



HAL
open science

Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : analyse au moyen de la classification de Köppen et des “ types de climats annuels ”.

Eveno Maëlle, Olivier Planchon., Oszwald Johan, Vincent Dubreuil, Hervé Quénol

► To cite this version:

Eveno Maëlle, Olivier Planchon., Oszwald Johan, Vincent Dubreuil, Hervé Quénol. Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : analyse au moyen de la classification de Köppen et des “ types de climats annuels ”. Climatologie, 2016, 13, pp.47-70. 10.4267/climatologie.1203 . hal-01474598

HAL Id: hal-01474598

<https://hal.science/hal-01474598>

Submitted on 31 Mar 2024

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.

VARIABILITÉ ET CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE DE 1951 À 2010 : ANALYSE AU MOYEN DE LA CLASSIFICATION DE KÖPPEN ET DES « TYPES DE CLIMATS ANNUELS »

Maëlle EVENO, Olivier PLANCHON, Johan OSZWALD,
Vincent DUBREUIL, Hervé QUÉNOL

LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS - Université Rennes-2

Place Recteur H. Le Moal, 35043 Rennes Cedex – France

maelle.eveno@uhb.fr, olivier.planchon@uhb.fr, johan.oszwald@uhb.fr,

vincent.dubreuil@uhb.fr, herve.quenol@uhb.fr

Résumé

Le contexte actuel de changement climatique global soulève de nombreuses questions quant à l'évolution des climats aux échelles régionales et locales. La littérature scientifique, de plus en plus riche à ce sujet, mérite d'être approfondie. La méthode des « Types de Climats Annuels » (TCA) a été utilisée, selon la classification climatique de Köppen, afin d'analyser la variabilité spatio-temporelle du climat en France. À l'échelle régionale, les fréquences d'apparition des TCA ont été étudiées pour 110 stations, pour la période 1951-2010 et pour les deux sous-périodes 1951-1980 et 1981-2010. Les résultats font ressortir : (1) l'influence de la latitude, de la continentalité et du relief sur la répartition spatiale des TCA sur l'ensemble de la période (1951-2010) ; (2) l'augmentation des fréquences d'apparition des « nouveaux TCA » à été chaud (types *Csa* et *Cfa*) à partir des années 1980, notamment dans le Sud de la France. Ces nouveaux TCA soulignent à leur tour certains contrastes régionaux.

Mots-clés : Variabilité et changement climatique, Type de Climat Annuels (TCA), classification climatique de Köppen.

Abstract:

Climate variability and climate change in France from 1951 to 2010: analysis using Köppen classification and “Annual Climate Types”

The current context of global climate change raises numerous studies about climate change at regional and local scale. More and more studies have been made about this topic, but deserve to be deepened. Using the Köppen climate classification, the method of the “Annual Climate Types” (TCA in French) has been used to analyze the spatial and temporal variability of climate in France. At a regional level, TCA's occurrence frequencies have been analyzed for 110 stations over a sixty-year period (1951-2010) and two sub-periods (1951-1980 and 1981-2010). The results have highlighted: (1) the contribution of latitude, continentality and topography on TCA's spatial distribution over the whole period (1951-2010); (2) the increase of occurrence frequencies of the “new TCA” with hot summer (*Cfa* and *Csa types*) since the 1980's, especially in the South of France. The new TCA highlight some regional climatic contrasts.

Keywords: Climate variability, climate change, Annual Climate Types (TCA in French), Köppen-Geiger climate classification.

Introduction et problématique

Le changement climatique global et le risque élevé d'une redistribution de la répartition spatiale des climats régionaux en Europe, et particulièrement en France, avant la fin du XXI^{ème} siècle (Rubel et Kottek, 2010 ; Jouzel *et al.*, 2014 ; Planchon *et al.*, 2014) pourrait être lourds de conséquences pour les activités humaines comme dans le domaine agricole (Iglesias *et al.*, 2009 ; European Commission, 2013). L'agriculture peut en effet être exposée aux effets du changement climatique notamment par le biais de certaines activités agricoles directement

dépendantes des conditions météorologiques. Les impacts de ce changement climatique pourraient concerner de possibles modifications des températures, des précipitations annuelles et des événements extrêmes (canicules, sécheresses, tempêtes et inondations). De nombreux auteurs ont également développé des méthodologies de classifications climatiques afin de préciser davantage la question de l'évolution des climats régionaux. La plupart de ces classifications sont fondées sur le comportement et les exigences des végétaux afin de déterminer des grandes zones climatiques à la surface du globe. En France, les auteurs De Martonne (1942), Viers (1968), Durand-Dastès et Sanders (1984) ou plus récemment Joly *et al.* (2010) ont mis en exergue différents seuils climatiques par le biais des statistiques. Malgré les difficultés de disponibilité des données climatiques, ils spatialisent les climats régionaux sur le territoire français et mettent en avant certaines disparités locales, notamment les effets du relief, de la continentalité ou encore de la méridionalité.

À l'échelle globale, M. Kottek *et al.* (2006) ont utilisé la classification des climats mondiaux de W. Köppen afin de disposer d'une base de données sur l'ensemble du XX^{ème} siècle susceptible d'être intégrée aux simulations numériques de scénarios de changement climatique global (Rubel et Kottek, 2010). La classification de W. Köppen, élaborée dès 1900 et dont les aspects pratiques lui ont valu un succès tel qu'elle est toujours utilisée depuis plus d'un siècle, est assortie de nombreuses adaptations par divers auteurs au fil du temps (Hantel, 1989 ; Essenwanger, 2001).

En Europe occidentale et centrale, les scénarios de changement climatique font apparaître deux grandes tendances : d'une part, l'apparition et l'extension de climats à sécheresse d'été (types *Csa* et *Csb*) en Europe de l'Ouest océanique ; d'autre part, l'extension du climat à été chaud et sans période sèche (*Cfa*) en Europe centrale et en France de l'Est. Alors que le climat « *de type méditerranéen* » ou *Csa* (hiver doux, été chaud à période sèche) semble bloqué sur sa limite nord actuelle, une double et très forte incertitude concerne, en France, d'une part la délimitation entre les nouveaux types de climats à période sèche estivale (à l'Ouest du pays) et ceux sans saison sèche (à l'Est) ; d'autre part, l'ampleur de l'extension vers le nord des climats à été chaud. Mis à part le domaine méditerranéen, la distribution des types de climats en France telle qu'on la connaît actuellement risque d'être reconfigurée, en particulier sur la partie moyenne du pays où le degré d'incertitude est très élevé d'un scénario à l'autre. Afin d'étudier cette évolution du climat, il s'agit donc, dans cet article, d'utiliser la méthode combinée de la classification des climats de Köppen et des Types de Climats Annuels pour une centaine de stations française et d'étudier la manière dont leur fréquence d'apparition dans le temps et dans l'espace s'est modifiée au cours de la période 1951-2010.

1. Données et méthodes

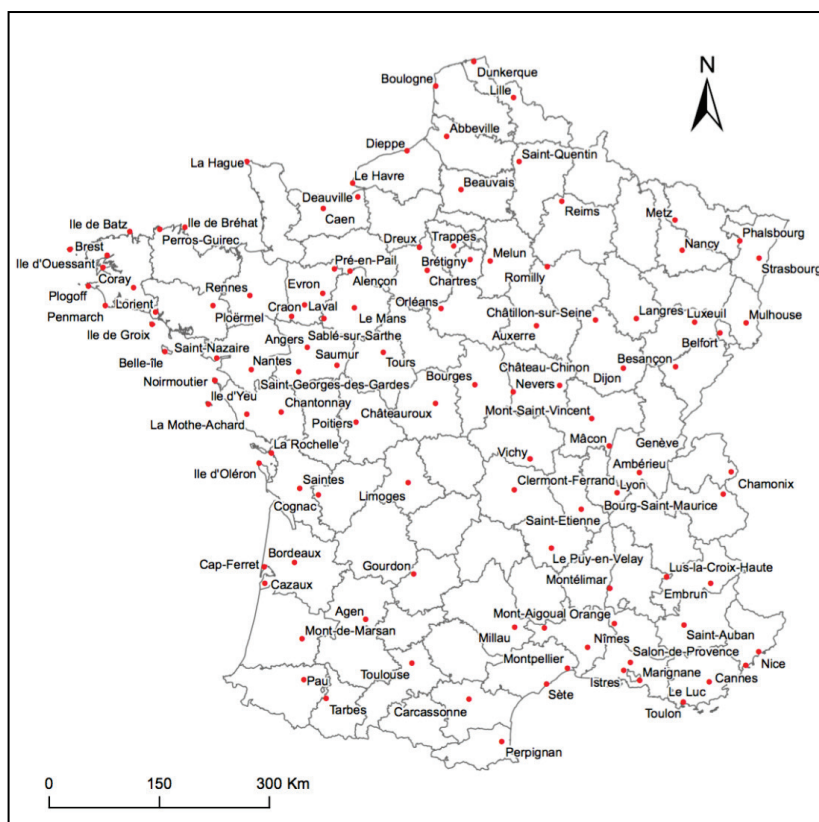
1.1. Les données climatiques

Les données climatiques (précipitations et températures moyennes mensuelles) de 110 stations extraites de la base de données de Météo-France et de Météo-Suisse ont été sélectionnées sur l'ensemble de la France métropolitaine (hors Corse) et en Suisse (Genève), de 42° à 51° N (figure 1). Les 110 stations ont été retenues pour leurs séries de données complètes (couvrant la période 1951-2010). Malgré des séries complètes, certaines stations ont néanmoins été ensuite rejetées du fait de leur proximité géographique avec d'autres stations (Bourges et Avord-Farges, ou Avrillé et Beaucouzé), ou de leur localisation à l'intérieur de grandes agglomérations (Paris-Le Bourget, Paris-Montsouris et Marseille), où la présence d'îlot de chaleur urbain peut biaiser les résultats (Escourrou, 1990 ; Cantat, 2004). Les stations de basse altitude ont été privilégiées, afin de minimiser le caractère fortement discriminant des stations de montagne dans les analyses statistiques (voir 1.2.3.). La densité

du réseau de stations retenues est donc moins forte sur les régions montagneuses, mais ce travail ne porte pas spécifiquement sur les climats de montagne.

La période d'analyse s'étale sur 60 ans (de 1951 à 2010) et permet donc une subdivision en deux sous-périodes trentenaires (1951-1980 et 1981-2010), périodes recommandées par l'OMM qui permettent d'évaluer la variabilité du climat et de mettre en évidence les évolutions stationnelles récentes.

Figure 1 : Localisation des stations 110 synoptiques sélectionnées en France. *Location of the 110 selected weather stations in mainland France.*



1.2. Méthodologie

1.2.1. Classification climatique de Köppen-Geiger

Afin de déceler d'éventuelles évolutions susceptibles de confirmer les résultats obtenus par F. Rubel et M. Kottke (2010) en tenant compte de la variabilité climatique interannuelle, la démarche des « *Types de Climats Annuels* » (TCA) a été adoptée en utilisant la classification climatique de Köppen (tableau 1). L'expression « *Type de Climat Annuel* » a déjà été employée pour définir l'ambiance climatique d'une année donnée (Brisse *et al.*, 1982). La classification de W. Köppen a quant à elle déjà été appliquée à ce type de démarche dans d'autres travaux (sur le nord-ouest argentin : Planchon et Rosier, 2005 ; sur la France : Quénot *et al.*, 2008).

En dehors des climats marqués par l'aridité, la classification de W. Köppen permet de différencier les climats de type méditerranéen, à sécheresse d'été (C_s : le mois le plus sec d'été reçoit moins de 1/3 des précipitations du mois le plus arrosé d'hiver), des climats subtropicaux, à pluies d'été (C_w : le mois le plus sec d'hiver reçoit moins de 1/10 des précipitations du mois le plus arrosé d'été). Un régime est dit « à période sèche » lorsqu'au moins un mois dans l'année est considéré comme sec. Cette méthode pose toutefois quelques problèmes, en particulier pour les climats C_s , censés comporter une « sécheresse estivale ».

