



HAL
open science

Spatial and temporal variability of dry periods in France since 1950.

Florian Raymond, Albin Ullmann

► **To cite this version:**

Florian Raymond, Albin Ullmann. Spatial and temporal variability of dry periods in France since 1950.. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2021, pp.988. 10.4000/cybergeo.37260 . hal-03437145

HAL Id: hal-03437145

<https://hal.science/hal-03437145v1>

Submitted on 23 May 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Variabilité spatio-temporelle des séquences sèches en France depuis 1950

Spatial and temporal variability of dry periods in France since 1950

Variabilidad espacio-temporal de los periodos secos en Francia desde 1950

Florian Raymond et Albin Ullmann



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergegeo/37260>

DOI : [10.4000/cybergegeo.37260](https://doi.org/10.4000/cybergegeo.37260)

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Université Paris Nanterre



Référence électronique

Florian Raymond et Albin Ullmann, « Variabilité spatio-temporelle des séquences sèches en France depuis 1950 », *Cybergegeo: European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 988, mis en ligne le 26 juillet 2021, consulté le 23 mai 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/37260> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergegeo.37260>

Ce document a été généré automatiquement le 16 février 2023.



Creative Commons - Attribution 4.0 International - CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Variabilité spatio-temporelle des séquences sèches en France depuis 1950

Spatial and temporal variability of dry periods in France since 1950

Variabilidad espacio-temporal de los periodos secos en Francia desde 1950

Florian Raymond et Albin Ullmann

Introduction

- 1 En France, le changement climatique se traduit notamment par une augmentation des températures moyennes annuelles depuis les années 1950, de l'ordre de +0,31°C par décennie (Gibelin *et al.*, 2015). Cette augmentation de la température moyenne annuelle est principalement due à l'augmentation des températures printanières et estivales (+0,33°C/décennie et +0,58°C/décennie) et, dans une moindre mesure, à l'augmentation des températures automnales et hivernales (+0,2°C/décennie et +0,28°C/décennie). En ce qui concerne les précipitations, la variabilité temporelle est spatialement moins homogène à l'échelle de la France, avec une différenciation assez nette entre le Sud et le Nord, marquée par une hausse des cumuls annuels moyens sur la partie nord, et une baisse sur la partie sud (évolutions cependant non statistiquement significatives ; Gibelin, 2015).
- 2 À propos des phénomènes pluviométriques extrêmes, Soubeyroux *et al.* (2015) montrent qu'il est difficile de mettre en avant une évolution à la hausse des précipitations intenses en France depuis 1950. Pour l'extrême inverse, c'est-à-dire l'absence ou le déficit de pluie, Zolina *et al.* (2013) indiquent que la tendance depuis les années 1950 ne dessine pas d'évolutions régionales claires. Via l'indice de sécheresse de De Martonne, Moisselin *et al.* (2002) montrent qu'il y a une certaine opposition Nord/Sud en France entre 1901 et 2000, avec le Nord qui a été de plus en plus humide, et le Sud qui s'est inversement asséché. En 2008 a débuté le projet CLIMSEC (Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol ; Soubeyroux *et al.*, 2012), dans le

but d'exploiter au maximum les systèmes en place, tant les modèles numériques que les simulations déjà menées, afin d'étudier les indicateurs de sécheresse en France. Ces travaux mettent notamment en avant la période 1985-1993, comme étant la plus régulièrement soumise aux sécheresses en France (Soubeyroux *et al.*, 2010). Au cours du XXI^e siècle, Vidal *et al.* (2012) estiment que toutes les caractéristiques spatio-temporelles des épisodes de sécheresse devraient augmenter considérablement, avec des changements plus marqués pour les sécheresses agricoles.

