thèse (SM, Steadysun). L’analyse révèle une relation significative entre les erreurs de prévision de GHI et, principalement, les présences de nuages. Les événements de poussière influencent mais dans un degré moindre ces erreurs. Leur impact est surtout souligné pendant la saison sèche lorsque les concentrations enregistrées au dessus des centrales solaires sont les plus importantes.

A des échelles climatiques, les modèles CMIP6 ont été utilisés pour étudier les projections futures de la génération d’énergie solaire [[Danso et al., 2022](#)]. On observe, à partir de l’étude de plusieurs sorties de modèles, une diminution d’environ 10%

du potentiel de production photovoltaïque solaire dans toute l'Afrique de l'Ouest au cours du 21^e siècle. Cette tendance s'ajoute à la variabilité spatio-temporelle de la production future d'énergie solaire photovoltaïque, avec notamment une fréquence plus élevée de périodes de production plus faible. La diminution du potentiel de production d'énergie solaire photovoltaïque serait principalement due à l'augmentation du couvert nuageux et à une augmentation de la température de l'air en surface.

Actuellement, en collaboration avec des collègues américains, sénégalais et de l'International Food Policy Research Institute (IFPRI), nous travaillons à une meilleure estimation de l'impact des chocs climatiques sur les ressources économiques au sein de foyers maliens. Ce travail s'effectue en croisant les indicateurs d'aléas climatiques (sécheresses et violentes précipitations) avec une vaste enquête socio-économique réalisée par les Nations Unies au Mali au cours des dernières années ou un échantillon de 3 080 ménages dans 90 communes couvrant 5 régions a été constitué (Mueller et al. TBS). Les programmes "Safety nets" soutenus par la Banque Mondiale, tels que les aides financières régulières, offrent une réponse prometteuse pour promouvoir la résilience des foyers et plus particulièrement des femmes aux chocs notamment liés aux catastrophes naturelles. Cependant, l'efficacité de ces programmes peut varier en fonction de facteurs tels que la conception des transferts, le type de choc et le contexte. Cette recherche étudie l'impact de ces aides sur l'atténuation de la consommation et la propriété d'actifs des familles, en mettant particulièrement l'accent sur les actifs des femmes, et à évaluer les avantages indirects pour les décideurs féminins au sein des ménages dans le sud du Mali. Il a été montré que les ménages bénéficiaires sont capables de lisser leur consommation lorsqu'ils font face aux fortes pluies et inondations, mais cela se fait au détriment de leurs économies et de leurs contributions aux plans d'investissement communautaires. Pendant ces périodes, les ménages investissent davantage dans les actifs détenus conjointement, en particulier dans le bétail, au détriment des actifs exclusivement détenus par les femmes. Ainsi les résultats suggèrent que l'efficacité des programmes d'aides financiers directs dans la promotion du bien-être des femmes et la résilience des ménages peut être améliorée. Il s'agit notamment d'anticiper pour déclencher les versements au plus vite et de cibler les ménages les plus vulnérables.

Troisième partie

Projet de recherche et mise en
oeuvre

Projet de recherche

Contents

8.1	Un projet transposable	75
8.2	Études des événements et de leur predictibilité	76
8.3	Applications et soutien à la prise de décision	80

Le projet de recherche vise à renforcer la compréhension, la représentation et l'anticipation des risques inhérents aux aléas météorologiques et climatiques en Afrique de l'Ouest pour différents secteurs. Il est articulé autour de deux volets. Le premier se focalise sur l'étude des aléas atmosphériques et climatiques ainsi que sur leur prévisibilité, tandis que le deuxième volet explore les conséquences et les risques associés à ces phénomènes. En collaboration avec des partenaires des pays du sud, notamment au Sénégal et en Côte d'Ivoire, des applications concrètes ont déjà été identifiées afin d'améliorer la résilience des populations ou de soutenir des secteurs spécifiques face aux risques climatiques. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel de développer des indices adaptés et des outils statistiques afin de fournir des aides à la décision accessibles aux non-spécialistes et décideurs. Cette démarche nécessite une étroite collaboration avec les partenaires académiques, fondée sur une co-construction du projet en prenant en compte les besoins, la conception et l'évaluation des outils, ainsi que le transfert de compétences à travers des formations et des échanges technologiques.

8.1 Un projet transposable

Il convient de souligner l'importance du côté transposable, dans d'autres secteurs et régions, de la méthodologie du projet basée sur l'exploration d'application des résultats et des méthodologies développées. Par exemple, le projet STEWARD se concentre actuellement sur le domaine de la santé dans deux grandes villes. Des travaux portent aussi sur l'amélioration de la prévisibilité des ressources solaires et plus particulièrement les impacts directs et indirects des aérosols (thèse de Léo Clauzel). Cette approche peut être adaptée afin de développer des projets communs visant à renforcer la résilience des aires protégées et de la biodiversité face aux défis posés par le changement climatique et le renforcement des aléas (discussion en cours avec le CSE de Dakar). Cette approche pourrait aussi être étendue à la prévision des risques épidémiologiques, tels que ceux associés aux épidémies de méningite. En effet, des études antérieures ont démontré une corrélation entre un environnement

sec et la présence de poussière avec les pics de méningite [Martiny and Chiapello, 2013]. En revanche, l'arrivée de l'humidité en début de saison des pluies marque la fin de la saison de méningite. Les recherches antérieures sur la prévision saisonnière de la charge en aérosol et les prévisions des caractéristiques de la mousson pourraient ainsi fournir des informations pertinentes pour l'alerte précoce des saisons à risque élevé d'épidémies. Ces informations pourraient être précieuses pour les organisations non gouvernementales et les décideurs.

8.2 Études des événements et de leur predictibilité

Sur les plans de la physique atmosphérique, météorologique et climatique, il est impératif de procéder à une meilleure identification et une compréhension accrues des facteurs déclencheurs et des prédicteurs des principaux aléas météorologiques. Malgré les progrès réalisés, de nombreuses questions persistent quant à leurs origines et au processus conduisant à leur intensification, ce qui compromet leur prévisibilité. L'amélioration de la résolution et de la quantité des modèles, telles que les systèmes ensemblistes, la meilleure prise en compte des aérosols, ainsi que l'accès aux données de plus en plus complexes, telles que les nouveaux satellites de la constellation COPERNICUS, offrent de nouvelles perspectives de recherche avec des moyens plus importants.

Il sera aussi nécessaire d'élargir l'horizon de prévisibilité des aléas. Les périodes de rupture où le signal de prévision change brutalement, sont des périodes qui demandent à mieux être définies et comprises. Dans le passé, j'ai montré que les prévisions étendues pouvaient passer d'une prévision d'un épisode normal à violent en peu de temps pour des raisons encore inexplicées. Comme l'illustre le cas de la vague de chaleur sur l'Europe de 2003 (Figure 8.1). Une meilleure identification de ces périodes de ruptures améliorera l'estimation de l'incertitude et pourra peut être augmenter l'horizon de prévision.

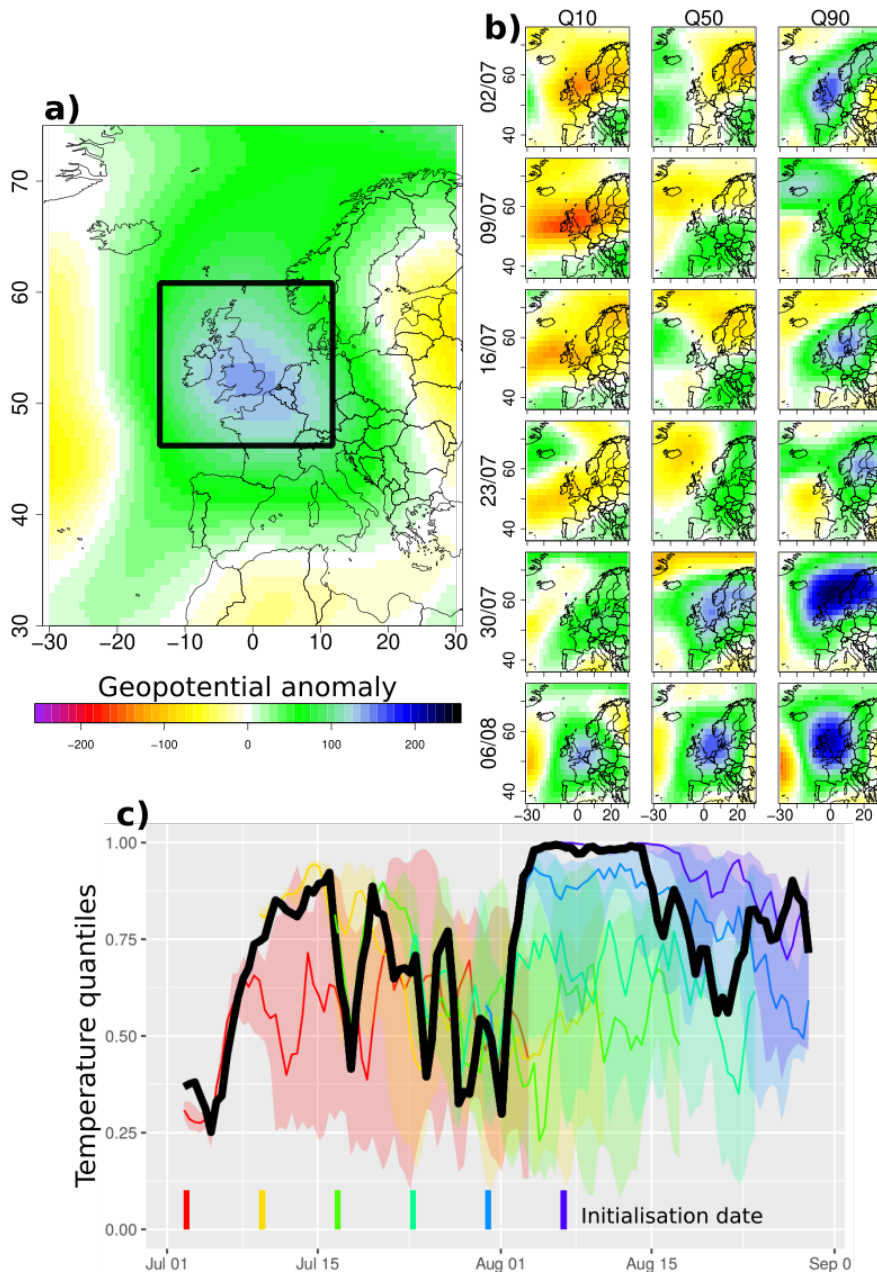


FIGURE 8.1 – Anomalie de géopotential (en m), calculée en utilisant ERA5 pendant le coeur de la période de vague de chaleur en Europe (4 août - 14 août 2003, le rectangle noir indique la zone cible pour la hiérarchisation des prévisions (panel a). b) Anomalie de géopotential prévue pour cette même période par la prévision ensembliste étendue de ECMWF. Les prévisions sont hiérarchisées par la moyenne des géopotential sur la zone cible, et les quantiles 10, 50 et 90 sont présentés (colonne) pour des initialisation de chaque semaine, du 2 juillet au 6 août 2003 (lignes). c) Évolution temporelle des quantiles moyens de température en Europe de l'Ouest pour chaque jour du 1er juillet au 25 août 2003 (noir), les prévisions pour chaque initiation sont présentées par des couleurs différentes avec la médiane (ligne foncée) et les maximas (en zone colorée).

Il s'agira ensuite de poursuivre la caractérisation des systèmes synoptiques et ondulatoires atmosphériques. Des études approfondies sur l'utilisation de certains modes ondulatoires, tels que les ondes d'Est, le phénomène de Madden-Julian et les ondes équatoriales de Rossby, ainsi que sur les modes de variabilité liés aux anomalies de la température de surface de la mer pourraient offrir des prévisions plus précises que les méthodes conventionnelles. De plus, l'adoption de nouveaux outils, notamment le couplage du machine learning à des capacités de calcul avancées, permettra de développer des techniques d'extraction et d'optimisation de l'information issues des modèles de prévision ensemblistes. En effet, ces prévisions contiennent une quantité importante de données qu'il est difficile d'analyser et de traiter pour en extraire la meilleure information. Cette difficulté est due à la quantité de données à traiter ainsi qu'aux variations spatiales et temporelles des optimisations. Pour répondre à ces défis, une approche consisterait à automatiser la méthode d'optimisation en mettant à profit de puissants outils statistiques de classification. Parallèlement, une meilleure identification des régimes de temps et des prédicteurs, résultant d'une meilleure compréhension de l'origine des événements violents, contribuera également à renforcer les prévisions.