		PRÉCIPITATIONS			
		Réparties sur toute l'année	L'été	L'hiver	Insuffisantes toute l'année
Régimes thermiques	T- > 18°C	Af	Aw	As	B
	T+ > 10°C -3 < T- < 18°C	Cf	Cw	Cs	
	T+ > 10°C T- < -3°C	Df	Dw	Ds	
	0 < T+ < 10°C	ET			
	T+ < 0°C	EF			

T- : température moyenne du mois le plus froid

T+ : température moyenne du mois le plus chaud

Tableau 1 : Synthèse de la classification de Köppen (d'après C. P. Péguy, 1970 et W. Lauer, 1993). *Synthesis of Köppen's classification (adapted from C.P. Péguy, 1970 and W. Lauer, 1993).*

En effet, certaines bordures montagneuses au climat pluvieux à rythme saisonnièrement contrasté, car directement exposées aux systèmes perturbés d'ouest en saison froide, sont dans ce cas classés *Cs* alors qu'en réalité, le soutirage par évaporation durant le mois le moins arrosé ne permet pas de parler de « sécheresse » (par exemple dans le centre-sud du Chili : Walter, 1984). Inversement, des régions au climat tempéré chaud, mais abritées et ainsi soumises à des régimes pluviométriques relativement modérés, sont classées « sans sécheresse », alors que les conditions de chaleur estivale devraient permettre de parler de sécheresse, au moins au cœur de l'été (par exemple sur la côte adriatique de l'Italie péninsulaire : Cantù, 1977 ; Pinna et Vittorini, 1985).

Les définitions de la sécheresse ont fait l'objet de nombreuses études, visant à délimiter le climat méditerranéen. Des valeurs « critiques » ont été déterminées par rapport aux formations végétales. F. Bagnouls et H. Gaussen (1957) ont défini un seuil de mois sec selon lequel les précipitations moyennes, exprimées en mm, sont inférieures au double de la température, exprimée en °C. C'est ce seuil qui a été retenu au titre de « correctif » de la classification de Köppen pour définir un régime « à période sèche » d'été (noté *s*). Ainsi, le climat est classé *Cs* si au moins un des trois mois d'été (juin, juillet, août dans l'hémisphère Nord) présente des valeurs de précipitations et températures moyennes de type « $P \leq 2T$ ». Les résultats obtenus dans de précédents travaux ont montré que ce correctif ne modifie pas (à quelques exceptions près) la trame climatique générale de la classification de Köppen (Planchon et Rosier, 2005 ; Quénot *et al.*, 2008 ; Quénot *et al.*, 2014 ; Planchon *et al.*, 2014). Ainsi, la distribution et la délimitation des deux principaux types de climats de France métropolitaine, c'est-à-dire *Csa* dans les régions méditerranéennes du sud-est et *Cfb* dans le reste du pays, n'est pas remise en cause par ce changement de définition du régime pluviométrique à période sèche d'été. En revanche, des différences ont parfois été notées localement et pourraient faire l'objet d'une modification ultérieure en déterminant le correctif à au moins deux des trois mois d'été observant des valeurs de précipitations et de températures moyennes de type « $P \leq 2T$ », au lieu d'un mois au moins (Dubreuil, 1994).

Concernant les sous types "a" et "b", s'appliquant aussi bien aux types *Cs*, *Cw* ou *Cf*, ils permettent de différencier les climats aux étés chauds (température moyenne du mois le plus chaud supérieure à 22°C pour le type "a") et ceux aux étés frais (température moyenne du mois le plus chaud inférieure à 22°C pour le type "b"). Enfin, le sous type "c" s'applique pour les cas où moins de quatre mois ont une température moyenne supérieure à 10°C.

1.2.2. Prétraitements des séries de données

Les TCA ont été calculés pour la période 1951-2010 à partir des données climatiques mensuelles (températures et précipitations) pour l'ensemble des 110 stations. Afin d'illustrer

les transitions climatiques entre les nuances climatiques océaniques et celles plus continentales, un choix de quelques stations a été retenu pour une analyse détaillée, en fonction de leur position en latitude, longitude, et par rapport aux grands ensembles de reliefs environnants.

Suite aux tests statistiques réalisés sur les séries de données de température et de précipitations, les premiers résultats ont montré (1) une tendance significative à l'augmentation des températures sur la période d'étude (1951-2010) pour une majeure partie (55 %) des stations ; (2) une rupture significative des séries pluvio-thermiques entre la fin des années 70 et le début des années 80 (respectivement 28 % pour les séries pluviométriques et 32 % pour celles thermiques). Ces résultats corroborent les résultats déjà présentés dans la littérature scientifique (Hansen *et al.*, 2010 ; Jones *et al.*, 2012 ; Reid *et al.*, 2016) et justifient le choix de la partition de la période d'étude en deux sous-périodes (1951-1980 et 1981-2010).

1.2.3. Analyses factorielles et classifications automatiques

À partir des statistiques, nous souhaitons analyser le jeu de données, notamment les ressemblances entre les stations afin de réaliser une classification des individus en fonction des TCA. Pour ce faire, pour chacune des deux sous-périodes préalablement définies, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été calculée avec les fréquences des 4 TCA (*Cfb* et *Csb*, *Cfa* et *Csa*). L'ACP a été privilégiée parce que, d'une part, les données du tableau réalisé sont quantitatives et continues, d'autre part, l'ACP est un moyen d'identifier les individus qui ont des caractéristiques communes de fréquences de TCA.

Ensuite, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH ; méthode de *Ward*) à partir des deux premières composantes des ACP a été effectuée pour chacune des deux sous-périodes (1951-1980 et 1981-2010) à partir des coordonnées factorielles principales de chaque individu. Une partition en 7 classes a été retenue (selon la méthode de *Huntsberger*) en vue d'une cartographie des résultats pour chaque sous-période. Le recours au test de *Monte-Carlo* vient confirmer que la partition en 7 classes est significative avec une *p*-value de 0,001.

1.2.4. Analyses cartographiques : interpolations spatiales

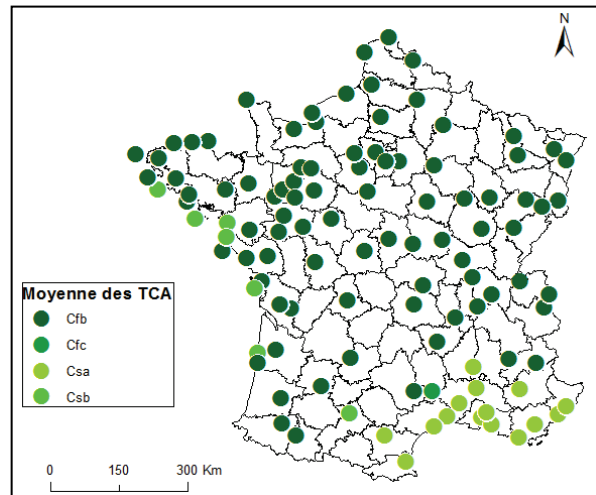
Une interpolation spatiale a également été réalisée au moyen de la méthode des moyennes mobiles pondérées par l'inverse à la distance (*Inverse Distance Weighted*). La majorité des stations est située à altitude faible ou modérée, inférieure à 900 mètres pour 97 % des stations et supérieure à 1000 mètres pour seulement 3 stations (Chamonix, 1042 m ; Lus-la-Croix-Haute, 1059 m ; Mont-Aigoual, 1567 m). Durand-Dastès et Sanders (1984) ont déjà mis l'accent sur le caractère original et complexe des données climatiques enregistrées dans les stations françaises situées à plus de 1000 mètres d'altitude. De ce fait, ils mettent en garde contre toute extrapolation faite à partir de ces stations et les retirent tout simplement de leur étude.

Les analyses géostatistiques ici menées mériteraient donc une étude approfondie qui prendrait en compte une répartition spatiale et altitudinale plus homogène des stations, ou qui retirerait les 3 stations situées à plus de 1000 mètres (Joly *et al.*, 2010). Cependant, ces interpolations spatiales ont été conservées, d'une part car ces trois stations sont présentes dans une partie du territoire où peu de stations météorologiques ont été retenues et d'autre part, dans le but d'appuyer les résultats et de les rendre plus lisibles au moyen d'une cartographie.

2. Résultats des fréquences d'apparition des TCA

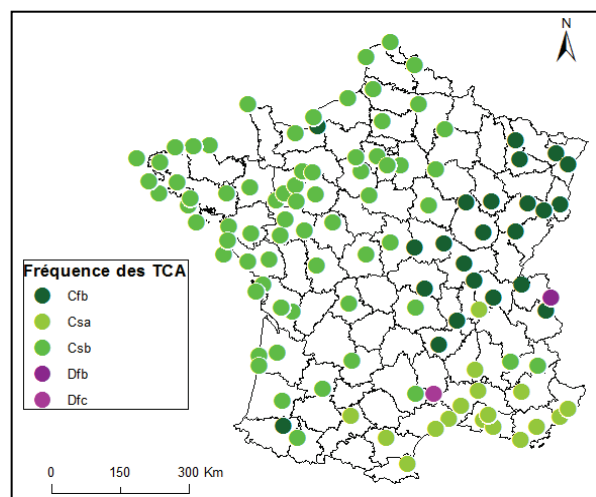
L'espace étudié est inclus dans le vaste domaine climatique de type *Cfb* (hiver doux, été frais, pas de période sèche), couvrant la plus grande partie de l'Europe occidentale et centrale (Kottek *et al.*, 2006). La plupart des stations étudiées sont situées à basse altitude et donc soumises, en moyenne pour la période 1951-2010, à ce type de climat. Certaines exceptions peuvent néanmoins être soulignées : le climat de type *Csa* est représentatif de la bordure méditerranéenne du sud-est de la France, où il est le TCA moyen sur l'ensemble de la période. Quelques stations atlantiques côtières ou insulaires sont quant à elles soumises, en moyenne, à un climat de type *Csb* (figure 2).

Figure 2 : Les quatre principaux TCA moyens en France (période 1951-2010). *The four major mean TCA in mainland France (from 1951 to 2010).*



L'analyse fréquentielle des TCA fait ressortir une vision des climats différente. En effet, le type *Csb* est en fait le plus fréquemment et majoritairement observé (plus de 50 % des années) sur un large quart nord-ouest de la France pendant la période étudiée et les stations retenues. Le type *Cfb* n'est présent que dans les régions de l'est, à l'exception de Pau et Deauville. Enfin, le type *Csa* semble « déborder » des régions méditerranéennes, en étant le TCA le plus fréquemment observé entre 1951 et 2010 à Lyon et à Toulouse (figure 3).

Figure 3 : TCA le plus fréquemment observé en France, en moyenne sur la période 1951-2010. *Most frequently observed TCA in mainland France in average from 1951 to 2010.*



2.1. L'effet prédominant de la continentalité : comparaison par transects ouest-est

Le type *Csb* est le TCA le plus fréquent (plus de 70 % des années) à proximité de la côte atlantique (climat à la fois océanique et maritime), puis sa fréquence diminue vers l'est. À

Brest en revanche, deux types sont présents quasiment à parts égales (à 53 % pour le *Csb* contre 47 % pour le *Cfb*). La position de cette station, proche de l'extrémité occidentale et relativement accidentée de la Bretagne, l'expose aux vents dominants d'ouest et aux perturbations en provenance de l'Océan Atlantique. Cette situation implique une fréquence importante des types de temps perturbés en toutes saisons (Planchon, 2000), d'où la forte occurrence d'années sans saison sèche estivale.

À l'échelle régionale, il a par ailleurs été démontré que les stations non côtières situées sur les bordures continentales exposées aux circulations perturbées dominantes étaient caractérisées par un total pluviométrique annuel important, caractéristique du climat dit *maritime*, climat sous-jacent du large domaine climatique tempéré océanique (Planchon, 1994 et 1997). De plus, il a été établi que le contraste thermique entre le continent et la mer qui se manifeste en saison chaude engendre les circulations de brises, qui, en pénétrant à l'intérieur des terres, accentuent le fléchissement pluviométrique d'été sur la bordure du continent (Planchon, 1997 et 2000). Jusqu'à Romilly, vers l'est, le type *Csb* reste prédominant, puisque le relief peu accidenté ne présente pas d'obstacle à la circulation des masses d'air d'origine océanique, qui, cependant, perdent leurs propriétés d'origine à mesure qu'elles pénètrent sur le pays. Par ailleurs, s'ajoute à la diminution de la fréquence du type *Csb* l'apparition de nouveaux types, notamment des types « *D* », climats aux contrastes thermiques saisonniers plus accentués du fait notamment des hivers plus froids. Cette apparition de TCA à hivers froids peut être associée à l'effet de la continentalité, de même que l'augmentation de la fréquence du type *Cfb*, traduisant une pluviosité estivale relativement plus abondante et qui devient ainsi le type le plus fréquent à Nancy sur l'ensemble de la période d'étude (figure 4).

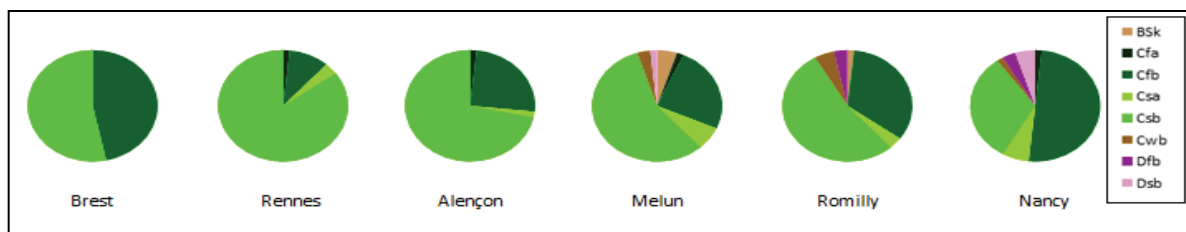


Figure 4 : Fréquence d'apparition des TCA pour six stations (48° N) sur la période 1951-2010 ; localisation des stations en Figure 1. *Frequency of TCA occurrence for six weather stations (48° N) from 1951 to 2010; location of the weather stations: see Figure 1.*

Dans les régions de plaine et bas plateaux du centre-ouest, l'été est, en moyenne et de peu (en juillet, mois le moins arrosé et le plus chaud : environ 40 à 50 mm pour une température moyenne comprise entre 19 et 20°C), une saison humide (*f*), mais la normale climatique masque la réalité : le régime pluviométrique de stations de la bordure atlantique telles que Nantes ou La Rochelle résulte de la succession d'années dont la majorité d'entre elles compte au moins un des trois mois d'été classé comme « sec ». Les mois secs n'étant pas les mêmes d'une année à l'autre, la moyenne a « effacé » la sécheresse d'été. Ce problème de représentativité (et de significativité) statistique de la moyenne pour les régimes pluviométriques des climats océaniques a notamment déjà été mis en avant par J.-P. Marchand (1981).

Ces résultats confirment ceux déjà obtenus avec les données de Saumur (Quénol *et al.*, 2008), située précisément au cœur du « pôle de sécheresse » identifié comme tel au moyen de plusieurs indices d'aridité (Dubreuil, 1994 et 1996) et illustrant, d'une manière plus générale, la sensibilité des régions de plaine de l'ouest de la France au risque de sécheresse estivale.

2.2. L'influence des reliefs du centre et du centre-est

Dans les régions du centre-est, la continentalité combinée à la proximité des massifs montagneux (étés plus arrosés) a pour effet de diminuer davantage encore la fréquence du type *Csb* en direction de l'est, au profit principalement du type *Cfb*. Le cas de la station de Limoges, qui jouit d'une situation en bordure occidentale du Massif Central, enregistre une fréquence d'apparition importante du type *Cfb*, bien que le *Csb* soit le type majoritaire (dans 50 % des cas, contre 42 % pour le *Cfb*). On assiste en effet à une exacerbation des précipitations en toute saison par effet pré-orographique (Vigneau, 1990). C'est aussi la continentalité qui fait apparaître (figure 5), en venant de l'ouest dans ces mêmes régions, les TCA de type « *D* » (climats à hiver froid) : de Clermont-Ferrand à Bourg-Saint-Maurice, de Genève à Vichy (Planchon *et al.*, 2014). Par ailleurs, la diversité des TCA est la plus importante à Clermont-Ferrand : située dans une dépression (Limagne) abritée par les monts d'Auvergne, la station bénéficie de conditions climatiques particulières, car fréquemment soumise à un effet de Foehn (Pagney, 1988 ; Choissnel et Payen, 1988). On recense ainsi neuf TCA différents sur l'ensemble de la période. De plus, le type *BSk* apparaît dans 8 % des cas sur la période 1951-2010, ce qui illustre bien le phénomène d'abri favorable aux faibles totaux pluviométriques annuels. Lyon et Bourg-Saint-Maurice, qui recensent quant à elles sept TCA différents sur la période, présentent toutefois d'importantes différences. Bourg-Saint-Maurice, de par sa situation en altitude (865 m) est soumise, pour 53 % des années, au type *Cfb*, les types « *D* » sont quant à eux présents dans 13 % des cas. À l'inverse, Lyon est très largement influencée par le type *Csb* (35 % des années sur la période), suivi du *Csa* (27 % des années sur la période). Cette dernière fréquence peut être expliquée par sa situation méridionale d'une part et d'autre part, par la localisation de la station dans la vallée du Rhône. L'effet de la continentalité est également favorable aux étés chauds dans les plaines et bassins de l'est de la France (Escourrou, 1982 ; Pagney, 1988) et l'ouverture de la vallée du Rhône sur la Mer Méditerranée favorise les influences méridionales. Par ailleurs, la présence, à Lyon, du type *Cfa* (dans 10 % des cas sur la période 1951-2010), est probablement due aux précipitations estivales à caractère orageux qui surviennent fréquemment dans la région (Favrot, 1953 ; Blanchet, 1993).

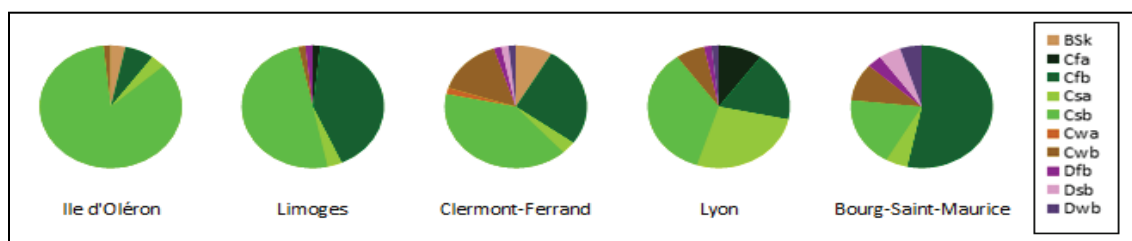


Figure 5 : Fréquence d'apparition des TCA pour cinq stations (entre 45° et 46° N) sur la période 1951-2010 ; localisation des stations en Figure 1. *Frequency of TCA occurrence for five weather stations (between 45° and 46°N) from 1951 to 2010; location of the weather stations: see Figure 1.*

2.3. Influence des étés chauds de la période 1981-2010 et contrastes régionaux

Sur l'ensemble de l'espace étudié, les types de climat à été chaud (représentés par la lettre « *a* ») semblent prendre de l'ampleur et leur limite septentrionale autrefois bien nette, localisée le long du pourtour méditerranéen, apparaît en deuxième sous-période (1981-2010) beaucoup moins distincte. De plus, cette augmentation paraît plus brutale dans les régions de l'est. En effet, les reliefs contrastés et les effets d'exposition jouent un rôle beaucoup plus important que dans les régions de bas plateaux et de collines du centre-ouest. À Lyon, où le TCA le plus fréquent était le type *Csb* entre 1951 et 1980 (50 % des cas), le type *Csa* est

devenu le plus fréquent (43 % des cas) dans la deuxième sous-période (1981-2010). Ce constat est encore plus marqué à Montélimar, ville située plus au Sud, puisque la fréquence des années *Csa* y est passée de 43 à 77 % entre les deux sous-périodes (figure 6a). Dans le Sud-ouest, les changements sont toutefois également remarquables. À Cognac et à Bordeaux, la fréquence d'apparition du type *Csa* augmente là encore. Même si, à Cognac, le TCA le plus fréquent reste le *Csb*, la fréquence du type *Csa* a fortement augmenté entre les deux sous-périodes, puisqu'on y relève 47 % d'années de type *Csb* et 40 % d'années de type *Csa* entre 1981 et 2010, contre 73% de type *Csb* et seulement 3 % de type *Csa* entre 1951 et 1980. À Bordeaux en revanche, la situation est semblable à celle de Lyon décrite précédemment, puisque le type *Csa* devient majoritaire en deuxième sous-période (le TCA passe de 3 % en première sous-période à 50 % durant la seconde ; figure 6b).

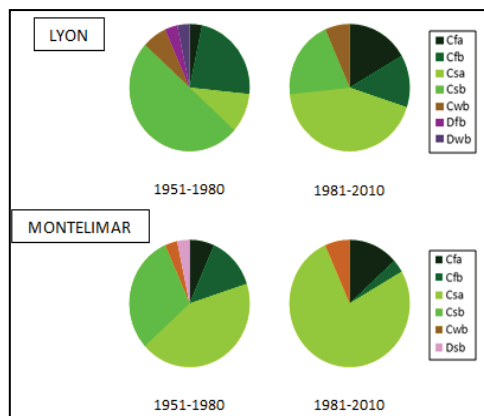


Figure 6a : Fréquence d'apparition des TCA pour deux stations du Sud-Est (Lyon – 45° N ; Montélimar – 44° N) pour les périodes 1951-1980 et 1981-2010. *Frequency of TCA occurrence for two southeasterly weather stations (Lyon – 45°N; Montélimar – 44°N).*

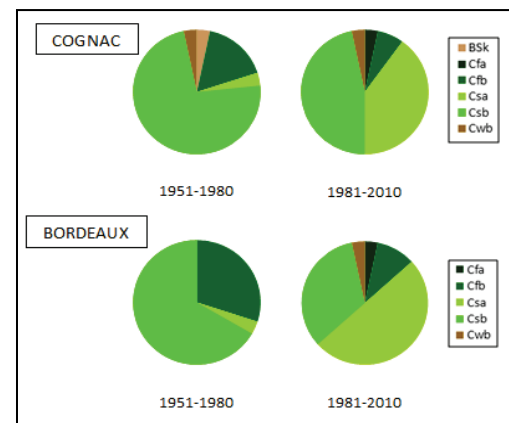


Figure 6b : Fréquence d'apparition des TCA pour deux stations du Sud-Ouest (Cognac – 45° N ; Bordeaux – 44° N) pour les périodes 1951-1980 et 1981-2010. *Frequency of TCA occurrence for two southwesterly weather stations (Cognac – 45°N; Bordeaux – 44°N).*

Le Val de Loire, tout comme le Grand Ouest français, subit également une évolution vers une sécheresse estivale plus marquée, parfois combinée à une augmentation des températures en été. Le cas particulier de Saumur, station en situation abritée, est particulièrement soumis à l'augmentation de ce « nouveau » TCA, puisque son apparition passe de 3 % (1951-1980) à 23 % (1981-2010) (figure 7). Ce constat a par ailleurs déjà été noté par P. Pédelaborde (1957), J. Mounier (1982), V. Dubreuil (1994 et 1996) ainsi que C. Lamy et V. Dubreuil (2013).