Une attention particulière sera portée sur les interactions entre les différents aléas violents. D'une part car les événements peuvent s'alimenter et se renforcer, comme la présence de certains panaches d'aérosols (composés des particules les plus fines) pendant les vagues de chaleur entre mars et juin au Sahel, qui tendent à intensifier ces vagues. [Niane et al., 2023]. D'autre part cette concomitance peut modifier la vulnérabilité des populations et donc les impacts. Dans le cas d'une vague de chaleur avec des aérosols, les maladies cardio-vasculaires sont plus nombreuses [Khraishah et al., 2022]. Il est donc nécessaire d'anticiper les situations où plusieurs événements extrêmes se produisent simultanément ou de manière consécutive et de mieux comprendre les phénomènes de causalité entre aléas. Ce type d'analyse requiert des études de sensibilité avec les modèles numériques pour mieux estimer le rôle et l'importance des conditions environnantes.

Pour comparer les données issues de modèles à des observations locales, il sera toujours indispensable de travailler et d'améliorer les opérations de descente d'échelle. Il sera également essentiel d'identifier de manière précise les échelles spatiales et temporelles auxquelles il convient de descendre. En ce qui concerne les précipitations les plus intenses, les bases de données fournissent des résultats différents en fonction des résolutions requises. Pour ce qui est des vagues de chaleur, il peut parfois être nécessaire de disposer d'une série de variables au moment où la température atteint son maximum quotidien, ce qui n'est pas nécessairement disponible. La question se pose également en ce qui concerne les îlots de chaleur urbains, où les températures enregistrées localement sont plus élevées que celles fournies par des modèles avec une résolution grossière. Est-il nécessaire de descendre à une échelle plus fine pour prendre en compte ces facteurs ? Cette question ne se posera pas si les méthodes de correction des biais, n'affectant pas la temporalité des événements, sont suffisantes. L'utilisation des zones climatiques locales est

plus précise mais il existe beaucoup d'incertitudes généralement issues de produits globaux, comme le montre la Figure 8.2.

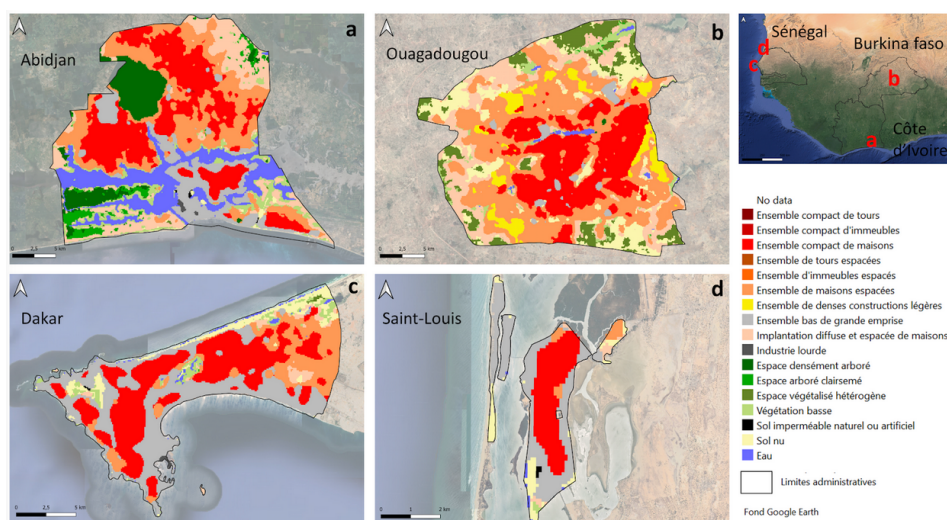


FIGURE 8.2 – Zones climatiques locales pour quatre villes Ouest Africaines (Abidjan, Dakar, Ouagadougou et Saint Louis), selon WUadapt. Les couleurs indiquent les différents types de bâtis

Enfin, les problématiques liées au changement climatique dans les études des événements météorologiques violents et de leurs anticipations revêt une importance majeure en Afrique de l'Ouest. En effet, la région a observé de très fortes tendances dans la période actuelle [Panthou et al., 2014] et les projections de ces événements, les tendances restent très imprécises [Danso et al., 2019].

Intégrer les changements climatiques dans les modèles de prévision des risques présente des défis, notamment en ce qui concerne les changements de références et les variations des conditions environnementales. L'un des défis majeurs est de maintenir la pertinence des références utilisées dans les modèles de prévision, alors que les conditions climatiques évoluent. Les données historiques peuvent devenir obsolètes à mesure que le climat change, il est donc nécessaire d'adapter ces références pour refléter les conditions climatiques actuelles et futures de manière précise. Une priorité immédiate réside dans la construction d'indices de référence adaptés aux conditions climatiques changeantes. Ces travaux s'inscrivent aussi dans l'estimation des risques futurs, leur intensification ou leurs nouvelles interactions.

De plus, il est important d'intégrer les projections climatiques futures dans les modèles de prévision des risques. Cela pourra permettre de comprendre comment les événements météorologiques violents pourraient évoluer dans un climat changeant. Si des prévisions de risques doivent être quantifiées, les impacts ou les vulnérabilités devront se baser sur des scénarios socio-économiques et d'importantes incertitudes devront être prises en charge.

8.3 Applications et soutien à la prise de décision

Le finalité de ce programme n'est pas de mettre en place un système opérationnel mais consistera à supporter des services existants, particulièrement ceux développés par les partenaires du Sud. Cette contribution se manifeste par le transfert d'outils et d'indicateurs identifiés comme impactant, accompagnés de formations, de conseils et d'une démarche continue d'amélioration basée sur les retours d'expérience. Il s'agira ici de développer, valider et transférer des prévisions directement basées sur les impacts pour différents secteurs.

Pour ce faire, les observations des impacts sont essentielles. Dans ce programme, il sera donc nécessaire de contribuer à la collecte et à la validation de bases de données novatrices (voir Chapitre 9). Elles sont nécessaires afin d'alimenter les modèles statistiques liant aléas et impacts. La complexité des relations entre aléas et impacts requiert une collecte massive et précise d'informations pour permettre aux outils statistiques de fournir des résultats probants. Dans un premier temps, les données épidémiologiques doivent être complétées par des informations sociologiques et géographiques détaillées, comme cela a été initiée dans le cadre des projets Alerte aux Canicules Au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé (ACASIS) [Sy et al., 2022], CADDIWA et STEWARD.

Il est établi que l'impact des événements est souvent exacerbé lorsque plusieurs aléas se produisent simultanément ou successivement. Il sera utile de mettre en place des outils statistiques sophistiqués, notamment en utilisant les techniques d'apprentissage automatique, pour établir des liens, sans doutes non linéaires, entre plusieurs aléas et les impacts en croisant les indices portants sur les aléas et les impacts du secteur. Ce travail, d'une importance capitale dans le cadre de programmes tels que STEWARD, nécessite une grande qualité et une profondeur suffisante de données pour obtenir des résultats significatifs. Une autre approche se base sur la prise en compte de l'exposition et la vulnérabilité des populations (ou du secteur) pour estimer l'impact potentiel. Cependant, cette alternative est tout aussi complexe car elle nécessite d'estimer la vulnérabilité. Or, cette dernière ne peut généralement qu'être déduite qu'à partir de proxis. Ainsi dans le domaine de la vulnérabilité des populations, les indices prennent généralement en compte les mesures d'atténuations, des analyses socio-économiques, démographiques, des analyses des infrastructures, des mesures d'inégalités, de pauvreté [Birkmann et al., 2022]. Cela est d'autant plus complexe qu'il nécessite ce travail pour chaque aléas, combinaison d'aléas et pour chaque secteur [Herslund et al., 2016, Ayodotun et al., 2019, Jean-Baptiste et al., 2013, 2011]. Le but sera donc aussi de voir si l'approche en 'impact based forecasts', précédemment décrite, est mieux adaptée qu'à une approche par la vulnérabilité, et d'estimer les incertitudes de chaque méthode.

Dans l'établissement de modèles statistiques de risque, un défi majeur sera de prendre en compte l'adaptation des populations après un événement. Il a été observé lors d'études précédentes, qu'un précédent événement impactant influence la gestion du risque par notamment une modifications des actions prises. Ces

dernières modifient la vulnérabilité et donc les potentiels impacts lors du passage d'un nouvel événement violent de même intensité. Par exemple, ce type d'adaptation s'est produit en France après la vague de chaleur de 2003 [Fouillet et al., 2008]. Une approche de 'vulnérabilité dynamique' [de Ruiter and van Loon, 2022] est potentiellement une solution en prenant en compte ce type de comportement. Dans ce programme, il s'agira alors de savoir s'il est possible de paramétrer dans le modèle statistique un aspect dynamique identique.

L'objectif final sera donc d'appuyer les plateformes existantes proposées par nos partenaires, ou de contribuer à améliorer nos connaissances pour des applications sectorielles importantes. Par exemple, ACMAD fournit des prévisions sur les aléas. Le projet travaillera avec ces partenaires pour les soutenir en affinant les seuils de détection des événements impactant, à la fois pour les aléas isolés mais aussi combinés à d'autres. Il est également crucial de leur fournir des outils pour évaluer les prévisions de risque en fonction de l'exposition des populations et de l'intensité des événements. Ce transfert ne se limitera pas à un transfert technique, mais aussi de connaissance.

Le projet ANR NETWAT (2023-2026), dans lequel je suis également impliqué pour les trois prochaines années, vise à optimiser la production d'énergie photovoltaïque en Afrique de l'Ouest tout en garantissant la durabilité de la gestion des ressources en eau. En se concentrant sur l'impact de la poussière minérale sur l'irradiance solaire et les panneaux solaires, ces travaux visent à développer des solutions pour répondre aux défis de la transition énergétique dans la région. Les objectifs du projet incluent l'amélioration de la compréhension du cycle de la poussière en Afrique de l'Ouest, le développement de prévisions de production solaire fiables, la création d'outils de prise de décision efficaces pour optimiser la gestion des réseaux électriques et la bonne gestion des ressources hydriques pour nettoyer les panneaux. Pour cela, le projet bénéficie de partenariats existant avec des acteurs régionaux et internationaux, ainsi que d'une collaboration interdisciplinaire pour relever ces défis complexes. Les travaux de thèse de Léo Clauzel s'inscrivent dans ce programme.

Le programme TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques (TRACCS), sélectionné dans le cadre de l'appel à projets pour des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), s'inscrit dans une initiative visant à consolider des domaines scientifiques stratégiques pour les transformations notamment sociales et environnementales en cours. Financé pour la période 2023-2030, ce programme comprend dix projets spécifiques. Je compte particulièrement m'impliquer dans les projets PC-1 (dialogue et co-design avec les usagers), PC-3 (développement de démonstrateurs) et PC-4 (événements extrêmes).

Des formations sur le développement de ces indices (transfert technologique et scientifique) auprès des centres de recherche doivent être mises en place. Cela permettra de proposer des solutions pour les chercheurs sur l'amélioration des outils et leurs appropriations. Des formations à l'usage de ces produits doivent aussi être implémentés. Ces échanges favorisent, en retour, la bonne utilisation de ces outils et la collecte d'avis en vue d'apporter des améliorations futures. Il s'agira ensuite

d'avoir une réflexion sur une communication efficace de la prévision des risques naturels pour garantir une compréhension adéquate et quelle génère des actions appropriées de la part du public et des décideurs. Pour ce faire, il est d'abord essentiel d'adopter des approches qui rendent l'information accessible, claire et pertinente en informant de manière transparente sur les fiabilités, les limites, les incertitudes et les forces des indices proposées. Les modèles météorologiques et climatiques comportent inévitablement des degrés d'incertitude variables suivant les échéances et les objets de prévision, et il est important de les reconnaître et de les communiquer de manière appropriée. En outre, il est essentiel d'établir des canaux de communication bidirectionnels pour permettre un échange continu d'informations entre les scientifiques et les autorités/décideurs. Cela favorise la confiance, encourage la collaboration et permet d'adapter les stratégies de communication en fonction des besoins et des retours d'expérience. Les efforts pour mieux estimer la sensibilité à ces messages auprès des spécialistes et des usagers finaux pourront être corroborés via des campagnes d'enquêtes ou via l'utilisation de jeux sérieux (collaboration avec I. Ruin de HMCIS). Ce travail doit être mené en étroite collaboration avec les services météorologiques nationaux, tels que l'ANACIM au Sénégal et la SODEXAM en Côte d'Ivoire, afin de garantir une compréhension adéquate et une action appropriée de la part du public et des décideurs.

En outre, il est important de contribuer à des études de prévisions des risques aux échéance sub-saisonnières et saisonnières (S2S) et de travailler à différentes échelles pour répondre aux besoins des différents acteurs pour participer aux efforts de 'seamless forecasts' pour avoir des produits adaptés à chaque échéance. Ces efforts doivent être alignés avec des campagnes internationales telles que l'initiative Early Warning for All de WMO ou de Copernicus EMS afin de renforcer la collaboration et d'éviter les duplications et seront développés en collaboration avec des collègues de ACMAD, AGHRYMET et RIMES.

Pour conclure l'ensemble du travail, je propose d'évaluer la valeur ajoutée apportée par ces efforts, en particulier dans le contexte des prévisions étendues et saisonnières. Il convient de prendre du recul et d'examiner en détail la qualité des informations fournies par ces nouveaux outils (scores, sources d'erreurs, identification des faiblesses), ainsi que leur réception par les experts et les utilisateurs finaux, et d'analyser si des mesures d'atténuation ont été prises en réponse à ces informations. L'objectif est de s'assurer que les résultats de recherche obtenus ont été effectivement traduits en actions concrètes. Si ce n'est pas le cas, de voir si cela provient des incertitudes de la prévision, de la communication ou de l'exécution des actions. Cet effort est particulièrement délicat et pourrait s'apparenter à une devise des Shadocks :

Comment évaluer un dispositif dont l'influence potentielle peut altérer le résultat escompté préalablement ?

Cadre conceptuel de la démarche

Contents

9.1	Approches	83
9.2	Co-construction et collaborations	84
9.3	Science appliquée et pragmatique	84
9.4	Les données	85
9.5	Soutien institutionnel et budgétaire	87

9.1 Approches

Comme mentionné dans la description du projet, l'objectif fondamental réside dans l'estimation des risques par une approche holistique des principaux aléas naturels de la région. Il est impératif de ne pas considérer chaque aléa de manière isolée, mais d'évaluer leurs interactions et leurs synergies. Cette approche permettra de mieux appréhender la dynamique complexe qui émerge lorsque ces aléas interagissent les uns avec les autres, lorsqu'ils se produisent simultanément ou consécutivement. Il est nécessaire de comprendre comment ces interactions modifient la sensibilité et la vulnérabilité des populations et donc leur impact. Il est aussi nécessaire d'examiner comment ces interactions évoluent dans le temps et dans différents contextes. En adoptant une perspective holistique des aléas, il sera alors possible d'anticiper de manière plus précise les scénarios possibles et de mieux appréhender les impacts pour une prévention et une gestion des risques plus efficaces. Cette approche s'inscrit dans le ciblage des efforts pour renforcer la résilience des communautés face à ces défis multiples et interconnectés.

Le projet de recherche nécessite aussi clairement une approche systémique du risque, suivant un parcours qui débute par une analyse physique des aléas pour se focaliser ensuite sur les impacts sociétaux, en explorant diverses approches et thématiques. Ce travail est donc une chaîne logistique scientifique dont les maillons représentent des pôles de recherche :

- la définition, la détection et la caractérisation des phénomènes étudiés
- les processus physiques sous-jacents et les forçages qui les influent
- la modélisation et la représentation numérique pour enrichir notre compréhension et améliorer les prévisions
- le lien causal entre les aléas et les impacts

- les applications opérationnelles de ces recherches et l'efficacité de la communication, ainsi que la valeur ajoutée de ces efforts

Pour que cette chaîne soit forte, il est nécessaire que chacun de ces pôles soit avancé mais aussi que les liaisons entre eux le soient. Pour ce faire, il s'agit, par exemple, de bien adapter les outils, les bases de données pour qu'elles soient compréhensibles et utiles pour les autres pôles. La communication est aussi essentielle pour intégrer de nouvelles approches et thématiques. Ce processus de développement doit être bidirectionnel, avec une évaluation rétrospective à chaque liaison pour garantir l'adaptation des produits, données et outils aux besoins réels.

En outre, une importance cruciale est accordée aux dimensions sociales, économiques et culturelles dans l'évaluation des risques. Leur intégration permet une meilleure compréhension des impacts des événements météorologiques extrêmes sur les populations, les communautés, les économies locales et les pratiques culturelles. Par conséquent, des collaborations approfondies avec des chercheurs de disciplines en science humaine et sociale sont nécessaires pour évaluer ces dimensions et les intégrer dans la compréhension des résultats et des stratégies d'adaptation aux risques climatiques.

9.2 Co-construction et collaborations

La mise en œuvre d'un tel projet exige incontestablement un dialogue continu et étroit avec les partenaires impliqués. Ce dialogue doit avant tout faciliter l'identification des besoins au niveau des services opérationnels, des mesures de risques et des plans de protection des populations. En outre les besoins en terme de connaissances académiques des systèmes météorologiques et climatiques pourront être identifiés avec les chercheurs spécialisés en atmosphère et climat. Ceci devrait déboucher sur l'élaboration de projets de recherche collectifs afin de développer, tester et valider des hypothèses et/ou outils novateurs.

Comme mentionné précédemment, l'intégration d'autres disciplines, telles que la sociologie, la santé et la géographie, est également indispensable. Ces différentes disciplines doivent être mises en lien avec celles de la physique et de la météorologie pour favoriser une approche multidisciplinaire dans la conception des indices et leur communication. Un processus itératif de transfert de connaissances, de formation et de transfert technologique vers les structures opérationnelles, soutenu par une évaluation régulière des actions et des événements précédents, sera mis en place pour garantir la pertinence et l'efficacité des initiatives entreprises.

9.3 Science appliquée et pragmatique

Au cœur de cette démarche se trouve la volonté d'optimiser les outils et les connaissances existants, en tirant parti des avancées technologiques (notamment l'intelligence artificielle). Plutôt que de réinventer la roue, nous chercherons à utili-

ser et adapter ce qui est déjà en place, en affinant les techniques et en maximisant leur efficacité en vue d'une science appliquée. Dans cette optique, nous nous attaquerons à la complexité inhérente aux produits scientifiques, notamment les prévisions ensemblistes. Plutôt que de se contenter d'une simple moyenne des résultats, nous nous efforcerons de simplifier cette complexité tout en préservant la richesse des données. Notre objectif est de rendre ces produits plus accessibles et plus utiles.

Un autre pilier de cette approche est l'esprit critique et la remise en question constante. Cette attitude permet d'identifier les faiblesses de ces approches et de les corriger, garantissant ainsi des résultats fiables et pertinents, surtout que les qualités des applications de ces travaux pourront être rapidement établies. Enfin, le projet s'attache à produire un réel apport, concret et applicable, même si cela ne se traduit pas par le développement de systèmes opérationnels. Des solutions tangibles peuvent être apportées, en se concentrant sur ce qui peut être mis en œuvre pour apporter une réelle valeur ajoutée à nos partenaires et à la société dans son ensemble.

Au-delà de l'aspect technique, le projet est profondément ancré dans la science de la durabilité en reconnaissant l'importance de préserver les ressources naturelles et de minimiser notre impact sur l'environnement. Cela se reflète dans nos choix de travail et les produits finaux contribueront à un avenir plus durable.

9.4 Les données

Pour entreprendre ce projet, il convient de recourir à une diversité de données préalablement utilisées, telles évoquées dans les travaux antérieur.

Concernant la modélisation régionale, notre engagement actuel réside dans l'application du modèle WRF couplé à CHIMERE pour examiner les interactions des aérosols avec l'atmosphère et leurs impacts radiatifs. Cet outil se montre approprié pour étudier le système de mousson en présence de particules et de composés chimiques, ce qui en fait un choix adéquat pour les analyses d'événements pollués. Les données satellites provenant des plateformes récentes de COPERNICUS, notamment les produits Sentinel 5P pour les composés chimiques atmosphériques, ainsi que les Sentinel 1 et 2 pour une amélioration de la fréquence et de la résolution spatiale, seront particulièrement utiles. Dans le domaine de la modélisation globale, l'utilisation des sorties des nouveaux modèles tels que ERA6 ou SEAS6 est envisagée pour générer de nouvelles réanalyses et des prévisions saisonnières plus précises et complexes, qui seront distribuées en 2025. Ces données offriront une résolution spatiale accrue ainsi qu'une variété de variables plus étendue. Concernant les prévisions saisonnières, une augmentation du nombre de membres est prévue, ce qui, bien que complexifiant la gestion des hindcasts, permettra une meilleure couverture des incertitudes de prévision.

De plus, un effort considérable sera déployé pour élaborer une gamme de nouveaux produits diversifiés et adaptés. C'est indispensable car ces données sont essentielles à plusieurs égards. Elles permettent notamment de valider les données à grande échelle grâce aux mesures au sol, de mieux caractériser les événements et de

comparer les prévisions. De plus, les modèles statistiques ne peuvent être correctement alimentés et validés sans ces données.

En ce qui concerne la validation et/ou la calibration des modèles ou des données satellites, il sera nécessaire d'appuyer et supporter les réseaux d'observations sol des partenaires (LPAOSF, LAPAMF) ainsi que par les observations de l'observatoire AMMA soutenu par l'IRD. Le développement de nouveaux ensembles de données impliquera des observations novatrices, telles que celles auxquelles j'ai participé avec les driftsondes, ainsi que le déploiement d'un réseau plus dense de stations météorologiques temporaires, similaire à celui utilisé lors de campagnes telles que DACCIWA, CADDIWA et FENNEC. Nous nous inspirerons des stations de mesure à bas coût développées en Europe et aux États-Unis. Ces bases de données doivent être intégrées aux efforts de calibration/validation des futurs projets satellites, ce qui pourrait contribuer significativement à la compréhension de certains événements météorologiques extrêmes.

Par ailleurs, des efforts seront déployés pour sensibiliser et soutenir la collecte de bases de données diversifiées, en mettant particulièrement l'accent sur les impacts, actuellement sous-représentés et peu promus. Cela impliquera une meilleure identification des besoins et un soutien aux partenaires dans l'établissement et le développement de telles bases de données. Comme observé lors des COFs et dans de nombreux systèmes d'alerte précoce déjà en place sur le continent, les prévisions se concentrent encore largement sur les aléas et peinent à évoluer vers des prévisions basées sur les risques ou une mesure réelle des impacts en raison du manque de données. Pour les données épidémiologiques, des informations ont été collectées et des collaborations ont été montées dans le cadre de programmes passés (ACCASIS, DACCIWA). J'ai pour collaborer avec l'Institut Pasteur de Côte d'Ivoire pour mettre en place un protocole d'enquête de terrain pour la collecte des données épidémiologiques à Dakar et Abidjan dans le cadre du projet STEWARD. Ces données seront à disposition mais il sera aussi nécessaire de continuer ou d'amorcer de nouvelles enquêtes de ce type dans le futur. Pour garantir la qualité des données, elles doivent être précises, mais aussi détaillées et pérennes. Il faudra donc contribuer au financement de ces collectes, de travailler sur la qualité de ces dernières et de les partager. Il faut aussi définir des protocoles sur les informations à collecter avec des spécificités compatibles aux données issues des aléas.

Concernant les méthodologies envisagées pour ce projet, l'accent sera mis sur le développement de produits de post-traitement, tels que le CDFt, ainsi que sur l'exploitation de techniques de machine learning pour extraire des informations robustes des sorties ensemblistes. Il s'agira notamment de construire des indices basés sur la distribution des membres de la prévision à l'aide d'outils de classification et de régression, tels que les forêts aléatoires (random forest), afin d'analyser de manière précise l'information globale de ces prévisions ensemblistes. Des méthodes de classification seront également utilisées pour établir des liens entre les aléas et les impacts, en continuant à recourir à des méthodes de réseaux de neurones.