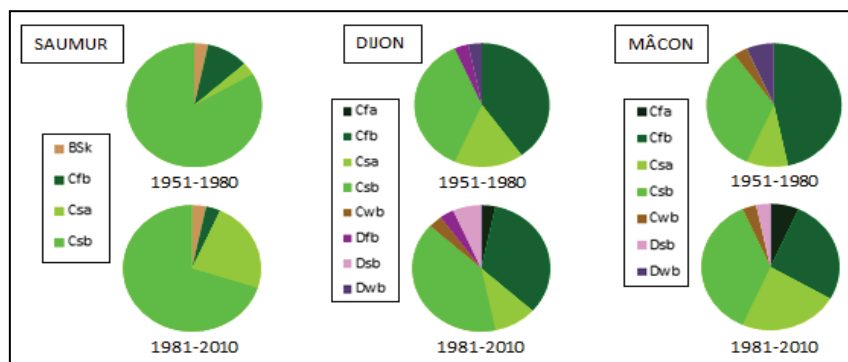


Figure 7 : Evolution des fréquences d'apparition des TCA à Saumur (47° N), Dijon (47° N) et Mâcon (46° N) entre 1951-1980 et 1981-2010. *Frequency of TCA occurrence at the weather stations of Saumur (47°N), Dijon (47°N) and Mâcon (46°N) from 1951 to 2010.*

La Bourgogne enregistre des fréquences plus contrastées. Mâcon, station située à l'extrémité méridionale du vignoble bourguignon, enregistre également une évolution en faveur du *Csa* à partir des années 80 (de 10 à 23 %). À l'inverse, la station de Dijon est soumise à une diminution de la fréquence d'apparition du *Csa* (de 17 à 10 %) entre 1951-1980 et 1981-2010, mais ce TCA reste tout de même présent sur l'ensemble de la période (figure 7).

Cette différence provient de l'effet de la méridionalité qui se marque davantage à Mâcon, entraînant des températures maximales estivales plus élevées qu'à Dijon. De plus, entre les plaines et plateaux du sud-est du bassin Parisien, au nord-ouest, et le couloir Saône-Rhône, à l'est, les plateaux bordants les dépressions et les monts plus élevés au sud (premiers véritables reliefs en venant de la côte atlantique à cette latitude), la région bourguignonne se situe au cœur d'une topographie complexe qui influe sur son climat aux échelles régionale et locale. En effet, à une échelle plus fine, température et précipitations subissent directement les contrastes orographiques : altitude, orientation et effet d'abri (Pagney, 1972).

Ainsi, la délimitation du climat de type *Csa*, confiné pour l'essentiel aux régions méditerranéennes en première sous-période, semble s'étendre en deuxième sous-période, aux espaces où prédominaient auparavant les TCA *Cfb* (régions de l'est) et *Csb* (régions de l'ouest). Ce résultat semble donc confirmer les scénarios les plus pessimistes avancés par le GIEC (*Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat*). C'est notamment le cas pour le scénario A1FI, qui prévoit une extension du type *Csa* sur une large partie de la France s'étirant du nord-est au sud-ouest du pays. Néanmoins, l'ampleur spatiale que pourrait prendre ce changement varie d'un scénario à l'autre (Rubel et Kottek, 2010).

2.4. Vers des étés plus chauds et localement plus humides dans les régions du Sud de la France ?

Au-delà d'une augmentation de la fréquence d'apparition des types de climats à été chaud, qui semble se généraliser à une majeure partie des stations étudiées ici, les fréquences d'apparition des TCA observées en Figure 6 font apparaître, pour 3 stations (Bordeaux au sud-ouest ; Lyon et Montélimar au sud-est) l'augmentation du type *Cfa* (climat sans saison sèche, à été chaud) entre les deux sous-périodes. On remarque par ailleurs que les stations de Lyon et Montélimar, classées *Cfb* d'après la normale climatique 1951-1980, sont devenues *Cfa* d'après la normale 1981-2010 (figure 8).

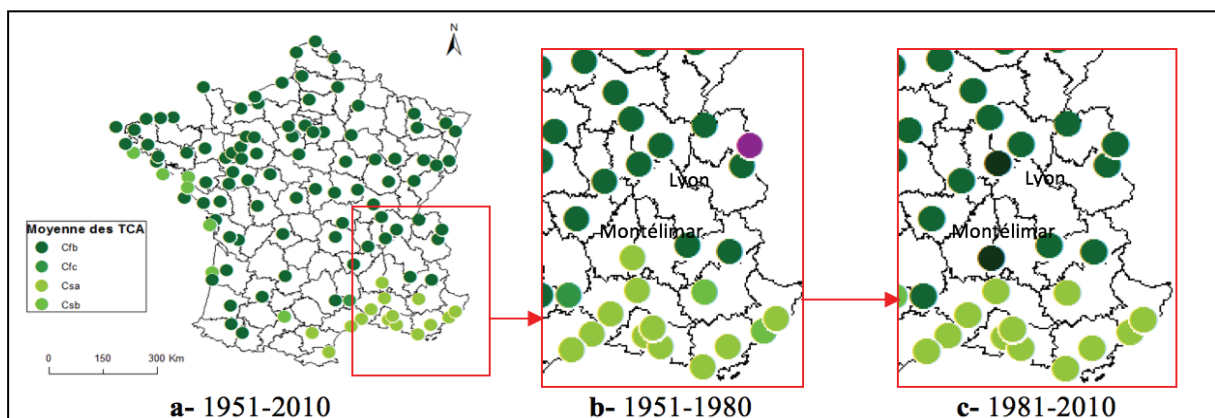


Figure 8 : Moyenne des TCA en France pour la période 1951-2010 (a), avec un zoom sur les régions rhodanienne et méditerranéenne pour 1951-1980 (b) et 1981-2010 (c). *Mean TCA in mainland France for the 1951-2010 period and a focus on the Rhône Valley and Mediterranean areas.*

En termes de fréquence, à Lyon, le type *Cfa*, présent pour 3 % seulement des années 1951-1980, est passé à 17 % des années 1981-2010. Dans une moindre mesure, l'apparition du type *Cfa* s'observe également dans la partie occidentale du Bassin aquitain, en particulier à Bordeaux, Agen, Pau et Mont-de-Marsan (passant respectivement de 0 à 3 %, de 0 à 7 %, de 0 à 10 % et de 3 à 13 % entre les deux sous-périodes). Dans le Bassin aquitain et dans la vallée du Rhône, l'apparition et l'augmentation du type *Cfa* pourraient être assimilées à une chaleur estivale plus marquée, accompagnée d'étés suffisamment arrosés pour ne pas basculer d'un type sans sécheresse d'été («*f*») à un type avec sécheresse d'été («*s*»). Ce résultat soulève ainsi la question de la variabilité des fortes pluies estivales à caractère orageux dans les régions méditerranéennes et sur l'ensemble des régions du Sud de la France.

Afin d'approfondir cette question, plus particulièrement dans les régions méditerranéennes, l'analyse de la fréquence d'apparition des TCA pour 3 stations languedociennes est effectuée. Elle révèle, tout d'abord, que le climat de la bordure méditerranéenne française a lui-même été affecté par certaines modifications. On observe ainsi l'augmentation de la fréquence du type *BSk*, dit semi-aride, particulièrement à Sète où il passe de 27 % en première sous-période à 50 % en seconde sous-période. On observe aussi l'apparition d'années de type *BWk* (climat aride) à Istres et Salon-de-Provence ; cependant, celui-ci n'est que très peu représenté (respectivement 7 et 2 % sur l'ensemble de la période). Pour les trois stations languedociennes de référence, ainsi que pour toutes les autres stations de la bordure méditerranéenne, le type *Csb* a complètement disparu en deuxième sous-période (sauf à Cannes, dont l'occurrence d'années de type *Csb* a chuté de 43 % à 3 % entre les deux sous-périodes). En revanche, la fréquence d'apparition du type *Cfa* a augmenté sur certaines stations entre les deux sous-périodes, par exemple à Nîmes. Les orages survenant l'été dans les régions de la bordure méditerranéenne sont des événements relativement fréquents et bien documentés (Davy, 1990 ; Carrega, 1996). Ce sont des phénomènes locaux, mais générateurs de précipitations de forte intensité, donc quelques événements sont susceptibles de modifier les caractéristiques de l'été d'une année donnée dans la classification climatique utilisée. On constate ainsi qu'à seulement quelques dizaines de kilomètres l'une de l'autre, la station de Montpellier ne recense aucune année en *Cfa* durant toute la période d'étude, tandis qu'à Nîmes, la fréquence des années de type *Cfa* passe de 3 à 10 % sur les deux sous-périodes étudiées (figure 9).

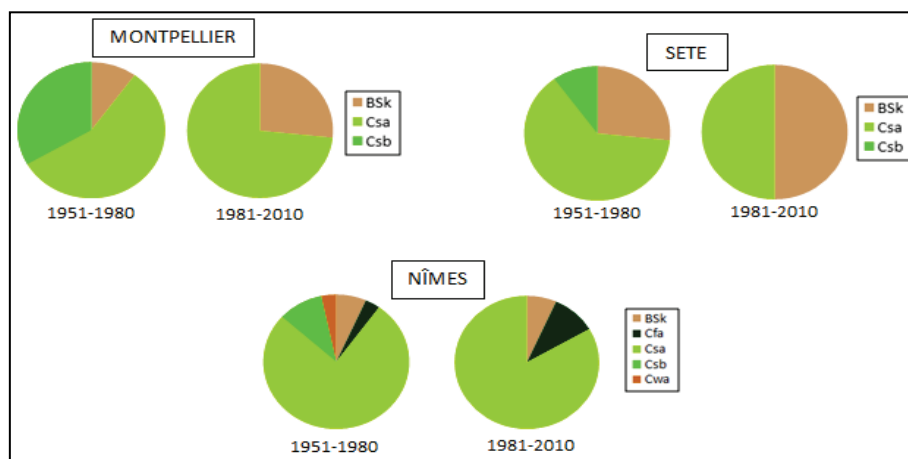


Figure 9 : Évolution des fréquences d'apparition des TCA à Nîmes, Montpellier et Sète (43° N) entre 1951-1980 et 1981-2010. *Frequency of TCA occurrence at the weather stations of Nîmes, Montpellier and Sète (43°N): comparison between the 1951-1980 and 1981-2010 periods.*

Afin de préciser plus encore cette analyse, les données climatiques quotidiennes (précipitations et températures), disponibles pour la station de Nîmes dans la base de données ECA&D (European Climate Assessment & Dataset ; Klein Tank, 2002 : <http://eca.knmi.nl>), ont été examinées en détail. Les moyennes mensuelles des mois d'été (juin, juillet et août) ont été calculées pour chaque année recensée en *Cfa* (1969, 1982, 1987 et 2002). Le seuil de $P \leq 2T$ pour définir une année « à période sèche » est ici encore utilisé, comme mentionné dans la méthodologie. À Nîmes, pour ces quatre années de type *Cfa*, le seuil est en effet de $P > 2T$ pour les trois mois d'été. On constate également que les mois de juillet 1982, août 1987 et 2002 reçoivent des totaux pluviométriques supérieurs à 100 mm, avec des températures supérieures à 23°C. On peut alors supposer que ces fortes valeurs ont été enregistrées en raison de l'apparition d'orages estivaux. Par exemple, la seule journée du 26 août 1987 a reçu 129,3 mm, précédés des 54,6 mm tombés trois jours plus tôt (le 13 août). Par ailleurs et à titre de comparaison, les mêmes calculs pour les mêmes années ont été effectués pour la station de Sète, située sur le littoral à environ 70 km de Nîmes.

On constate effectivement que la station de Sète enregistre, pour les quatre années étudiées ici, des cumuls mensuels de précipitations de l'ordre de $P \leq 2T$ chaque année pour au moins un mois d'été. L'année 1982 est classée en *BSk*, mais ce résultat nécessiterait une étude de la combinaison température/précipitations sur l'ensemble de l'année. Pour chaque année, on constate une grande différence avec les valeurs atteintes à Nîmes. Ainsi, ce résultat semble confirmer l'hypothèse d'une augmentation de l'intensité des précipitations orageuses pour certaines stations de la bordure méditerranéenne. La variabilité spatiale de ces phénomènes est également notable, puisque deux stations relativement proches l'une de l'autre ne sont pas classées dans le même type de climat. Néanmoins, Nîmes étant située dans l'arrière-pays alors que la station de Sète est sur la côte, d'autres facteurs entrent également en considération (Planchon, 2000). L'analyse des données climatiques journalières à Montpellier permettrait peut-être par exemple d'étayer ces résultats.

3. Résultats des analyses géostatistiques

3.1. Résultats des Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les trois premières composantes factorielles de l'ACP effectuée pour la période 1951-1980 (figure 10) expliquent 97,2 % de la variance totale. D'après le cercle de corrélation, la première composante, qui explique à elle seule 46,9 % de la variance totale, fait ressortir la covariance très légèrement positive entre les variables *Cfa* et *Csa*, qui toutes deux s'opposent aux deux autres variables *Cfb* et *Csb*. La variable *Csa* contribue le plus fortement à cette première composante, ce qui signifie que ce premier axe montre un écart important entre les stations les plus soumises à des années *Csa* et le reste des stations. La deuxième composante factorielle, qui résume 29,4 % de l'information, représente bien la covariance négative entre les variables *Cfb* et *Csb*. La variable *Csa* covarie négativement avec le second axe, tandis que la variable *Cfa* covarie positivement avec ce même axe. Les vecteurs représentés par ces variables sont respectivement très proche de 0 (pour la variable *Csa*) et très court (pour la variable *Cfa*), ce qui souligne leur faible implication dans l'explication de la variance totale. En effet, ces TCA n'apparaissent que très peu en première sous-période, plus particulièrement pour le *Cfa* qui n'est recensé que neuf fois sur la première sous-période.

La première composante principale révèle donc l'opposition marquée entre les TCA à été chaud (« a ») et les TCA à été tempéré (« b »), tandis que l'information majeure apportée par la deuxième composante est la covariance négative entre les TCA à saison sèche estivale (« s ») et les TCA sans saison sèche annuelle (« f »). Sur le second axe, ce sont les variables *Csb* et *Cfb* qui apportent les plus fortes contributions. La troisième composante factorielle, qui

n'est pas illustrée ici, mérite d'être conservée pour l'analyse. Elle montre une forte contribution de la variable *Cfa* et permet d'illustrer l'opposition entre les stations qui comptent certaines années *Cfa* au reste des stations.

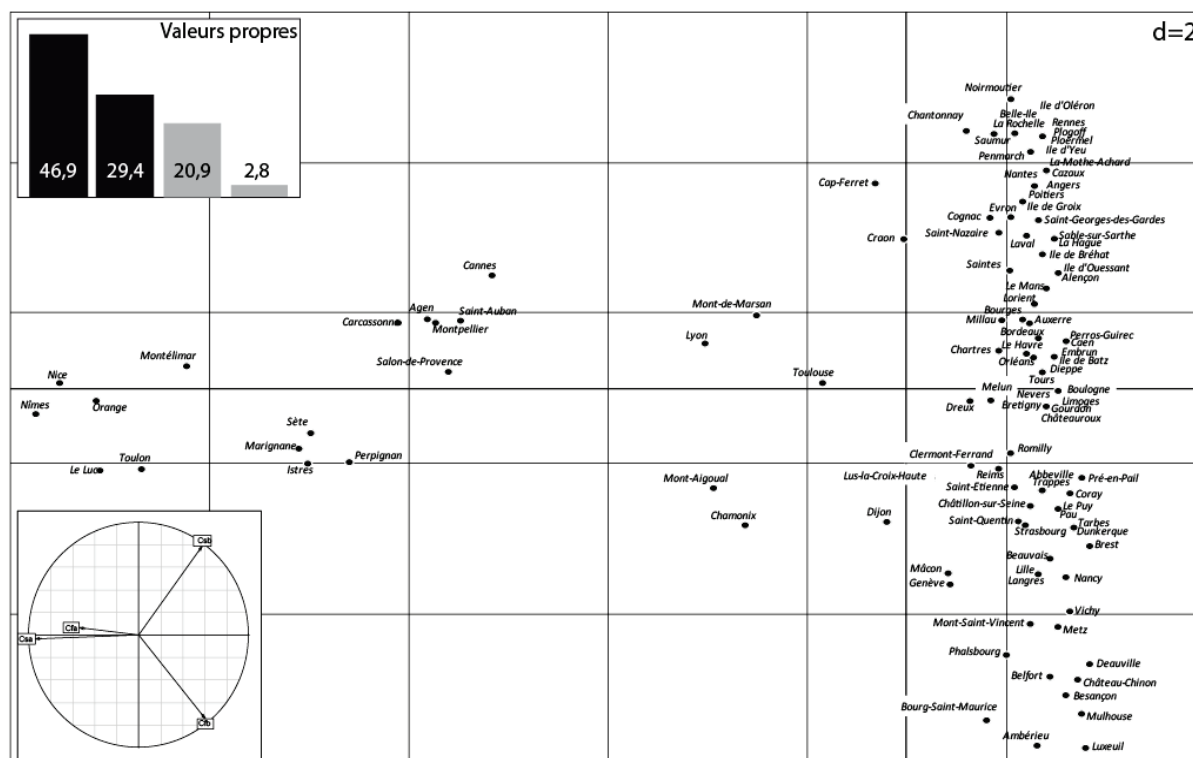


Figure 10 : Représentation graphique des deux premiers axes factoriels principaux de la répartition des 110 stations climatiques françaises de référence calculée à partir des fréquences des 4 TCA pour la période 1951-1980. En haut à gauche : valeurs propres des 4 premiers axes factoriels principaux ; en haut à droite : cercle des corrélations de l'ACP (axes factoriels principaux 1 et 2). *Graphic contributions of major variables to the two first major factorial axes: graphic distribution of the 110 French reference weather stations as a function of the frequency of the 4 major TCA, for the 1951-1980 period. At the top left corner: eigenvalues of the 4 first major factorial axes. At the bottom left corner: correlations circle of the PCA (major factorial axes 1 and 2).*

Le résultat graphique de l'ACP (figure 10) se traduit par un détachement de certaines stations par rapport au « groupe prédominant » (situé le long du premier axe factoriel) : c'est le cas pour la plupart des stations localisées aux limites méridionales (essentiellement méditerranéennes) de la France. D'autres stations, situées dans le sud-ouest (Agen, Mont-de-Marsan, Toulouse, Cap-Ferret) et l'est de la France (Lyon et Dijon) sont influencées par les types de climat à été chaud (*Cfa* et *Csa*). Ces stations ont en effet enregistré une fréquence d'apparition du type *Csa* plus élevée que la majorité des autres stations, durant la période 1951-1980.

Enfin, le deuxième axe de l'ACP différencie les stations en deux groupes principaux, en fonction de la fréquence d'apparition des TCA *Csb* ou *Cfb* : un groupe de stations, situées en majorité dans le quart nord-est de la France, qui tendent préférentiellement vers le climat de type *Cfb* et un groupe de stations, situées en majorité dans le quart nord-ouest de la France, qui tendent préférentiellement vers le type *Csb*.

Les résultats obtenus pour l'ACP de la deuxième sous-période (1981-2010 ; figure 11) permettent une comparaison avec ceux de la première sous-période (1951-1980) et ainsi, de faire ressortir une dynamique de l'évolution du climat en France au cours de ces soixante dernières années.

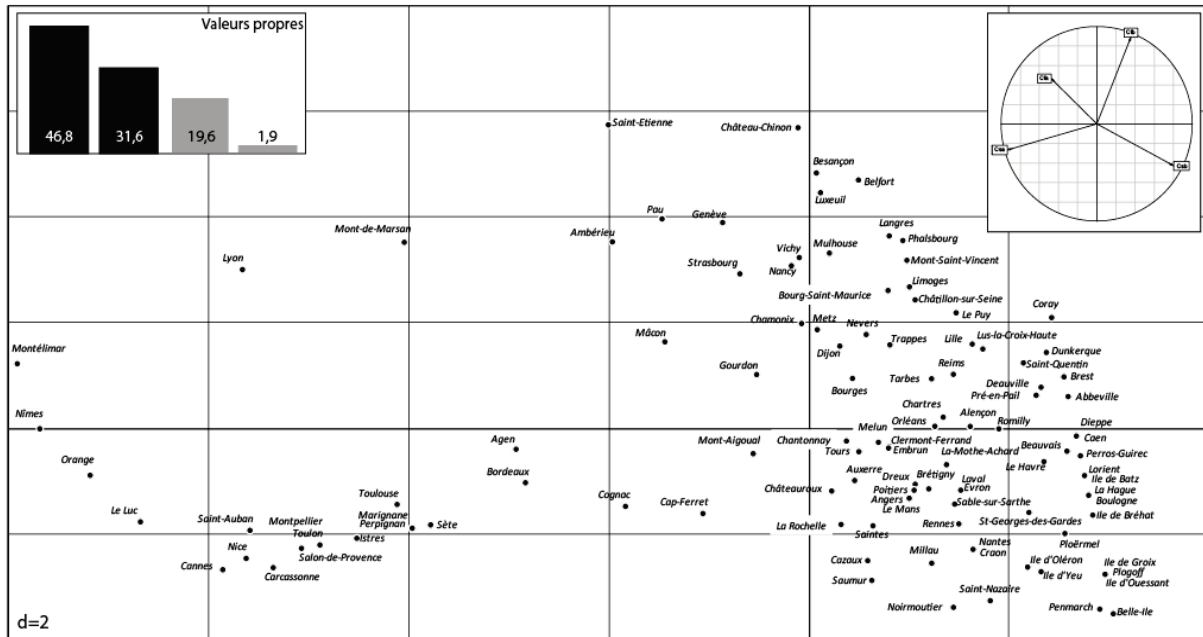


Figure 11 : Représentation graphique des deux premiers axes factoriels principaux de la répartition des 110 stations climatiques françaises de référence calculée à partir des fréquences des 4 TCA pour la période 1981-2010. En haut à gauche : valeurs propres des 4 premiers axes factoriels principaux ; en haut à droite : cercle des corrélations de l'ACP (axes factoriels principaux 1 et 2). *Graphic contributions of major variables to the two first major factorial axes: graphic distribution of the 110 French reference weather stations as a function of the frequency of the 4 major TCA, for the 1981-2010 period. At the top left corner: eigenvalues of the 4 first major factorial axes. At the top right corner: correlations circle of the PCA (major factorial axes 1 and 2).*

Durant la période 1981-2010, l'information est également contenue en quasi-totalité dans les trois premières composantes factorielles, qui expliquent 98 % de la variance totale. Le premier facteur (46,8 %) oppose là encore les types de climat sans saison sèche (« f ») aux types de climat avec une saison sèche estivale (« s »). Les variables *C_{fb}* et *C_{sb}* sont également corrélées positivement entre elles, de manière cependant moins marquée que durant la période 1951-1980. Ce résultat pourrait être interprété comme une différenciation climatique moins nette entre l'est et l'ouest de la France durant 1981-2010. Cependant, la covariance légèrement positive entre les variables *C_{fa}* et *C_{sa}* durant la première sous-période tend à se creuser davantage en deuxième sous-période. De plus, le vecteur représentant la variable *C_{fa}* sur le cercle des corrélations est plus long en deuxième sous-période, ce qui indique que la variable est mieux représentée durant la période 1981-2010 et qu'elle contribue davantage à la variance expliquée par l'ACP. Ces résultats confirment l'analyse des fréquences d'apparition des TCA avec l'augmentation des types de climat à été chaud (« a »).