9.5 Soutien institutionnel et budgétaire

S'appuyant sur un vaste réseau de collaborations avec des chercheurs ouest-africains et des institutions telles que ACMAD, AGRHYMET, le LPAOSF, le LAPAMF et l'Institut Pasteur de Côte d'Ivoire, ainsi que sur les services météorologiques nationaux tels que l'ANACIM et la SODEXAM, ce projet bénéficie d'une solide base partenariale régionale. Cette collaboration stratégique favorise le partage des connaissances, des ressources et des meilleures pratiques, renforçant ainsi la capacité à relever les défis complexes liés à la prévision des risques dans la région. Le projet s'appuie aussi sur une collaboration au sein de mon équipe HMCIS de l'IGE, avec des collègues de l'IRD (Espace Dev, UMR Résilience, LOCEAN) et du CNRS (LATMOS).

Dans le cadre du transfert de connaissances et du renforcement des capacités, le projet s'appuie sur les Laboratoires Mixtes Internationaux (LMI), notamment Eclairs 2 et NEXUS pour respectivement Dakar et Abidjan. Ces plateformes de collaboration scientifique facilitent l'échange d'expertise et la mise en œuvre de projets conjoints visant à améliorer les capacités de recherche et d'action dans le domaine de la gestion des risques.

Je suis également ouvert à de nouvelles contributions grâce au vaste réseau de collaborateurs impliqués dans des initiatives telles que ClimSA et GMES & Africa, couvrant l'ensemble du continent africain. Cette ouverture à la collaboration renforce la capacité à mobiliser des ressources et des expertises diverses pour répondre aux besoins, changeants et émergents en matière de prévision des risques. Par ailleurs, mon engagement dans des projets en cours tels que STEWARD, avec une phase importante de finalisation des produits de soutien à la décision et de transfert de connaissances, témoigne de notre implication active dans la mise en œuvre de solutions opérationnelles et novatrices.

Fort de mon expérience en France et avec les institutions européennes, ainsi que de mon implication dans des grands programmes de recherche internationaux, tels que ClimSA, GMES & Africa, Space program à partir de 2025, Copernicus EMS, CAMS et C3S, je pense être en mesure de mobiliser des soutiens institutionnels et financiers pour des initiatives de recherche et de développement, notamment via les appels d'offres Horizon Europe.

Bibliographie

- Maryam K Abdelrazik, Sara E Abdelaziz, Mariam F Hassan, and Tarek M Hatem. Climate action : Prospects of solar energy in africa. *Energy Reports*, 8 :11363–11377, 2022. (Cité en page 6.)
- Akintomide Afolayan Akinsanola, Kehinde O Ogunjobi, Akintayo T Abolude, and Seyni Salack. Projected changes in wind speed and wind energy potential over west africa in cmip6 models. *Environmental Research Letters*, 16(4) :044033, 2021. (Cité en page 7.)
- Dimitris Akritidis, Eleni Katragkou, Aristeidis K Georgoulas, Prodromos Zanis, Stergios Kartsios, Johannes Flemming, Antje Inness, John Douros, and Henk Eskes. A complex aerosol transport event over europe during the 2017 storm ophelia in cams forecast systems : analysis and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21) :13557–13578, 2020. (Cité en page 10.)
- Lorenzo Alfieri, Ervin Zsoter, Shaun Harrigan, Feyera Aga Hirpa, Christophe Lavaysse, Christel Prudhomme, and Peter Salamon. Range-dependent thresholds for global flood early warning. *Journal of Hydrology X*, 4 :100034, 2019. (Cité en pages 32 et 57.)
- Fernando Antonanzas-Torres, Javier Antonanzas, and Julio Blanco-Fernandez. State-of-the-art of mini grids for rural electrification in west africa. *Energies*, 14(4) :990, 2021. (Cité en page 6.)
- Bobadoye Ayodotun, Sylla Bamba, and Aderonke Adio. Vulnerability assessment of west african countries to climate change and variability. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(6) :13–15, 2019. (Cité en page 80.)
- Y Azoumah, Emmanuel W Ramde, Gildas Tapsoba, and Sina Thiam. Siting guidelines for concentrating solar power plants in the sahel : Case study of burkina faso. *Solar Energy*, 84(8) :1545–1553, 2010. (Cité en page 6.)
- Titike K Bahaga, Andreas H Fink, and Peter Knippertz. Revisiting interannual to decadal teleconnections influencing seasonal rainfall in the greater horn of africa during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 39(5) :2765–2785, 2019. (Cité en page 11.)
- Foteini Baladima, Jennie L Thomas, Didier Voisin, Marie Dumont, Clementine Junquas, Rajesh Kumar, Christophe Lavaysse, Louis Marelle, Mark Parrington, and Johannes Flemming. Modeling an extreme dust deposition event to the french alpine seasonal snowpack in april 2018 : Meteorological context and predictions of dust deposition. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 127(8) : e2021JD035745, 2022. (Cité en pages 29, 32 et 44.)

- Bedru Balana, Alan de Brauw, Dolapo Adeyanju, Kwaw Andam, Clare Clingain, Olukunbi Olarewaju, and Ishiyaku Yohanna. Presentation for anticipatory cash transfers for climate resilience : Evidence from experimental study in northeast nigeria. 2023. (Cité en page 7.)
- Roland Azibo Balgah, Kester Azibo Ngwa, Gertrud Rosa Buchenrieder, and Jude Ndzifon Kimengsi. Impacts of floods on agriculture-dependent livelihoods in sub-saharan africa : An assessment from multiple geo-ecological zones. *Land*, 12(2) :334, 2023. (Cité en page 8.)
- Regina Below, Emily Grover-Kopec, and Maxx Dilley. Documenting drought-related disasters : A global reassessment. *The Journal of Environment & Development*, 16(3) :328–344, 2007. (Cité en page 8.)
- Abdelmoula Ben-tayeb, Mohammed Diouri, Rajae Meziane, and Hanae Steli. Solar radiation attenuation by aerosol : application to solar farms. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(2) :259–269, 2020. (Cité en page 9.)
- G Bergametti, B Marticorena, Jean-Louis Rajot, B Chatenet, A Féron, C Gaimoz, G Siour, M Coulibaly, I Koné, A Maman, et al. Dust uplift potential in the central sahel : an analysis based on 10 years of meteorological measurements at high temporal resolution. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(22) :12–433, 2017. (Cité en page 42.)
- Michela Biasutti and Alessandra Giannini. Robust sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, 33(11), 2006. (Cité en page 12.)
- Joern Birkmann, Ali Jamshed, Joanna M McMillan, Daniel Feldmeyer, Edmond Totin, William Solecki, Zelina Zaiton Ibrahim, Debra Roberts, Rachel Bezner Kerr, Hans-Otto Poertner, et al. Understanding human vulnerability to climate change : A global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of The Total Environment*, 803 :150065, 2022. (Cité en page 80.)
- Jan Bलिएfnicht, M Waongo, S Salack, J Seidel, Patrick Laux, and Harald Kunstmann. Quality and value of seasonal precipitation forecasts issued by the west african regional climate outlook forum. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(3) :621–642, 2019. (Cité en page 12.)
- James Buizer, Katharine Jacobs, and David Cash. Making short-term climate forecasts useful : Linking science and action. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(17) :4597–4602, 2016. (Cité en page 12.)
- Piet Buys, Uwe Deichmann, Craig Meisner, Thao Ton That, and David Wheeler. Country stakes in climate change negotiations : Two dimensions of vulnerability. *Climate Policy*, 9(3) :288–305, 2009. (Cité en page 6.)

- Alex J Cannon, Stephen R Sobie, and Trevor Q Murdock. Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping : how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17) :6938–6959, 2015. (Cité en page 11.)
- F Cappucci, M Clerici, N Gobron, C Lavaysse, V Venkatachalam, J Van't Klooster, et al. Climsa station : Fitness for purpose : a case study for rainfall estimation over africa. 2024. (Cité en page 68.)
- Hugo Carrão, Gustavo Naumann, Emanuel Dutra, Christophe Lavaysse, and Paulo Barbosa. Seasonal drought forecasting for latin america using the ecmwf s4 forecast system. *Climate*, 6(2) :48, 2018. (Cité en page 60.)
- Paola Casati, Magda Moner-Girona, Ibrahim Khaleel Shehu, Sandor Szabó, and Godwell Nhamo. Datasets for a multidimensional analysis connecting clean energy access and social development in sub-saharan africa. *Data in Brief*, 47 :108948, 2023. (Cité en page 6.)
- Jean-Pierre Chaboureau, Cyrille Flamant, Thibaut Dauhut, Cécile Kocha, Jean-Philippe Lafore, Christophe Lavaysse, Fabien Marnas, M Mokhtari, Jacques Pelon, Irene Reinares Martínez, et al. Fenec dust forecast intercomparison over the sahara in june 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2016. (Cité en page 58.)
- O Alizadeh Choobari, Peyman Zawar-Reza, and Andrew Sturman. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system : A review. *Atmospheric Research*, 138 :152–165, 2014. (Cité en page 9.)
- Léo Clauzel, Sandrine Anquetin, Christophe Lavaysse, Guillaume Tremoy, and Damien Raynaud. West african operational daily solar forecast errors and their link with meteorological conditions. *Renewable Energy*, page 120101, 2024. (Cité en pages 59 et 71.)
- Lucia Corno, Nicole Hildebrandt, and Alessandra Voena. Age of marriage, weather shocks, and the direction of marriage payments. *Econometrica*, 88(3) :879–915, 2020. (Cité en page 7.)
- J. Cuesta, C. Lavaysse, C. Flamant, M. Mimouni, and P. Knippertz. Northward burst of the West African monsoon and interactions with large-scale conditions leading to rainfall over the Hoggar Massif, Algeria. *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, 2009. (Cité en pages 27, 29, 32 et 40.)
- Giovanni A Dalu, Marco Gaetani, Christophe Lavaysse, Cyrille Flamant, Amato T Evan, and Marina Baldi. Simple solutions for the summer shallow atmospheric circulation over north africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(712) :765–779, 2018. (Cité en pages 28 et 50.)

- Derrick Kwadwo Danso, Sandrine Anquetin, Arona Diedhiou, Christophe Lavaysse, Arsène Koba, and N'Datchoh Evelyne Touré. Spatio-temporal variability of cloud cover types in west africa with satellite-based and reanalysis data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(725) :3715–3731, 2019. (Cité en pages 71 et 79.)
- Derrick Kwadwo Danso, Sandrine Anquetin, Arona Diedhiou, Christophe Lavaysse, Benoit Hingray, Damien Raynaud, and Arsène Toka Koba. A cmip6 assessment of the potential climate change impacts on solar photovoltaic energy and its atmospheric drivers in west africa. *Environmental Research Letters*, 17(4) :044016, 2022. (Cité en page 71.)
- Michael BK Darkoh. The nature, causes and consequences of desertification in the drylands of africa. *Land Degradation & Development*, 9(1) :1–20, 1998. (Cité en page 5.)
- Florence De Longueville, Yvon-Carmen Hountondji, Sabine Henry, and Pierre Ozer. What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in west africa compared to other regions? *Science of the total environment*, 409(1) :1–8, 2010. (Cité en page 9.)
- Florence De Longueville, Pierre Ozer, Seydou Doumbia, and Sabine Henry. Desert dust impacts on human health : an alarming worldwide reality and a need for studies in west africa. *International journal of biometeorology*, 57 :1–19, 2013. (Cité en page 9.)
- Marleen C de Ruiter and Anne F van Loon. The challenges of dynamic vulnerability and how to assess it. *Isience*, 25(8), 2022. (Cité en page 81.)
- Dimitri Defrance, Benjamin Sultan, Mathieu Castets, Adjoua Moise Famien, and Christian Baron. Impact of climate change in west africa on cereal production per capita in 2050. *Sustainability*, 12(18) :7585, 2020. (Cité en page 5.)
- Giuliano Di Baldassarre, Alberto Montanari, Harry Lins, Demetris Koutsoyiannis, Luigia Brandimarte, and Günter Blöschl. Flood fatalities in africa : from diagnosis to mitigation. *Geophysical research letters*, 37(22), 2010. (Cité en page 8.)
- Djamal Hissein Didane, Nurhayati Rosly, Mohd Fadhli Zulkaffi, Syariful Syafiq Shamsudin, et al. Evaluation of wind energy potential as a power generation source in chad. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, 2017. (Cité en page 7.)
- Francisco J Doblas-Reyes, Javier García-Serrano, Fabian Lienert, Aida Pintó Biescas, and Luis RL Rodrigues. Seasonal climate predictability and forecasting : status and prospects. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 4(4) : 245–268, 2013. (Cité en page 11.)