Par ailleurs, une tendance générale se dégage : les stations enregistrant des fréquences élevées du type *C_{sb}* et celles enregistrant des fréquences élevées du type *C_{fb}*, auparavant bien délimitées, se « dispersent » davantage durant la période 1981-2010, en particulier le long du deuxième axe factoriel (axe vertical). Cette redistribution des stations semble également être liée à l'évolution de la fréquence d'apparition du type *C_{sa}*, plus élevée que durant la période 1951-1980. Enfin, de nouvelles stations (Bordeaux, Cognac) se rattachent très clairement au groupe orienté vers de plus fortes proportions d'apparition du type *C_{sa}* durant la période 1981-2010 (localisé dans la région méditerranéenne). Ce résultat semble confirmer l'hypothèse d'un changement climatique qui s'amorcerait déjà à l'échelle régionale, avec une augmentation des années à été chaud et sec au-delà de la limite méditerranéenne. Par ailleurs, la troisième composante factorielle exprime une forte contribution de la variable *C_{fa}* une fois de plus et appuie également la nécessité de conserver cette composante pour l'analyse. Le

vecteur représentant la variable *Cfa* montre qu'elle a pris de l'importance lors de la seconde sous-période (1981-2010).

3.2. Résultats cartographiques

La partition en 7 classes de la CAH (figures 12a et 12b ; tableaux 2a et 2b) montre une redistribution spatiale des groupes climatiques régionaux, en fonction de l'importance prise par les TCA à étés chauds entre les périodes 1951-1980 et 1981-2010. Si la distribution spatiale des climats régionaux reste complexe dans le centre-est (topographie contrastée), l'homogénéité des régions climatiques du centre-ouest est brisée.

CLASSE	TYPES DE CLIMATS ANNUELS			
	Cfb	Csb	Cfa	Csa
A	38,6	41,8	0,0	0,3
B	18,9	45,6	5,0	23,3
C	16,3	77,4	0,0	1,6
D	56,0	30,2	0,0	1,8
E	32,1	61,6	0,0	0,5
F	0,4	14,8	0,0	64,8
G	1,1	14,4	3,3	75,6

Tableau 2a : Détail des 7 classes obtenues par CAH calculée à partir des valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur la fréquence des 4 TCA principaux, pour la période 1951-1980. Fréquence d'apparition des TCA par classe ; valeurs en pourcentages. *The detailed AHC clusters. The AHC was performed using the two first ACP components based on the frequency of the 4 major ACT, for the 1951-1980 period. Frequency of TCA occurrence for each class (percentages).*

CLASSE	TYPES DE CLIMATS ANNUELS			
	Cfb	Csb	Cfa	Csa
1	28,2	59,0	0,0	4,2
2	4,6	24,2	6,3	58,8
3	35,3	43,1	4,5	10,8
4	8,6	77,0	1,5	11,0
5	59,0	18,0	1,3	10,3
6	0,0	1,9	0,6	71,9
7	31,7	22,5	13,3	24,2

Tableau 2b : Détail des 7 classes obtenues par CAH calculée à partir des valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur la fréquence des 4 TCA principaux, pour la période 1981-2010. Fréquence d'apparition des TCA par classe ; valeurs en pourcentages. *The detailed AHC clusters. The AHC was performed using the two first ACP components based on the frequency of the 4 major ACT, for the 1981-2010 period. Frequency of TCA occurrence for each class (percentages).*

Lors de la première sous-période (1951-1980 ; figure 12a et tableau 2a), on remarque dans un premier temps la nette distinction dans l'espace des groupes de stations, principalement dans la moitié ouest de l'espace étudié : les classes C et E sont quasi parfaitement délimitées et, se succédant d'ouest (C) en est (E) en fonction de la continentalité (en incluant des stations dispersées et isolées de la classe A), reproduisent ainsi approximativement les nuances climatiques régionales (climat océanique « altéré » et « dégradé ») décrites par exemple par Joly *et al.* (2010). En accord avec de nombreux autres travaux antérieurs (Pédelaborde, 1957 ;

Escourrou, 1982 ; Pagney, 1988 ; Vigneau, 1990 ; Planchon, 1994 et 1997), la différenciation climatique des classes C (en bordure de l'océan) et E (à l'intérieur) est essentiellement liée à l'augmentation, vers l'intérieur des terres, de la part des précipitations estivales dans le total annuel. Ainsi, la proportion d'années à période « sèche » estivale (« s ») diminue (classe C : 77,4 % ; classe E : 61,6 %), tandis que celle des années sans période sèche (« f ») augmente (classe C : 16,3 % ; classe E : 32,1 %).

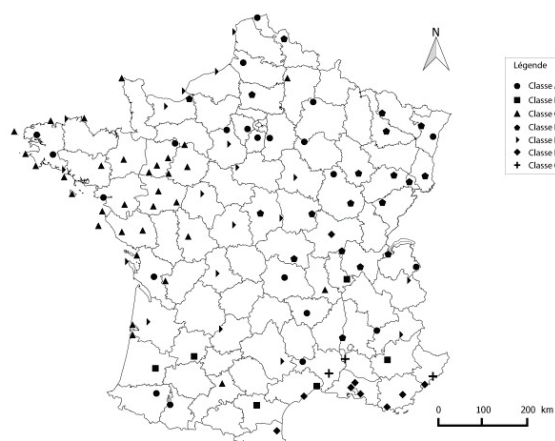


Figure 12a : Distribution spatiale des 7 classes obtenues par CAH calculée à partir des valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur la fréquence des 4 TCA principaux, pour la période 1951-1980. *Spatial distribution of the AHC clusters. The AHC was performed using the two first ACP components based on the frequency of the 4 major ACT, for the 1951-1980 period.*

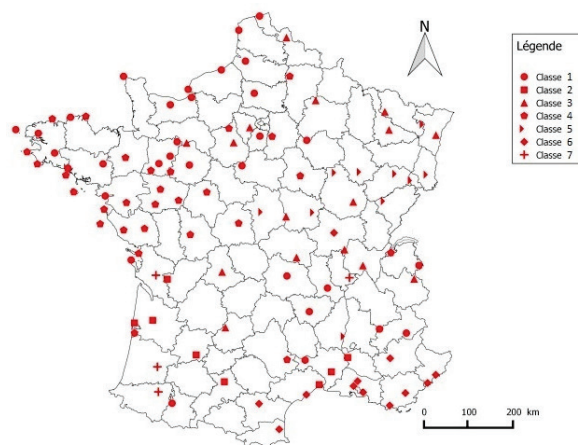


Figure 12b : Distribution spatiale des 7 classes obtenues par CAH calculée à partir des valeurs des deux premières composantes de l'ACP effectuée sur la fréquence des 4 TCA principaux, pour la période 1981-2010. *Spatial distribution of AHC clusters. The AHC was performed using the two first ACP components based on the frequency of the 4 major ACT, for the 1981-2010 period.*

Dans la moitié est en revanche, les classes sont davantage imbriquées sur des espaces au moins partiellement communs, notamment les classes A et D. Cette disposition, en partie liée à la configuration topographique accidentée de la France de l'est et du sud, a déjà été mise en évidence par les résultats des classifications automatiques (hiérarchiques ou non-hiérarchiques) obtenus par Durand-Dastès et Sanders (1994) ou encore par Dauphiné et Ottavi (1995). Par ailleurs, les stations de la bordure méditerranéenne se distinguent nettement puisque les classes F et G y sont exclusivement représentées. Ces classes sont largement dominées par le type *Csa* (respectivement 64,8 % et 75,6 %), avec, pour seule différence, la présence d'années en *Cfa* (en moyenne dans 3,3 % des cas entre 1951 et 1980) pour la classe G, absentes dans la classe F. Ce résultat fait ressortir, comme toutes les classifications climatiques antérieures, la particularité des régions méditerranéennes françaises, où l'effet d'abri à la fois aérologique et orographique a pour conséquence un été sensiblement plus sec et chaud que dans le reste du pays (Dauphiné, 1976 ; Pagney, 1988).

La station de Lyon semble toutefois être un cas particulier, puisqu'elle rejoint la même classe que certaines stations méditerranéennes (Montpellier et Saint-Auban) ou du Bassin aquitain (Mont-de-Marsan et Agen ; classe B). Le climat *Csa* y est alors encore peu représenté (23,3 %), au profit du type *Csb* (45,6 %), ce qui montre cependant l'importance relative des années à période sèche estivale dans cette ville, alors que les années sans période sèche (*Cfb*) sont les plus fréquentes dans les autres stations de l'est de la France. La position de Lyon en latitude et dans la haute vallée du Rhône explique cette particularité par rapport aux stations du quart nord-est de la France (Escourrou, 1982 ; Pagney, 1988). De plus, la station de Lyon recense aussi davantage d'années de type *Cfa* (5 % pour la classe B) que les stations des autres classes (effet combiné de la continentalité et de la méridionalité).

Durant la deuxième sous-période (1981-2010 ; figure 12b et tableau 2b) les résultats font apparaître une redistribution des classes et des stations sur l'ensemble du territoire. On observe toujours une plus forte fréquence d'apparition du type *Csb* à l'ouest et du type *Cfb* à l'est, mais la nette délimitation climatique entre les régions du centre-ouest et celles du centre-est, observée entre 1951 et 1980, est perturbée en 1981-2010 par l'augmentation de la fréquence d'apparition des types de climat à été chaud (*Cfa* et *Csa*), de la première période à la seconde. On assiste donc à une évolution climatique entre la première (1951-1980) et la deuxième sous-période (1981-2010) vers un réchauffement des étés, de manière générale, puisque toutes les classes sont confrontées à ce phénomène. L'occurrence d'années à étés chauds, et notamment chauds et secs, est donc devenue un critère discriminant de la régionalisation climatique de l'espace étudié, ce qui contribue à perturber la distribution spatiale des classes identifiées par les CAH dans les régions du centre-ouest en 1981-2010. Ainsi, dans les régions de l'ouest, la succession d'ouest en est des classes C et E, illustrant en 1951-1980 l'effet de la continentalité, est remplacée en 1981-2010 par une forte imbrication spatiale entre les classes 1 et 4. La différence entre ces deux classes, où le type *Csb* est largement majoritaire, est essentiellement liée à la fréquence des types de climat à été chaud (*Cfa* et *Csa*), qui représentent respectivement 1,5 et 11 % dans la classe 4, alors que la classe 1 n'en compte quasiment pas (respectivement 0 et 4,2 %). Le type *Cfb*, en revanche, est plus présent dans la classe 1 que dans la classe 4.

La bordure méditerranéenne semble plus homogène, avec une classe prépondérante (classe 6) et une deuxième classe (classe 2) regroupant les stations de Montpellier, Nîmes et Orange, autour de la basse vallée du Rhône. Ces deux classes ont en commun une forte proportion d'années de type *Csa* (respectivement 71,9 et 58,8 %) caractéristique du climat de type méditerranéen. En revanche, le type *Cfa* est plus fréquent dans la classe 2 que dans la classe 6 (respectivement 6,3 et 0,6 %). La proportion plus élevée du type *Csa* sur l'ensemble des classes, en 1981-2010 comparé à 1951-1980, appuie les résultats obtenus et commentés précédemment. De plus, la station de Lyon confirme sa particularité, puisqu'elle est là encore incluse dans la même classe que certaines stations du sud-ouest (Saintes, Mont-de-Marsan et Pau ; classe 7). Le type *Cfb* y est le plus fréquent (31,7 % des années), suivi des types *Csa* et *Csb* (respectivement 24,2 et 22,5 %). Le type *Cfa* y est également bien représenté (13,3 %), ce qui attribue à la classe 7 la plus forte proportion de type *Cfa* parmi l'ensemble des classes représentées dans la seconde période, suivie de la classe 2 (6,5 %). Celle-ci inclut certaines stations du bassin Aquitain (Cognac, Cap-Ferret, Bordeaux, Agen et Toulouse) et des plaines du bas Rhône (Montpellier, Nîmes et Orange).

Ces résultats semblent donc être en accord avec les changements annoncés par la plupart des scénarios de changement climatique d'ici la fin du XXI^{ème} siècle. À Lyon, entre 1951 et 2010, le climat comporte donc un été chaud et humide en moyenne (figure 9), alors que le TCA *Csa* y est le plus fréquent (1951-1980 : 13 % ; 1981-2010 : 50 % ; figure 13). La sécheresse estivale progresse sur l'ensemble du territoire, tandis que les étés sont plus chauds dans le bassin Aquitain et le long du couloir rhodanien (figure 13).

3.3. Synthèses cartographiques par interpolations spatiales

L'analyse géostatistique est utilisée pour appuyer et mieux illustrer les résultats obtenus précédemment. L'analyse retient la méthode des *moyennes mobiles pondérées par l'inverse à la distance* (*Inverse Distance Weighted* ; figure 14). Elle cartographie la répartition spatiale des occurrences des quatre TCA, pour chaque sous-période, et confirme les résultats précédents. On remarque tout d'abord une forte diminution du type *Cfb*. Présent dans une large partie nord-est de la France pendant la première sous-période, la répartition du *Cfb* se

replie progressivement vers l'est en seconde sous-période, avec les fréquences d'apparition les plus importantes en Alsace, en Lorraine et en Franche-Comté. Les stations de Pau et de Tarbes, au sud-ouest, paraissent également influencées par ce type, en raison de la présence des Pyrénées au sud, qui favorisent l'abondance des précipitations en toutes saisons (Dauphiné, 1976 ; Viers, 1988 ; Avila, 2011).

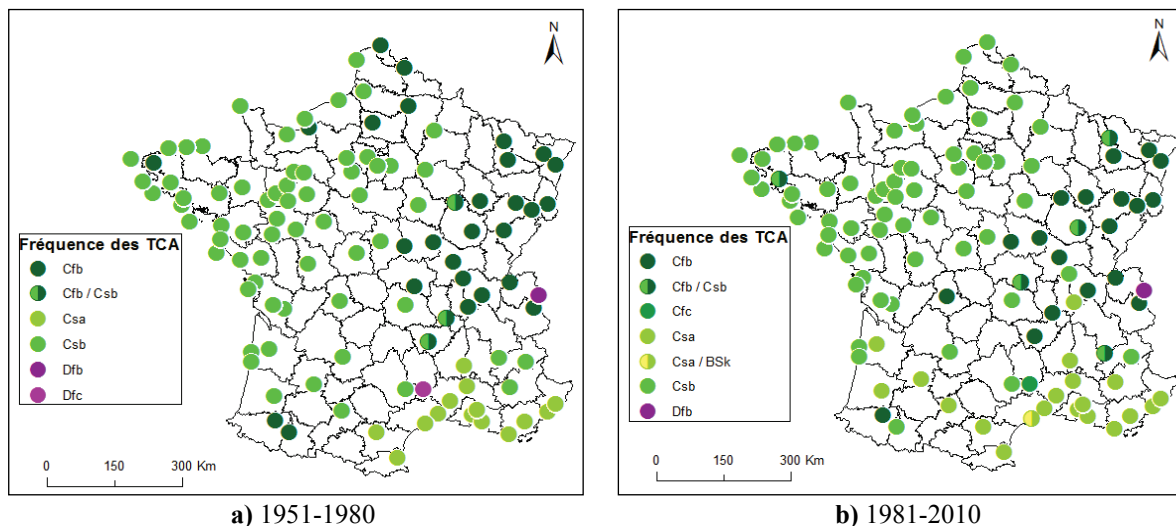


Figure 13 : Évolution inter-période des TCA les plus fréquemment observés en France pour chaque station, pour la période 1951-1980 (a) et la période 1981-2010 (b). Les symboles bicolores indiquent, pour la station concernée, que deux TCA y sont le plus fréquemment observés à parts égales. *Most frequently observed TCA in mainland France for each station, for the 1951-1980 period (a) and for the 1981-2010 period (b). Two-coloured symbols are used when the two most frequent TCA are observed with the same percentage.*

Cependant, la fréquence du type *Cfb* diminue tout de même en seconde sous-période. Le type *Csb* semble être dominant à l'ouest d'une ligne Dunkerque – Mont-de-Marsan entre 1951 et 1980. En deuxième sous-période, il conserve des fréquences d'apparition importantes sur un grand quart Nord-Ouest, englobant une partie du bassin parisien, mais on observe tout de même un léger « décalage » de son étendue spatiale vers le nord durant la période 1981-2010. Les deux derniers TCA font l'objet d'un plus grand contraste entre les deux sous-périodes d'analyse. Le type *Cfa*, quasiment absent en première période, voit sa fréquence d'apparition augmenter principalement le long de deux axes : la vallée du Rhône et la vallée de la Garonne. Il apparaît ou augmente de manière générale sur une grande partie des stations étudiées, avec malgré tout de faibles fréquences d'apparition. Le type *Csa* est présent en première période, mais essentiellement sur les stations méditerranéennes (avec une exception à Dijon). Là encore, il prend de l'ampleur en seconde période le long des deux axes précités et sa fréquence d'apparition augmente sensiblement sur l'ensemble du territoire.

La redistribution spatiale des régions climatiques en France à partir des années 80 semble notamment marquée par une augmentation de la chaleur estivale sur l'ensemble des stations, autrefois (1951-1980) caractéristiques de la région méditerranéenne. L'interpolation souligne également l'apparition du type *Cfa* localement, résultat qui mériterait d'être affiné à une échelle plus fine pour y déceler éventuellement l'effet urbain.

Conclusion

Des synthèses de l'évolution du climat en Europe occidentale, décennie par décennie de la fin du XIX^e siècle à la fin du XX^e siècle, ont été réalisées récemment (Moisselin *et al.*, 2002 ; Le Roy Ladurie, 2009 ; Mauelshagen, 2010 ; McKeown *et al.*, 2013).

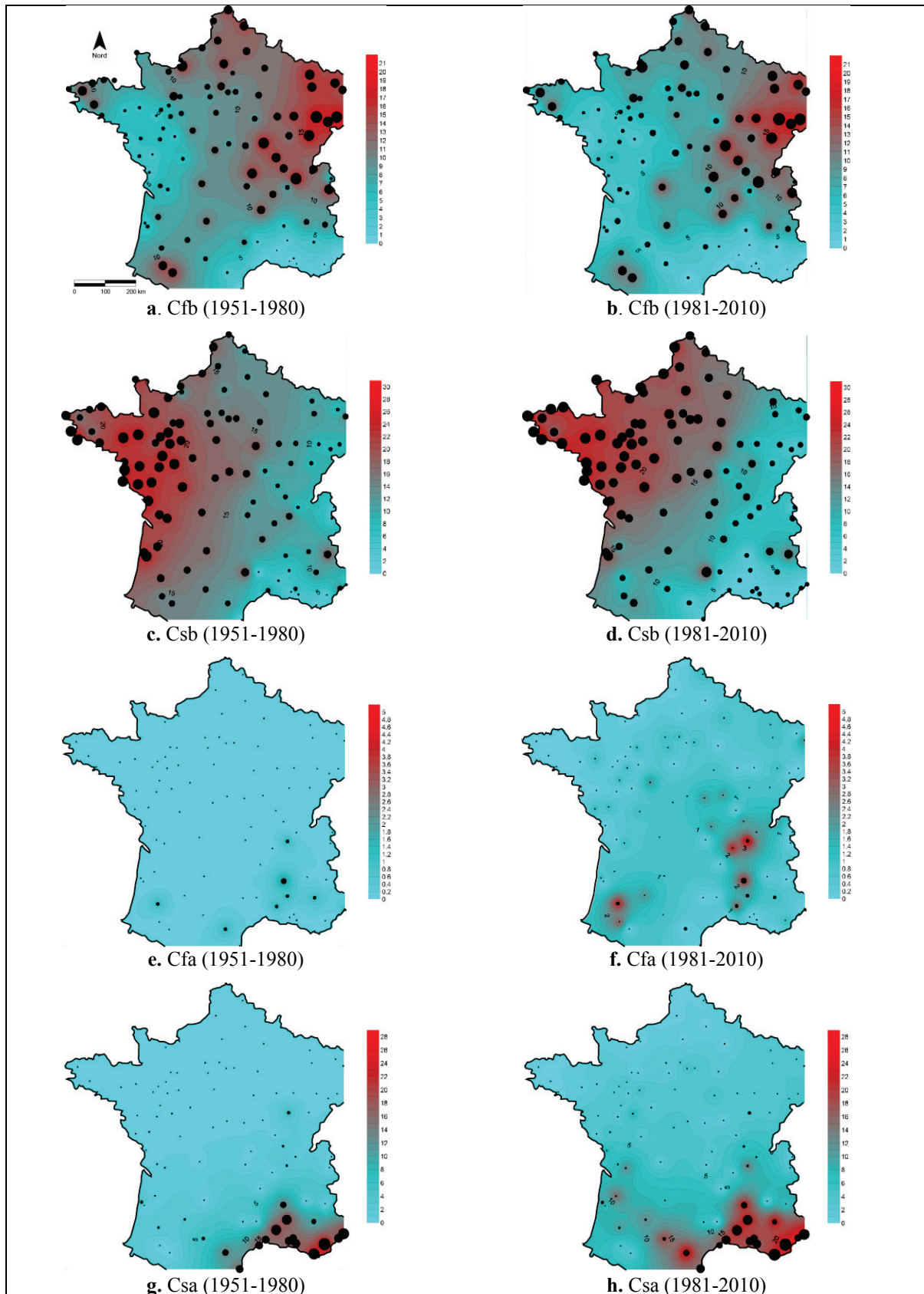


Figure 14 : Cartographies de l'interpolation spatiale par la méthode des moyennes mobiles pondérées par l'inverse à la distance (*Inverse Distance Weighted*) pour les 4 TCA principaux et par sous-périodes. *Cartography of spatial interpolation by TCA and by period (Inverse Distance Weighted method) for the 4 major TCA.*

Celles-ci soulignent bien l'importance du réchauffement des étés à la fin du XX^e siècle, plus encore que durant la précédente oscillation chaude des années 1940, déjà mise en évidence par H. H. Lamb (1977). Une étude préalable réalisée à l'échelle de la France centrale (Planchon *et al.*, 2014) et appuyée ici par l'évolution observée par l'analyse statistique et géostatistique des TCA entre 1951-1980 et 1981-2010, confirme ces observations antérieures et, du strict point de vue de la chaleur estivale, confirme les changements annoncés par F. Rubel et M. Kottek (2010), sur l'ensemble des scénarios intégrant la classification de Köppen. Cependant, les résultats présentés ici ne permettent pas d'affirmer lequel des scénarios sera « validé » d'ici la fin du siècle...

L'intégration des régimes pluviométriques ajoute une grande part d'incertitude, que reflètent déjà les résultats obtenus par F. Rubel et M. Kottek (2010). En effet, si le réchauffement estival est souligné par la fréquence plus élevée des TCA de type *Csa* et la redistribution spatiale des classes en fonction de la chaleur estivale entre 1951-1980 et 1981-2010, la brusque apparition du type *Cfa*, malgré des occurrences encore faibles, souligne quant à elle les incertitudes sur l'évolution des précipitations estivales évoquée par exemple par Jouzel *et al.* (2014), à propos des sorties de modèles climatiques : un été plus chaud ne sera pas forcément plus sec partout. La complexité des régions du Centre-Est, déjà plusieurs fois évoquée (effets combinés de la continentalité et du relief), rend tout scénario particulièrement incertain dans cette partie de la France. Pourtant, certains autres indices semblent déjà confirmer les résultats obtenus par F. Rubel et M. Kottek (2010). Les températures et précipitations moyennes calculées pour les deux périodes 1951-1980 et 1981-2010 montrent que la station de Lyon-Bron a « basculé » du type *Cfb* au type *Cfa* d'une période à l'autre. La station de Bordeaux-Mérignac, quant à elle, observe une évolution marquée du type *Csb* vers le type *Csa*. Pour diverses activités économiques comme celles liées à l'agriculture, les enjeux de la variabilité du climat sont indéniables. Il est donc nécessaire de poursuivre l'analyse de la variabilité aux échelles spatio-temporelles plus fines.