- Alessandro Dosio, Hans-Jürgen Panitz, Martina Schubert-Frisius, and Daniel Lüthi. Dynamical downscaling of cmip5 global circulation models over cordex-africa with cosmo-clm : evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Climate Dynamics*, 44 :2637–2661, 2015. (Cité en page 12.)
- Alessandro Dosio, Richard G Jones, Christopher Jack, Christopher Lennard, Grigory Nikulin, and Bruce Hewitson. What can we know about future precipitation in africa? robustness, significance and added value of projections from a large ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 53 :5833–5858, 2019. (Cité en page 12.)
- P. Drobinski, P. Cocquerez, P. Doerenbecher, A. Hock, C. Lavaysse, D. Parsons, and J.L. Redelsperger. Hurricane and monsoon tracking with driftsondes. *Robert Meyers (ed.) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2010. (Cité en pages 27 et 47.)
- P. Drobinski, F. Karbou, P. Bauer, P. Cocquerez, C. Lavaysse, T. Hock, D. Parsons, F. Rabier, J.L. Redelsperger, and S. Venel. Driftsonde observations to evaluate numerical weather prediction of the late 2006 african monsoon. *in press in Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012. (Cité en pages 27 et 47.)
- Emanuel Dutra, Will Pozzi, Fredrik Wetterhall, F Di Giuseppe, L Magnusson, Gustavo Naumann, Paulo Barbosa, Juergen Vogt, and Florian Pappenberger. Global meteorological drought—part 2 : Seasonal forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7) :2669–2678, 2014. (Cité en page 11.)
- Sebastian Engelstaedter, Ina Tegen, and Richard Washington. North african dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2) :73–100, 2006. (Cité en page 9.)
- A. Evan, C. Flamant, C. Lavaysse, C. Kocha, and A. Saci. Water vapour forced greenhouse warming over the sahara desert and the recent recovery from the sahelian drought. *Journal of Climate*, 8 :108–123, 2015. (Cité en page 45.)
- Amato T Evan, Cyrille Flamant, Marco Gaetani, and Françoise Guichard. The past, present and future of african dust. *Nature*, 531(7595) :493–495, 2016. (Cité en page 8.)
- Cheikh Modou Noreyni Fall, Christophe Lavaysse, Mamadou Simina Drame, Gérémy Panthou, and Amadou Thierno Gaye. Wet and dry spells in senegal : comparison of detection based on satellite products, reanalysis, and in situ estimates. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3) :1051–1069, 2021. (Cité en pages 27 et 40.)
- Cheikh Modou Noreyni Fall, Christophe Lavaysse, Hervé Kerdiles, Mamadou Simina Dramé, Philippe Roudier, and Amadou Thierno Gaye. Performance of dry and wet spells combined with remote sensing indicators for crop yield prediction in

- senegal. *Climate Risk Management*, 33 :100–131, 2022. (Cité en pages 27, 28 et 68.)
- Mbaye Faye, Abdoulaye Dème, Abdou Kâ Diongue, and Ibrahima Diouf. Impact of different heat wave definitions on daily mortality in bandafassi, senegal. *PloS one*, 16(4) :e0249199, 2021. (Cité en page 5.)
- Sarah Feron, Raúl R Cordero, Alessandro Damiani, and Robert B Jackson. Climate change extremes and photovoltaic power output. *Nature Sustainability*, 4(3) : 270–276, 2021. (Cité en page 6.)
- AH Fink, DG Vincent, and V Ermert. Rainfall types in the west african sudanian zone during the summer monsoon 2002. *Monthly weather review*, 134(8) :2143–2164, 2006. (Cité en page 10.)
- C. Flamant, P. Knippertz, D.J. Parker, J.-P. Chaboureau, C. Lavaysse, A. Agustí-Panareda, and L. Kergoat. The impact of a meso-scale convective system cold pool on the northward propagation of the intertropical discontinuity over West Africa. *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, 135 :139–159, 2009a. (Cité en page 27.)
- C. Flamant, C. Lavaysse, M.C. Todd, J.-P. Chaboureau, and J. Pelon. Multi-platform observations of a springtime case of Bodele and Sudan dust emission, transport and scavenging over West Africa. *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, 135 :413–430, 2009b. (Cité en pages 27, 45 et 51.)
- Cyrille Flamant, Julien Delanoë, Jean-Pierre Chaboureau, Christophe Lavaysse, Marco Gaetani, and Olivier Bock. La campagne caddiwa dans la région des îles du cap-vert. *La Météorologie*, (Novembre) :2–5, 2021. (Cité en pages 28 et 52.)
- Cyrille Flamant, Jean-Pierre Chaboureau, Julien Delanoë, Marco Gaetani, Cédric Jamet, Christophe Lavaysse, Olivier Bock, Maurus Borne, Quitterie Cazenave, Pierre Coutris, et al. Cyclogenesis in the tropical atlantic : First scientific highlights from the clouds–atmospheric dynamics–dust interactions in west africa (caddiwa) field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(2) : E387–E417, 2024. (Cité en page 53.)
- Anne Fouillet, Grégoire Rey, Vèrène Wagner, Karine Laaidi, Pascal Empereur-Bissonnet, Alain Le Tertre, Philippe Frayssinet, Pierre Bessemoulin, Françoise Laurent, Perrine De Crouy-Chanel, et al. Has the impact of heat waves on mortality changed in france since the european heat wave of summer 2003 ? a study of the 2006 heat wave. *International journal of epidemiology*, 37(2) :309–317, 2008. (Cité en page 81.)
- Evan DG Fraser, Elisabeth Simelton, Mette Termansen, Simon N Gosling, and Andrew South. “vulnerability hotspots” : Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170 :195–205, 2013. (Cité en page 8.)

- Marco Gaetani, Cyrille Flamant, Sophie Bastin, Serge Janicot, Christophe Lavaysse, Frederic Hourdin, Pascale Braconnot, and Sandrine Bony. West african monsoon dynamics and precipitation : the competition between global sst warming and co2 increase in cmip5 idealized simulations. *Climate dynamics*, 48(3) :1353–1373, 2017. (Cité en page 62.)
- Alessandra Giannini, R Saravanan, and Ping Chang. Oceanic forcing of sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 302(5647) :1027–1030, 2003. (Cité en page 9.)
- Filippo Giorgi, Erika Coppola, Francesca Raffaele, Gulilat Tefera Diro, Ramon Fuentes-Franco, Graziano Giuliani, Ashu Mangain, Marta Pereira Llopart, Laura Mariotti, and Csaba Torma. Changes in extremes and hydroclimatic regimes in the crema ensemble projections. *Climatic Change*, 125 :39–51, 2014. (Cité en page 12.)
- Georg A Grell, Steven E Peckham, Rainer Schmitz, Stuart A McKeen, Gregory Frost, William C Skamarock, and Brian Eder. Fully coupled “online” chemistry within the wrf model. *Atmospheric environment*, 39(37) :6957–6975, 2005. (Cité en page 9.)
- GWEC. Africa wind energy handbook. Available at : <https://gwec.net/africa-wind-energy-handbook/>, 2019. (Cité en page 6.)
- Thomas Haiden, Mark J Rodwell, David S Richardson, Akira Okagaki, Tom Robinson, and Tim Hewson. Intercomparison of global model precipitation forecast skill in 2010/11 using the seeps score. *Monthly Weather Review*, 140(8) :2720–2733, 2012. (Cité en page 10.)
- Isaac M Held, Thomas L Delworth, Jian Lu, KL u Findell, and TR Knutson. Simulation of sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(50) :17891–17896, 2005. (Cité en page 8.)
- Lise Byskov Herslund, Fatemeh Jalayer, Nathalie Jean-Baptiste, Gertrud Jørgensen, Sigrun Kabisch, Wilbard Kombe, Sarah Lindley, Patrik Karlsson Nyed, Stephan Pauleit, Andreas Printz, et al. A multi-dimensional assessment of urban vulnerability to climate change in sub-saharan africa. *Natural hazards*, 82 :149–172, 2016. (Cité en page 80.)
- Robert A Houze Jr, Kristen L Rasmussen, Manuel D Zuluaga, and Stella R Brodzik. The variable nature of convection in the tropics and subtropics : A legacy of 16 years of the tropical rainfall measuring mission satellite. *Reviews of Geophysics*, 53(3) :994–1021, 2015. (Cité en page 10.)
- S. Janicot, A. Ali, N. Ascencio, G. Berry, O. Bock, B. Bourles, G. Caniaux, F. Chauvin, A. Deme, L. Kergoat, J.-P. Lafore, C. Lavaysse, T. Lebel, B. Marticorena, F. Mounier, J.-L. Redelsperger, C. Reeves, R. Roca, P. de Rosnay, B. Sultan,

- C. Thorncroft, M. Tomasini, and ACMAD forecasters team. Large-scale overview of the summer monsoon over West and Central Africa during AMMA field experiment in 2006. *Annales Geophysicae*, 26 :2569–2595, 2008. (Cité en pages 29 et 45.)
- S. Janicot, G. Caniaux, F. de Coetlogon, B. Fontaine, N. Hall, G. Kiladis, J.-P. Lafore, C. Lavaysse, S. Lavender, S. Leroux, R. Marteau, F. Mounier, N. Philippon, and R. Roerhig. Intraseasonal variability of the west african monsoon. *Atmospheric Sciences Letters*, page DOI : 10.1002/asl280, 2010. (Cité en page 45.)
- Nathalie Jean-Baptiste, Christian Kuhlicke, Anna Kunath, and Sigrun Kabisch. Review and evaluation of existing vulnerability indicators for assessing climate related vulnerability in africa. Technical report, UFZ-Bericht, 2011. (Cité en page 80.)
- Nathalie Jean-Baptiste, Sigrun Kabisch, and Christian Kuhlicke. Urban vulnerability assessment in flood-prone areas in west and east africa. In *Urban Environment : Proceedings of the 11th Urban Environment Symposium (UES), held in Karlsruhe, Germany, 16-19 September 2012*, pages 203–215. Springer, 2013. (Cité en page 80.)
- Nathaniel D Jensen, Christopher B Barrett, and Andrew G Mude. Cash transfers and index insurance : A comparative impact analysis from northern kenya. *Journal of Development Economics*, 129 :14–28, 2017. (Cité en page 7.)
- Tanguy Jonville, Cyrille Flamant, Christophe Lavaysse, Julien Delano , Pascal Richard, Sophie Boumissou, Quiterie Cazenave, Hélène Colomb, Christophe Caudoux, Philippe Peyrill , et al. Development of tropical cyclones from african easterly waves : comparative study of three african easterly wave events during the caddiwa campaign. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pages EGU–1087, 2023. (Cité en page 46.)
- Tanguy Jonville, Cyrille Flamant, and Christophe Lavaysse. Dynamical study of three african easterly waves in september 2021. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2024. (Cité en page 53.)
- Moussa Kant , Shuai Deng, Yang Li, Souleymane Coulibaly, et al. Long-term optimization of hydro & solar power electricity generation in the taoussa area of mali using the message model. *Energy Reports*, 9 :252–265, 2023. (Cité en page 6.)
- Agnieszka H Kazmierczuk. Wind energy in kenya : A status and policy framework review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107 :434–445, 2019. (Cité en page 7.)
- Haitham Khraishah, Barrak Alahmad, Robert L Ostergard Jr, Abdelrahman AlAshqar, Mazen Albaghdadi, Nirupama Vellanki, Mohammed M Chowdhury, Sadeer G

- Al-Kindi, Antonella Zanobetti, Antonio Gasparrini, et al. Climate change and cardiovascular disease : implications for global health. *Nature Reviews Cardiology*, 19(12) :798–812, 2022. (Cité en page 78.)
- D Khvorostyanov, N Blond, et al. Chimere 2013 : a model for regional atmospheric composition modelling. *Geoscientific model development*, 6(4) :981–1028, 2013. (Cité en page 9.)
- Nana Ama Browne Klutse, Mouhamadou Bamba Sylla, Ismaila Diallo, Abdoulaye Sarr, Alessandro Dosio, Arona Diedhiou, Andre Kamga, Benjamin Lamptey, Abdou Ali, Emiola O Gbobaniyi, et al. Daily characteristics of west african summer monsoon precipitation in cordex simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 123 :369–386, 2016. (Cité en page 12.)
- Peter Knippertz, Andreas H Fink, Adrien Deroubaix, Eleanor Morris, Flore Tocquer, Mat J Evans, Cyrille Flamant, Marco Gaetani, Christophe Lavaysse, Celine Mari, et al. A meteorological and chemical overview of the daccwa field campaign in west africa in june–july 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17) : 10893–10918, 2017. (Cité en pages 28 et 53.)
- R Sari Kovats and Shakoor Hajat. Heat stress and public health : a critical review. *Annu. Rev. Public Health*, 29 :41–55, 2008. (Cité en page 9.)
- J.P. Lafore, N. Asencio, D. Bouniol, F. Couvreux, C. Flamant, F. Guichard, N. Hall, S. Janicot, C. Kocha, C. Lavaysse, S. Leroux, E. Poan, P. Peyrillé, R. Roca, R. Roehrig, F. Roux, and F. Saïd. Evolution de notre compréhension du système de mousson ouest-africain. *La Meteorologie*, Special AMMA : doi : 10.4267/2042/48127, 2012. (Cité en page 45.)
- Willem A Landman, Anthony G Barnston, Coleen Vogel, and Janique Savy. Use of el niño–southern oscillation related seasonal precipitation predictability in developing regions for potential societal benefit. *International Journal of Climatology*, 39(14) :5327–5337, 2019. (Cité en page 11.)
- C. Lavaysse. *Etude des relations Onde - Convection - Pluie et influence de la variabilité du flux de mousson en Afrique de l'Ouest*. PhD thesis, INP Grenoble, 2006. (Cité en pages 27 et 29.)
- C. Lavaysse, A. Diedhiou, J. Y. Crandpeix, H. Laurent, and T. Lebel. Wet and Dry convective events in African Easterly wave regimes. *Int. J. Climatology*, page in preparation, 2006a. (Cité en page 46.)
- C. Lavaysse, A. Diedhiou, H. Laurent, and T. Lebel. African Easterly Waves and convective activity in wet and dry sequences of the West African Monsoon. *Climate Dynamics*, 27(2-3) :319–332, 2006b. (Cité en pages 27, 29 et 46.)

- C. Lavaysse, C. Flamant, S. Janicot, D.J. Parker, J.-P. Lafore, and B. Sultan. Seasonal evolution of the West African heat low, a climatological perspective. *Climate Dynamics*, pages doi : 10.1007/s00382-009-0553-4, 2009. (Cité en pages 29 et 47.)
- C. Lavaysse, C. Flamant, and S. Janicot. Regional scale convection patterns during strong and weak phases of the Saharan heat low. *Atmos.Sci.Let.*, page doi : 10.1002/asl.284, 2010a. (Cité en pages 27 et 48.)
- C. Lavaysse, C. Flamant, S. Janicot, and P. Knippertz. Links between african easterly waves, midlatitude circulation and intraseasonal pulsations of the west african heat low. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, page doi : 10.1002/qj.555, 2010b. (Cité en pages 27 et 48.)
- C. Lavaysse, J.-P. Chaboureau, and C. Flamant. Dust impact of the West African heat low in summertime. *Q.J.R.M.S.*, 137 :doi : 10.1002/qj.844, 2011. (Cité en pages 27, 28 et 48.)
- C. Lavaysse, M. Carrera, S. Belair, N. Gagnon, R. Frenette, M. Charron, and P. Yau. Impacts of the surface parameters uncertainties on the screen level of the atmosphere in the canadian regional ensemble prediction system. *in press in Mon. Wea. Rev.*, 2012a. (Cité en pages 28, 29 et 63.)
- C. Lavaysse, P. Drobinski, M. Vrac, M. Lengaigne, and T. Vischel. Statistical downscaling of the french mediterranean climate : assessment for present and projection in an anthropogenic scenario. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12 : doi :10.5194/nhess-12-651-2012, 2012b. (Cité en pages 28, 29 et 50.)
- C. Lavaysse, M. Carrera, P. Yau, and V. Fortin. On the use of the canadian reps to generate ensemble precipitation analysis. *in preparation*, 2013a. (Cité en pages 29, 32 et 48.)
- C. Lavaysse, L. Eymard, C. Flamant, and F. Karbou. Characterization of the west african heat low using the amsu-a sounder : climatology and comparison with era-interim reanalyses. *Submitted in Atm. Sci. Lett.*, 2013b. (Cité en pages 27 et 55.)
- C. Lavaysse, J. Vogt, and F. Pappenberger. Early warning of drought in europe using the monthly ensemble system from ecmwf. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12 : 1973-2009, 2015. (Cité en pages 28, 56 et 62.)
- C. Lavaysse, J. Vogt, and A. Toreti. On the use of atmospheric predictors to forecast meteorological droughts in europe. *submitted in QJRMS*, 2016. (Cité en pages 28, 30 et 32.)
- C. et al. Lavaysse. Benefits of the s2s multi-models ensemble to forecasts extrem events in the tropics. *in preparation*, 2016a. (Cité en page 32.)
- C. et al. Lavaysse. Predictability and origins of wet and dry spells in west africa. *to be submitted in QJRMS*, 2016b. (Cité en page 32.)

- Christophe Lavaysse. Warming trends : Saharan desert warming. *Nature Climate Change*, 5(9) :807–808, 2015. (Cité en page 50.)
- Christophe Lavaysse, Carmelo Cammalleri, Alessandro Dosio, Gerard van der Schrier, Andrea Toreti, and Jürgen Vogt. Towards a monitoring system of temperature extremes in europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1) : 91–104, 2018a. (Cité en pages 37 et 60.)
- Christophe Lavaysse, Jürgen Vogt, Andrea Toreti, Marco L Carrera, and Florian Pappenberger. On the use of weather regimes to forecast meteorological drought over europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(12) :3297–3309, 2018b. (Cité en page 60.)
- Christophe Lavaysse, Gustavo Naumann, Lorenzo Alfieri, Peter Salamon, and Jürgen Vogt. Predictability of the european heat and cold waves. *Climate Dynamics*, 52(3) :2481–2495, 2019. (Cité en pages 28 et 58.)
- Christophe Lavaysse, Tim Stockdale, Niall McCormick, and Jürgen Vogt. Evaluation of a new precipitation-based index for global seasonal forecasting of unusually wet and dry periods. *Weather and Forecasting*, 35(4) :1189–1202, 2020. (Cité en page 59.)
- Christophe Lavaysse, Philippe Roudier, Vijay Venkatachalam, Jurriaan Vanjt Klooster, and Marco Clerici. On the use of the estation developed in the gmes & africa eu project : Results from the user survey. *Atmosphere*, 12(2) :258, 2021. (Cité en page 69.)
- T. Lebel and A. Ali. Recent trends in the central and western sahel rainfall regime (1990-2007). *J. of Hydrology*, 375(52-64), 2009. (Cité en page 8.)
- NC Lee and VMS Leal. A review of energy planning practices of members of the economic community of west african states. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31 :202–220, 2014. (Cité en page 6.)
- Maria Carmen Lemos and Richard B Rood. Climate projections and their impact on policy and practice. *Wiley interdisciplinary reviews : climate change*, 1(5) : 670–682, 2010. (Cité en page 12.)
- Trevor Letcher. *Wind energy engineering : A handbook for onshore and offshore wind turbines*. Elsevier, 2023. (Cité en page 6.)
- PW Li and ST Chan. Application of a weather stress index for alerting the public to stressful weather in hong kong. *Meteorological Applications : A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 7(4) :369–375, 2000. (Cité en page 10.)
- Benjamin Lloyd-Hughes and Mark A Saunders. A drought climatology for europe. *International Journal of climatology : a journal of the royal meteorological society*, 22(13) :1571–1592, 2002. (Cité en page 8.)

- Shenelle Lottering, Paramu Mafongoya, and Romano Lottering. Drought and its impacts on small-scale farmers in sub-saharan africa : a review. *South African Geographical Journal*, 103(3) :319–341, 2021. (Cité en page 8.)
- Samuel Louvet, Benjamin Sultan, Serge Janicot, PH Kamsu-Tamo, and O Ndiaye. Evaluation of tigde precipitation forecasts over west africa at intraseasonal timescale. *Climate Dynamics*, 47(1) :31–47, 2016. (Cité en page 10.)
- Alexandra Lutz, James M Thomas, and Mamadou Keita. Effects of population growth and climate variability on sustainable groundwater in mali, west africa. *Sustainability*, 3(1) :21–34, 2010. (Cité en page 5.)
- NM Mahowald, JA Ballantine, J Feddema, and N Ramankutty. Global trends in visibility : implications for dust sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(12) :3309–3339, 2007. (Cité en page 9.)
- Ross I Maidment, Richard P Allan, and Emily Black. Recent observed and simulated changes in precipitation over africa. *Geophysical Research Letters*, 42(19) :8155–8164, 2015. (Cité en page 8.)
- Peter J Marcotullio, Carsten Keßler, and Balázs M Fekete. The future urban heat-wave challenge in africa : Exploratory analysis. *Global Environmental Change*, 66 :102190, 2021. (Cité en page 10.)
- Béatrice Marticorena, Bernardette Chatenet, Jean-Louis Rajot, Saran Traoré, M Coulibaly, Aldiouma Diallo, I Koné, Alicot Maman, T NDiaye, and Alfari Zakou. Temporal variability of mineral dust concentrations over west africa : analyses of a pluriannual monitoring from the amma sahelian dust transect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(18) :8899–8915, 2010. (Cité en page 9.)
- Nadège Martiny and Isabelle Chiapello. Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in west africa. *Atmospheric Environment*, 70 :245–253, 2013. (Cité en page 76.)
- Nadège Martiny, Pierre Camberlin, Yves Richard, and Nathalie Philippon. Compared regimes of ndvi and rainfall in semi-arid regions of africa. *International Journal of Remote Sensing*, 27(23) :5201–5223, 2006. (Cité en page 68.)
- Nadège Martiny, Isabelle Chiapello, Benjamin Sultan, and Bernard Fontaine. Les aérosols désertiques, un facteur potentiel des épidémies de méningite en afrique de l’ouest. *Santé Décision Management*, 10(3-4) :31–39, 2007. (Cité en page 9.)
- Abdullahi Abubakar Mas’ ud, Asan Vernyuy Wirba, Jorge Alfredo Ardila-Rey, Ricardo Albarracín, Firdaus Muhammad-Sukki, Álvaro Jaramillo Duque, Nurul Aini Bani, and Abu Bakar Munir. Wind power potentials in cameroon and nigeria : lessons from south africa. *Energies*, 10(4) :443, 2017. (Cité en page 7.)