Remerciements : Cette étude est réalisée dans le cadre du programme européen ADVICLIM - LIFE13 ENV/FR/001512 : *ADaptation of VIticulture to CLIMate change* (2014-2019).

Références bibliographiques

- AVILA F., 2011 : Les Pyrénées modifient-elles le climat du bassin Aquitain ? *Publications de l'AIC*, 24, 45-50.
- BAGNOULS F., GAUSSEN H., 1957 : Saison sèche et indice xéothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.*, Toulouse, 88, 193-239.
- BLANCHET G., 1993 : Le climat de Lyon et de sa région. *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 62 (7), 217-264.
- BRISSE H., GRANDJOUAN R., DE RUFFRAY P., 1982 : Les types de climats annuels, un mode d'expression des gradients climatiques intégrant les variations interannuelles. *La Météorologie*, VIe série, 31, 39-81.
- CANTAT O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 75-102.
- CANTÙ V., 1977 : *The climate of Italy*. World Survey of Climatology, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 6, 127-183.
- CARREGA P., 1996 : Phénomènes climatiques extrêmes : De la statistique aux processus. Exemples des fortes pluies en Méditerranée. *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, 38 et 39, 157-166.

- CHOISNEL E., PAYEN D., 1988 : Les climats de la France. *Supplément La Recherche*, 201, 32-41.
- DAUPHINE A., 1976 : *Les précipitations dans les Midis français. Étude de climatologie inductive*. Thèse de Doctorat, Université de Nice, Paris : Librairie Honoré Champion, 591 p.
- DAUPHINÉ A., OTTAVI J. Y., 1995 : *Images nouvelles des climats*. In : Atlas de France, Milieux et Ressources, RECLUS, 81-96.
- DAVY L., 1990 : La catastrophe nîmoise du 3 octobre 1988 était-elle prévisible ? *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, 1 et 2, 133-162.
- DE MARTONNE E., 1942 : Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité. *Annales de Géographie*, 51 (288), 241-250.
- DUBREUIL V., 1994 : *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA.AVHRR*. Thèse de l'Université Rennes 2, 381 p.
- DUBREUIL V., 1996 : Synthèse géographique de la sécheresse dans les régions océaniques. *La Météorologie* (8e série), 15, 22-34.
- DUBREUIL V., MOUNIER J., LEJEUNE C., 1998 : L'accentuation récente du déficit estival dans la France océanique. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 11, 151-157.
- DUBREUIL V., PLANCHON O., LAMY C., BONNARDOT V., QUÉNOL H., 2012 : *Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances*. In MÉROT P., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS P. (sous la direction de) : *Changement climatique dans l'Ouest – Évaluation, impacts, perceptions*. Presses Universitaires de Rennes, Collection « Espace et territoires », ISBN : 978-2-7535-2146-9, chap. 1, 19-30.
- DURAND-DASTÈS F., SANDERS L., 1984 : *Les contrastes climatiques : noyaux et zones de transition*. Theo Quant, Géoscopie de la France, Paradigme, Paris, 91-101.
- ESCOURROU G., 1982 : *Le climat de la France*. Paris : PUF, Que Sais-je ?, 126 p.
- ESCOURROU G., 1990 : La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de Géographie de Lyon*, 65 (2), 85-89.
- ESSENWANGER O. M., 2001 : *Classification of Climates*. World Survey of Climatology 1C, General Climatology – Elsevier, Amsterdam, 102 p.
- European Commission, 2013 : *An EU Strategy on adaptation to climate change*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Commission Staff Working Document, Impact Assessment - Part 2.
- FAVROT C., 1953 : Contribution à la climatologie du Lyonnais : les orages. *Revue de Géographie de Lyon*, 28 (1), 45-51.
- HANSEN J., RUEDY R., SATO M., LO K., 2010 : Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48 (4), 29 p.
- HANTEL M., 1989 : *Climatology, Series Landolt-Börnstein – Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*. New Series Vol. 4C2, The present global surface climate – Springer, Berlin, 117-474.
- IGLESIAS A., GARROTE L., QUIROGA S., MONEO M., 2009 : *Impacts of climate change in agriculture in Europe*. PESETA – Agriculture Study, JRC Scientific and Technical

Reports, European Commission, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 51 p.

JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVALHES J., HILAL M., WAVRESKY P., 2010 : Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo – revue européenne de géographie*, cybergeo.revues.org/23155.

JONES P. D., LISTER D. H., ORBORN T. J., HARPHAM C., SALMON M., MORICE C. P., 2012 : Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117 (D5), 29 p.

JOUZEL J., OUZEAU G., DÉQUÉ M., JOUINI M., PLANTON S., VAUTARD R., 2014 : *Le climat de la France au XXI^e siècle (Volume 4), Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*. Rapports de la Direction générale de l'Énergie et du Climat, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 62 p.

KLEIN TANK A. M. G., WIJNGAARD J. B., KONNEN G. P., BOHM R., DEMAREE G., GOICHEVA A., MILETA M., PASHIARDIS S., HEJKRLIK L., KERN-HANSEN C., HEINO R., BESSEMOULIN P., MULLER-WESTERMEIER G., TZANAKOU M., SZALAI S., PALSDOTTIR T., FITZGERALD D., RUBIN S., CAPALDO M., MAUGERI M., LEITASS A., BUKANTIS A., ABERFELD R., VAN ENGELEN A. F. V., FORLAND E., MIETUS M., COELHO F., MARES C., RAZUVAEV V., NIEPLOVA E., CEGNAR T., LOPEZ J. A., DAHLSTROM B., MOBERG A., KIRCHHOFER W., CEYLAN A., PACHALIUK O., ALEXANDER L. V., PETROVIC P., 2002 : Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, 22, 1441-1453.

KOTTEK M., GRIESER J., BECK C., RUDOLF B., RUBEL F., 2006 : World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263.

LAMB, H. H., 1977 : *Climate: Present, Past, and Future. Vol. 2 – Climatic history and the future*. London: Methuen & Co Ltd, 835 p.

LAMY C., DUBREUIL V., 2013 : Impact potentiel du changement climatique sur les sécheresses pédologiques en Bretagne au 21^{ème} siècle. *Climatologie*, 10, 107-121.

LAUER W., 1993 : *Klimatologie*. Das Geographische Seminar, Braunschweig : Westermann, 267 p.

LE ROY LADURIE E., 2009 : *Histoire humaine et comparée du climat. III - Le réchauffement de 1860 à nos jours* (avec le concours de Guillaume Séchet). Fayard, 460 p.

MARCHAND J.-P., 1981 : *La variabilité de l'organisation mensuelle des précipitations. L'exemple de Phoenix Park (1838-1976)*. Eaux et Climats, Grenoble, 325-337.

MAUELSHAGEN F., 2010 : *Klimageschichte der Neuzeit 1500-1900*. WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), 144 p.

MCKEOWN M., POTITO A. P., HICKEY K. R., 2013 : The long-term temperature record from Markree Observatory, County Sligo, from 1842 to 2011. *Irish Geography*, 26 p.

MOISSELIN J.-M., SCHNEIDER M., CANELLAS C., MESTRE O., 2002 : Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38, 45-56.

MORIONDO M., JONES G. V., BOIS B., DIBARI C., FERRISE R., TROMBI G., BINDI M., 2013 : Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climate Change*, 15 p.

- MOUNIER J., 1982 : *Carte climatique détaillée de la France. Feuilles de Brest, Saint-Brieuc-Lorient et Nantes*. E.R. 30 du CNRS, Gap, OPHRYS.
- PAGNEY P., 1972 : Remarques sur quelques aspects climatiques de la Bourgogne. *Revue Géographique de l'Est*, 12 (2 et 3), Avril-septembre 1972. Climatologie : mémoires, notes et comptes-rendus, 305-312.
- PAGNEY P., 1988 : *Climats et cours d'eau de France*. Paris : Masson, 248 p.
- PÉDELABORDE P., 1957 : *Le climat du bassin Parisien – Essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. Paris : Génin, 539 p.
- PEGUY C. P., 1970 : *Précis de climatologie*. Paris : Masson, 468 p.
- PINNA M., VITTORINI S., 1985 : *Contributo alla determinazione dei regimi pluviometrici in Italia*. In : Pinna M., 1985 (sous la direction de) : *Contributi di Climatologia*, Rome : Memorie della Società Geografica Italiana, XXXIX, 147-167.
- PLANCHON O., 1994 : À propos de la notion de climat maritime. *Études Méditerranéennes*, 16, 119-130.
- PLANCHON O., 1997 : *Les climats maritimes dans le Monde*. Thèse de Doctorat, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.
- PLANCHON O., 2000 : A study of the coastal climates in France using temperature and precipitation data (1961-1990). *Meteorological Applications*, 7 (3), 217-228.
- PLANCHON O., ROSIER K., 2005 : Climat et variabilité climatique dans le Nord-Ouest de l'Argentine : problèmes posés et analyse durant la deuxième moitié du vingtième siècle. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, 55-76.
- PLANCHON O., DUBREUIL V., OSZWALD J., QUÉNOL H., 2014 : *Variabilité et scénarios de changement climatique dans les régions viticoles de France centrale*. Actes du XXVII^{ème} colloque de l'AIC, Dijon (France), 739-745.
- QUÉNOL H., PLANCHON O., WAHL L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.
- QUÉNOL H., PLANCHON O., DUBREUIL V., 2014 : *Variabilité climatique et changement climatique à l'échelle des vignobles mondiaux*. In QUÉNOL H. (sous la direction de) : *Changement climatique et terroirs viticoles*, Editions Lavoisier Tec&Doc, Chap. 3, 91-114.
- REID P. C., HARI R. E., BEAUGRAND G., LIVINGSTONE D. M., MARTY C., STRAILE D., BARICHIVICH J., GOBERVILLE E., ADRIAN R., AONO Y., BROWN R., FOSTER J., GROISMAN P., HÉLAOUËT P., HSU H., KIRBY, R. KNIGHT J., KRABERG A., LI J., LO T.-T., MYNENI R. B., NORTH R. P., POUNDS J. A., SPARKS T., STÜBI R., TIAN Y., WILTSHIRE K. H., XIAO D., ZHU Z., 2016 : Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 22, 682-703,
- RUBEL F., KOTTEK M., 2010 : Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135-141.
- SEGUIN B., SOUSSANA J.-F., 2008 : Émissions de gaz à effet de serre et changement climatique : causes et conséquences observées pour l'agriculture et l'élevage. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 55, 79-91.
- STAHL K., 2001 : *Hydrological drought: A study across Europe*. Doctoral thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 122 p.

TÓTH J. P., VÉGVÁRI Z. S., 2015 : The future of wine grape growing regions in Europe. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(1), 64-72.

VIERS G., 1968 : *Éléments de climatologie*. Nathan, Paris, 224 p.

VIERS G., 1988 : *Un pays pluvieux : le Pays Basque de France*. In : *Climats et Climatologie : volume d'hommage au Professeur Pierre Pagney*. Centre de recherche de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 497-508.

VIGNEAU J.-P., 1990 : *Vous avez dit océanique ? Introduction à l'étude des régions climatiques du Sud-Ouest français*. In : *Paysages et Sociétés. Péninsule Ibérique, France, Régions atlantiques. Mélanges géographiques en l'honneur du Professeur Abel Bouhier*. Université de Poitiers : Travaux du Centre de Géographie Humaine et Sociale, 17, 345-359.

WALTER H., 1984 : *Vegetation und Klimazonen*. Stuttgart : Eugen Ulmer, 382 p.