- Vincent Mathon, Henri Laurent, and Thierry Lebel. Mesoscale convective system rainfall in the sahel. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(11) : 1081–1092, 2002. (Cité en page 10.)
- Mio Matsueda and Tetsuo Nakazawa. Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts. *Meteorological applications*, 22(2) :213–222, 2015. (Cité en page 10.)
- Andrea Mazzeo, Michael Burrow, Andrew Quinn, Eloise A Marais, Ajit Singh, David Ng’ang’a, Michael J Gatari, and Francis D Pope. Evaluation of the wrf and chimere models for the simulation of pm2. 5 in large east african urban conurbations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16) :10677–10701, 2022. (Cité en page 9.)
- Glenn R McGregor, Pierre Bessemoulin, Kristie L Ebi, and Bettina Menne. *Heat-waves and health : guidance on warning-system development*. Number 1142. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland, 2015. (Cité en pages 9 et 37.)
- Elizabeth C McNie. Reconciling the supply of scientific information with user demands : an analysis of the problem and review of the literature. *Environmental science & policy*, 10(1) :17–38, 2007. (Cité en page 12.)
- Gerald A Meehl, Curt Covey, Thomas Delworth, Mojib Latif, Bryant McAvaney, John FB Mitchell, Ronald J Stouffer, and Karl E Taylor. The wcrp cmip3 multi-model dataset : A new era in climate change research. *Bulletin of the American meteorological society*, 88(9) :1383–1394, 2007. (Cité en page 12.)
- Dimitrios Mentis, Sebastian Hermann, Mark Howells, Manuel Welsch, and Shahid Hussain Siyal. Assessing the technical wind energy potential in africa a gis-based approach. *Renewable Energy*, 83 :110–125, 2015. (Cité en page 7.)
- Laurent Menut. Variability and combination as an ensemble of mineral dust forecasts during the 2021 caddiwa experiment using the wrf 3.7. 1 and chimere v2020r3 models. *Geoscientific Model Development*, 16 :4265–4281, 2023. (Cité en page 10.)
- Bruno Merz, Günter Blöschl, Sergiy Vorogushyn, Francesco Dottori, Jeroen CJH Aerts, Paul Bates, Miriam Bertola, Matthias Kemter, Heidi Kreibich, Upmanu Lall, et al. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9) :592–609, 2021. (Cité en page 8.)
- P.-A. Michelangeli, M. Vrac, and H. Loukos. Probabilistic downscaling method approaches : Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys. Res. Lett.*, pages doi : 10,1029/2009GL038401, 2009. (Cité en page 29.)
- Magda Moner-Girona, Georgia Kakoulaki, Giacomo Falchetta, Daniel J Weiss, and Nigel Taylor. Achieving universal electrification of rural healthcare facilities in sub-saharan africa with decentralized renewable energy technologies. *Joule*, 5 (10) :2687–2714, 2021. (Cité en page 6.)

- Alexandra Monteiro, Sara Basart, Stelios Kazadzis, Athanasios Votsis, Antonis Gikas, Sophie Vandebussche, Aurelio Tobias, Carla Gama, Carlos Pérez García-Pando, Enric Terradellas, et al. Multi-sectoral impact assessment of an extreme african dust episode in the eastern mediterranean in march 2018. *Science of The Total Environment*, 843 :156861, 2022. (Cité en page 9.)
- JC Montero, IJ Mir n, JJ Criado-Álvarez, C Linares, and J Díaz. Influence of local factors in the relationship between mortality and heat waves : Castile-la mancha (1975–2003). *Science of the Total Environment*, 414 :73–80, 2012. (Cité en page 9.)
- Vincent Moron and Andrew W Robertson. Tropical rainfall subseasonal-to-seasonal predictability types. *npj climate and atmospheric science*, 3(1) :4, 2020. (Cité en page 11.)
- Vincent Moron, Andrew W Robertson, and Frédéric Vitart. Sub-seasonal to seasonal predictability and prediction of monsoon climates, 2018. (Cité en page 11.)
- Vincent Moron, Rodrigo Bombardi, Harry Hendon, Andrew Marshall, Atul Kumar Sahai, and Rajib Chattopadhyay. Monsoon sub-seasonal prediction. In *The Multiscale Global Monsoon System*, pages 327–340. World Scientific, 2020. (Cité en page 11.)
- Gamuchirai J Mukura, Olena Dubovyk, and Francis K Muthoni. Remote sensing-based land degradation assessment to inform sustainable development goal 15.3 : A case study in ghana, west africa. 2023. (Cité en page 5.)
- Stefan Mulitza, David Heslop, Daniela Pittauerova, Helmut W Fischer, Inka Meyer, Jan-Berend Stuut, Matthias Zabel, Gesine Mollenhauer, James A Collins, Henning Kuhnert, et al. Increase in african dust flux at the onset of commercial agriculture in the sahel region. *Nature*, 466(7303) :226–228, 2010. (Cité en page 9.)
- Katlego P Ncongwane, Joel O Botai, Venkataraman Sivakumar, and Christina M Botai. A literature review of the impacts of heat stress on human health across africa. *Sustainability*, 13(9) :5312, 2021. (Cité en page 5.)
- Ina Neher, Susanne Crewell, Stefanie Meilinger, Uwe Pfeifroth, and J rg Trentmann. Photovoltaic power potential in west africa using long-term satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21) :12871–12888, 2020. (Cité en page 6.)
- Cedric G Ngoungue Languie, Christophe Lavaysse, Mathieu Vrac, Philippe Peyrille, and Cyrille Flamant. Seasonal forecasts of the saharan heat low characteristics : A multi-model assessment. *Weather and Climate Dynamics*, 2(3) :893–912, 2021. (Cité en page 61.)
- Cedric Gacial Ngoungue Languie, Christophe Lavaysse, Mathieu Vrac, and Cyrille Flamant. Heat waves monitoring over west african cities : uncertainties, characterization and recent trends. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2022 :1–33, 2022. (Cité en pages 38 et 58.)

- Papa Massar Niane, Nadège Martiny, Pascal Roucou, Nicolas Marilleau, Serge Janicot, and Amadou Thierno Gaye. Assessments for the effect of mineral dust on the spring heat waves in the sahel. *Atmosphere*, 14(9) :1373, 2023. (Cité en page 78.)
- S.E. Nicholson, A.I. Barcilon, M. Challa, and J. Baum. Wave activity on the tropical easterly jet. *J. of the Atmospheric Sciences*, 64 :2756–2763, 2007. (Cité en page 8.)
- Sharon E Nicholson. A detailed look at the recent drought situation in the greater horn of africa. *Journal of Arid Environments*, 103 :71–79, 2014. (Cité en page 11.)
- G Ofori-Peasah, E Ofori Antwi, and W Blyth. Factors characterising energy security in west africa : An integrative review of the literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148 :111259, 2021. (Cité en page 6.)
- Debbie O’Sullivan, Franco Marengo, Claire L Ryder, Yaswant Pradhan, Zak Kipling, Ben Johnson, Angela Benedetti, Melissa Brooks, Matthew McGill, John Yorks, et al. Models transport saharan dust too low in the atmosphere : a comparison of the metum and cams forecasts with observations. *Atmospheric chemistry and physics*, 20(21) :12955–12982, 2020. (Cité en page 10.)
- Africa Energy Outlook. A focus on energy prospects in sub-saharan africa. *International Energy Agency IEA*, 2014. (Cité en page 6.)
- Ayobami S Oyewo, Sebastian Sterl, Siavash Khalili, and Christian Breyer. Highly renewable energy systems in africa : Rationale, research, and recommendations. *Joule*, 2023. (Cité en page 6.)
- Chigbogu G Ozoegwu and Patrick U Akpan. A review and appraisal of nigeria’s solar energy policy objectives and strategies against the backdrop of the renewable energy policy of the economic community of west african states. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143 :110887, 2021. (Cité en page 6.)
- Hans-Jürgen Panitz, Alessandro Dosio, Matthias Büchner, Daniel Lüthi, and Klaus Keuler. Cosmo-clm (cclm) climate simulations over cordex-africa domain : analysis of the era-interim driven simulations at 0.44 and 0.22 resolution. *Climate dynamics*, 42 :3015–3038, 2014. (Cité en page 12.)
- G. Panthou, T. Vischel, T. Lebel, J. Blanchet, G. Quantin, and A. Ali. Extreme rainfall in West Africa : a regional modeling. *Water Res. Res.*, 48 : doi :10.1029/2012WR012052, 2012. (Cité en page 8.)
- Jeremy Panthou, Théo Vischel, and Thierry Lebel. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the central sahel. *International Journal of Climatology*, 34 (15) :3998–4006, 2014. (Cité en pages 8 et 79.)
- S Pietzsch and P Bissolli. A modified drought index for wmo ra vi. *Advances in Science and Research*, 6(1) :275–279, 2011. (Cité en page 8.)

- Jennifer SR Pirret, Joseph D Daron, Philip E Bett, Nicolas Fournier, and Andre Kamga Foamouhoue. Assessing the skill and reliability of seasonal climate forecasts in sahelian west africa. *Weather and Forecasting*, 35(3) :1035–1050, 2020. (Cité en page 13.)
- Ashley Pople, Ruth Hill, Stefan Dercon, and Ben Brunckhorst. Anticipatory cash transfers in climate disaster response. 2021. (Cité en page 7.)
- Joseph M Prospero and Peter J Lamb. African droughts and dust transport to the caribbean : Climate change implications. *Science*, 302(5647) :1024–1027, 2003. (Cité en page 9.)
- Agnes R Quisumbing, Neha Kumar, and Julia A Behrman. Do shocks affect men’s and women’s assets differently? evidence from bangladesh and uganda. *Development Policy Review*, 36(1) :3–34, 2018. (Cité en page 7.)
- Emmanuel Wendsongre Ramdé, Yao Azoumah, Abeeku Brew-Hammond, Anselme Rungundu, and Gildas Tapsoba. Site ranking and potential assessment for concentrating solar power in west africa. 2013. (Cité en page 6.)
- Emmanuel Wendsongre Ramde, Eric Tutu Tchao, Yesuenyegbe Atsu Kwabla Fiagbe, Jerry John Kponyo, and Asakipaam Simon Atuah. Pilot low-cost concentrating solar power systems deployment in sub-saharan africa : a case study of implementation challenges. *Sustainability*, 12(15) :6223, 2020. (Cité en page 6.)
- Steve Rayner, Denise Lach, and Helen Ingram. Weather forecasts are for wimps : why water resource managers do not use climate forecasts. *Climatic change*, 69 (2) :197–227, 2005. (Cité en page 12.)
- Burkhard Rockel, Andreas Will, and Andreas Hense. The regional climate model cosmo-clm (ccm). *Meteorologische zeitschrift*, 17(4) :347, 2008. (Cité en page 11.)
- Joacim Rocklov, Adrian G Barnett, and Alistair Woodward. On the estimation of heat-intensity and heat-duration effects in time series models of temperature-related mortality in stockholm, sweden. *Environmental Health*, 11 :1–12, 2012. (Cité en page 9.)
- Belén Rodríguez-Fonseca, Serge Janicot, Elsa Mohino, Teresa Losada, Juergen Bader, Cyril Caminade, Fabrice Chauvin, Bernard Fontaine, Javier García-Serrano, Sebastien Gervois, et al. Interannual and decadal sst-forced responses of the west african monsoon. *Atmospheric Science Letters*, 12(1) :67–74, 2011. (Cité en page 11.)
- Romain Roehrig, Dominique Bouniol, Françoise Guichard, Frédéric Hourdin, and Jean-Luc Redelsperger. The present and future of the west african monsoon : A process-oriented assessment of cmip5 simulations along the amma transect. *Journal of Climate*, 26(17) :6471–6505, 2013. (Cité en page 12.)

- Philippe Roudier, Benjamin Sultan, Philippe Quirion, and Alexis Berg. The impact of future climate change on west african crop yields : What does the recent literature say? *Global environmental change*, 21(3) :1073–1083, 2011. (Cité en page 5.)
- PM Ruti, JE Williams, F Hourdin, F Guichard, A Boone, P Van Velthoven, F Favot, I Musat, Markku Rummukainen, M Domínguez, et al. The west african climate system : a review of the amma model inter-comparison initiatives. *Atmospheric Science Letters*, 12(1) :116–122, 2011. (Cité en page 11.)
- Seyni Salack, Alessandra Giannini, Moussa Diakhaté, Amadou T Gaye, and Bertrand Muller. Oceanic influence on the sub-seasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the west african sahel. *Climate dynamics*, 42 :189–201, 2014. (Cité en page 8.)
- Seyni Salack, Cornelia Klein, Alessandra Giannini, Benoit Sarr, Omonlola N Worou, Nuhoun Belko, Jan Bliefernicht, and Harald Kunstman. Global warming induced hybrid rainy seasons in the sahel. *Environmental Research Letters*, 11(10) :104008, 2016. (Cité en page 8.)
- Souleymane Sanogo, Andreas H Fink, Jerome A Omotosho, Abdramane Ba, Robert Redl, and Volker Ermert. Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in west africa. *International Journal of Climatology*, 35(15) :4589–4605, 2015. (Cité en page 8.)
- Aly Sanoh, Ayse Selin Kocaman, Selcuk Kocal, Shaky Sherpa, and Vijay Modi. The economics of clean energy resource development and grid interconnection in africa. *Renewable Energy*, 62 :598–609, 2014. (Cité en page 6.)
- Mamadou Adama Sarr, Philippe Gachon, Ousmane Seidou, Christopher Robin Bryant, Jacques André Ndione, and Jacques Comby. Inconsistent linear trends in senegalese rainfall indices from 1950 to 2007. *Hydrological sciences journal*, 60 (9) :1538–1549, 2015. (Cité en page 8.)
- Windmanagda Sawadogo, Babatunde J Abiodun, and Emmanuel Chilekwu Okogbue. Projected changes in wind energy potential over west africa under the global warming of 1.5 c and above. *Theoretical and Applied Climatology*, 138 :321–333, 2019. (Cité en page 7.)
- Windmanagda Sawadogo, Babatunde J Abiodun, and Emmanuel C Okogbue. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over west africa. *Renewable Energy*, 151 :263–277, 2020. (Cité en page 6.)
- Kerstin Schepanski, Cyrille Flamant, J-P Chaboureau, Cécile Kocha, JR Banks, HE Brindley, Christophe Lavaysse, Fabien Marnas, Jacques Pelon, and Pierre Tulet. Characterization of dust emission from alluvial sources using aircraft observations and high-resolution modeling. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(13) :7237–7259, 2013. (Cité en page 52.)

- C Schmechtig, B Marticorena, B Chatenet, G Bergametti, Jean-Louis Rajot, and A Coman. Simulation of the mineral dust content over western africa from the event to the annual scale with the chimere-dust model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(14) :7185–7207, 2011. (Cité en page 9.)
- J. Schmutz, C. Lavaysse, C. Flamant, and L. Kergoat. Forecasting the dust loading for the next dry season in the sahel. *To be submitted*, 2024. (Cité en page 44.)
- Kwami Senam A Sedzro, Adekunlé Akim Salami, Pierre Akuété Agbessi, and Mawugno Koffi Kodjo. Comparative study of wind energy potential estimation methods for wind sites in togo and benin (west sub-saharan africa). *Energies*, 15(22) :8654, 2022. (Cité en page 7.)
- Hanieh Seyedhashemi, Benoît Hingray, Christophe Lavaysse, and Théo Chamarande. The impact of low-resource periods on the reliability of wind power systems for rural electrification in africa. *Energies*, 14(11) :2978, 2021. (Cité en page 71.)
- Abba Gana Shettima, Usman A Tar, et al. Farmer-pastoralist conflict in west africa : Exploring the causes and consequences. *Information, society and justice journal*, 1(2) :163–184, 2008. (Cité en page 5.)
- Mannava VK Sivakumar. Impacts of sand storms/dust storms on agriculture. In *Natural disasters and extreme events in agriculture : impacts and mitigation*, pages 159–177. Springer, 2005. (Cité en page 9.)
- Karen E Smoyer-Tomic, Robyn Kuhn, and Alana Hudson. Heat wave hazards : an overview of heat wave impacts in canada. *Natural hazards*, 28 :465–486, 2003. (Cité en page 10.)
- Nathalie Söhne, Jean-Pierre Chaboureau, and Françoise Guichard. Verification of cloud cover forecast with satellite observation over west africa. *Monthly Weather Review*, 136(11) :4421–4434, 2008. (Cité en page 10.)
- Robert G Steadman. The assessment of sultriness. part i : A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18(7) :861–873, 1979. (Cité en page 10.)
- Robert G Steadman. A universal scale of apparent temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(12) :1674–1687, 1984. (Cité en page 10.)
- Sebastian Sterl, Stefan Liersch, Hagen Koch, Nicole PM van Lipzig, and Wim Thiery. A new approach for assessing synergies of solar and wind power : implications for west africa. *Environmental Research Letters*, 13(9) :094009, 2018. (Cité en page 6.)
- Sebastian Sterl, Inne Vanderkelen, Celray James Chawanda, Daniel Russo, Robert J Brecha, Ann Van Griensven, Nicole PM van Lipzig, and Wim Thiery. Smart renewable electricity portfolios in west africa. *Nature sustainability*, 3(9) :710–719, 2020. (Cité en page 6.)

- Friederike Suhr and Janina Isabel Steinert. Epidemiology of floods in sub-saharan africa : a systematic review of health outcomes. *BMC Public Health*, 22(1) :268, 2022. (Cité en page 5.)
- Benjamin Sultan and Marco Gaetani. Agriculture in west africa in the twenty-first century : climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in plant science*, 7 :211434, 2016. (Cité en page 5.)
- Richard Swinbank, Masayuki Kyouda, Piers Buchanan, Lizzie Froude, Thomas M Hamill, Tim D Hewson, Julia H Keller, Mio Matsueda, John Methven, Florian Pappenberger, et al. The tigge project and its achievements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1) :49–67, 2016. (Cité en page 10.)
- Ibrahima Sy, Birane Cissé, Babacar Ndao, Mory Touré, Abdoul Aziz Diouf, Mamadou Adama Sarr, Ousmane Ndiaye, Youssoupha Ndiaye, Daouda Badiane, Richard Lalou, et al. Heat waves and health risks in the northern part of senegal : analysing the distribution of temperature-related diseases and associated risk factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55) :83365–83377, 2022. (Cité en page 80.)
- Adama Sylla, Juliette Mignot, Xavier Capet, and Amadou Thierno Gaye. Weakening of the senegalo-mauritanian upwelling system under climate change. *Climate Dynamics*, 53 :4447–4473, 2019. (Cité en page 11.)
- Sandor Szabo, Katalin Bódis, Thomas Huld, and Magda Moner-Girona. Energy solutions in rural africa : mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension. *Environmental Research Letters*, 6(3) : 034002, 2011. (Cité en page 6.)
- Mateusz Taszarek, John T Allen, Mattia Marchio, and Harold E Brooks. Global climatology and trends in convective environments from era5 and rawinsonde data. *NPJ climate and atmospheric science*, 4(1) :35, 2021. (Cité en page 39.)
- Fowe Tazen, Abdoulaye Diarra, Rodrigue FW Kabore, Boubacar Ibrahim, Maïmouna Bologo/Traoré, Karim Traoré, and Harouna Karambiri. Trends in flood events and their relationship to extreme rainfall in an urban area of sahelian west africa : The case study of ouagadougou, burkina faso. *Journal of Flood Risk Management*, 12 :e12507, 2019. (Cité en page 8.)
- Martin C Todd, Richard Washington, José Vanderlei Martins, Oleg Dubovik, Gil Lizcano, Samuel M'bainayel, and Sebastian Engelstaedter. Mineral dust emission from the bodélé depression, northern chad, during bodex 2005. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 112(D6), 2007. (Cité en page 8.)
- MC Todd, CJ T Allen, M Bart, M Bechir, J Bentefouet, BJ Brooks, C Cavazos-Guerra, T Clovis, S Deyane, M Dieh, et al. Meteorological and dust aerosol conditions over the western saharan region observed at fennec supersite-2 during

- the intensive observation period in june 2011. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(15) :8426–8447, 2013. (Cité en page 52.)
- Adrian M Tompkins and Francesca Di Giuseppe. Potential predictability of malaria in africa using ecmwf monthly and seasonal climate forecasts. *Journal of applied meteorology and climatology*, 54(3) :521–540, 2015. (Cité en page 11.)
- Adrian M Tompkins and Laura Feudale. Seasonal ensemble predictions of west african monsoon precipitation in the ecmwf system 3 with a focus on the amma special observing period in 2006. *Weather and Forecasting*, 25(2) :768–788, 2010. (Cité en page 11.)
- Adrian M Tompkins, Rachel Lowe, Hannah Nissan, Nadège Martiny, Pascal Roucou, Madeleine C Thomson, and Tetsuo Nakazawa. Predicting climate impacts on health at sub-seasonal to seasonal timescales. In *Sub-Seasonal to Seasonal Prediction*, pages 455–477. Elsevier, 2019. (Cité en page 13.)
- Yves Tramblay, Gabriele Villarini, and Wei Zhang. Observed changes in flood hazard in africa. *Environmental Research Letters*, 15(10) :1040b5, 2020. (Cité en page 8.)
- Roderick Van der Linden, Andreas H Fink, Joaquim G Pinto, and Tan Phan-Van. The dynamics of an extreme precipitation event in northeastern vietnam in 2015 and its predictability in the ecmwf ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 32(3) :1041–1056, 2017. (Cité en page 10.)
- Michael Vellinga and Sean F Milton. Drivers of interannual variability of the east african “long rains”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(712) :861–876, 2018. (Cité en page 11.)
- Nicolas Vigaud, Michael K Tippett, and Andrew W Robertson. Deterministic skill of subseasonal precipitation forecasts for the east africa-west asia sector from september to may. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124(22) :11887–11896, 2019. (Cité en page 11.)
- F. Vitart, C. Cunningham, M. DeFlorio, E. Dutra, L. Ferranti, B. Golding, and et al. Subseasonal to seasonal prediction of weather extremes. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811714-9.00017-6> :1–340, 2019. (Cité en pages 29 et 58.)
- Frédéric Vitart. Evolution of ecmwf sub-seasonal forecast skill scores. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(683) :1889–1899, 2014. (Cité en page 10.)
- Frederic Vitart, Constantin Ardilouze, Axel Bonet, Anca Brookshaw, M Chen, C Codorean, M Déqué, L Ferranti, E Fucile, M Fuentes, et al. The subseasonal to seasonal (s2s) prediction project database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1) :163–173, 2017. (Cité en page 10.)

- Peter Vogel, Peter Knippertz, Andreas H Fink, Andreas Schlueter, and Tilmann Gneiting. Skill of global raw and postprocessed ensemble predictions of rainfall over northern tropical africa. *Weather and Forecasting*, 33(2) :369–388, 2018. (Cité en page 10.)
- Jürgen V Vogt, Paulo Barbosa, Carmelo Cammalleri, Hugo Carrão, and Christophe Lavaysse. Drought risk management : Needs and experiences in europe. *Drought and Water Crises : Integrating Science, Management, and Policy*, page 385, 2017. (Cité en page 69.)
- M. Vrac, P. Drobinski, A. Merlo, H. Herrmann, C. Lavaysse, L. Li, and S. Somot. Dynamical and statistical downscaling of the french mediterranean climate : uncertainty assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 12 :doi :10.5194/nhess-12-2769-2012, 2012. (Cité en pages 28, 29 et 64.)
- Weijie Wang, Amato T Evan, Cyrille Flamant, and Christophe Lavaysse. On the decadal scale correlation between african dust and sahel rainfall : The role of saharan heat low–forced winds. *Science advances*, 1(9) :e1500646, 2015. (Cité en page 50.)
- Weijie Wang, Amato T Evan, Christophe Lavaysse, and Cyrille Flamant. The role the saharan heat low plays in dust emission and transport during summertime in north africa. *Aeolian Research*, 28 :1–12, 2017. (Cité en page 49.)
- Nick Watts, W Neil Adger, Paolo Agnolucci, Jason Blackstock, Peter Byass, Wenjia Cai, Sarah Chaytor, Tim Colbourn, Mat Collins, Adam Cooper, et al. Health and climate change : policy responses to protect public health. *The lancet*, 386 (10006) :1861–1914, 2015. (Cité en page 5.)
- Bruce R White. Soil transport by winds on mars. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 84(B9) :4643–4651, 1979. (Cité en page 9.)
- Thomas J Wilbanks and Robert W Kates. Beyond adapting to climate change : embedding adaptation in responses to multiple threats and stresses. In *Geography of Climate Change*, pages 6–15. Routledge, 2013. (Cité en page 12.)
- Donald A Wilhite, Mannava VK Sivakumar, and Roger Pulwarty. Managing drought risk in a changing climate : The role of national drought policy. *Weather and climate extremes*, 3 :4–13, 2014. (Cité en page 8.)
- Eric-Pascal Zahiri, Ibrahim Bamba, Adjoua Moise Famien, Augustin Kadjo Koffi, and Abé Delfin Ochou. Mesoscale extreme rainfall events in west africa : the cases of niamey (niger) and the upper ouémé valley (benin). *Weather and Climate Extremes*, 13 :15–34, 2016. (Cité en page 8.)
- Jian Zuo, Stephen Pullen, Jasmine Palmer, Helen Bennetts, Nicholas Chileshe, and Tony Ma. Impacts of heat waves and corresponding measures : a review. *Journal of Cleaner Production*, 92 :1–12, 2015. (Cité en page 10.)