- 3 Afin d'appréhender la sécheresse météorologique, la plupart des études se basent essentiellement sur les déficits des cumuls de pluie à l'échelle annuelle, saisonnière ou mensuelle (Hoerling *et al.*, 2012 ; Hertig *et al.*, 2013) ou alors sur différents indices statistiques standardisés tels que le *Standardized Precipitation Index* ou le *Palmer Drought Severity Index* (Vidal *et al.*, 2010, 2012 ; Zakhem, Kattaa, 2016 ; Drumont *et al.*, 2017 ; Hertig, Trambly, 2017 ; Spinoni *et al.*, 2018). Sur la France, Vidal *et al.* (2010) ont également utilisé l'indice *Standardized Precipitation Index* pour créer une base de données rétrospective des épisodes de sécheresse en France entre 1958 et 2008. Cependant, ces approches par indicateurs moyens ne permettent pas d'appréhender la distribution temporelle des pluies au sein même d'une année ou d'une saison. En effet, un cumul déficitaire de pluie calculé à la fin d'une période donnée (année ou saison) peut être dû à un nombre important de jours sans pluie dispersés dans le temps et entrecoupés de jours pluvieux. En revanche, ce même cumul pluviométrique déficitaire peut aussi être la conséquence de jours consécutifs sans pluie regroupés dans une longue séquence. C'est ce que l'on appelle les séquences sèches ou *dry spells*, qui permettent notamment de bien caractériser la structure interne de la sécheresse climatique (Douguedroit, 1983). En termes d'impacts, ces séquences sont davantage préjudiciables sur le cycle de l'eau et sur les activités socio-économiques qui en dépendent, et notamment sur l'agriculture. Raymond *et al.* (2018b) ont par exemple récemment montré que les longues séquences sèches en Espagne expliquent une part originale et plus importante des pertes de rendement des grandes cultures non irriguées (blé, orge, avoine) qu'un simple cumul pluviométrique moyen déficitaire en raison de pluies plus faibles que la normale. En outre, les longues séquences sèches y sont également la cause principale des étiages sévères des grands cours d'eau (Raymond, 2017).
- 4 Dernièrement, la France a été affectée par de très longues séquences sèches, entraînant un fort déficit en eau, sur la moitié nord du pays en juillet 2019, et sur l'ensemble du territoire en septembre 2018 et en juillet 2020 (Rapport AGRESTE, 2018, 2019, 2020). Ces séquences sèches ont eu des conséquences directes et particulièrement fortes sur l'agriculture, avec notamment d'importants retards dans le calendrier des semis d'hiver, mais surtout en entraînant un déficit drastique des rendements des prairies qui a eu pour conséquence une pénurie de fourrage (<https://agriculture.gouv.fr> ; <https://senat.fr>). Ces épisodes de sécheresse pluviométrique ont également impacté les eaux de surface, avec des étiages sévères des cours d'eau comme le Doubs ou la Saône, nécessitant l'arrêt de la navigation avec des conséquences fortes sur le tourisme fluvial. Plus au nord, l'importante baisse du niveau du Rhin a imposé une diminution du tonnage de marchandise transitant par transport fluvial, avec par exemple une perte de plus de 25 % du trafic de marchandise en transit au niveau du Port Autonome de Strasbourg en septembre et octobre 2018 (<http://www.strasbourg.port.fr>).
- 5 Ainsi, dans le contexte du changement climatique, l'objectif de cette étude est d'appréhender la variabilité spatiale et temporelle des séquences sèches à l'échelle de

la France métropolitaine depuis les années 1950. Ce travail se focalise notamment sur les séquences sèches les plus longues, qui jouent un rôle prépondérant dans l'appréhension des impacts de ces épisodes secs sur les activités socio-économiques qui dépendent du cycle de l'eau. Dans cet article, le terme de sécheresse sera donc utilisé pour qualifier la sécheresse pluviométrique (ou météorologique) étudiée à travers l'absence de pluie sur des séquences plus ou moins longues. Cette étude n'a donc pas pour vocation de considérer la sécheresse dans tous les compartiments du cycle de l'eau. Les données et la méthode sont présentées dans la première partie. La variabilité spatio-temporelle de la distribution des jours secs est ensuite présentée dans la deuxième partie. Celle des séquences sèches l'est dans la troisième partie. Les très longues séquences sèches sont étudiées dans la quatrième partie. Enfin, une ultime partie est dédiée à la discussion sur les principaux résultats.

Données et méthode

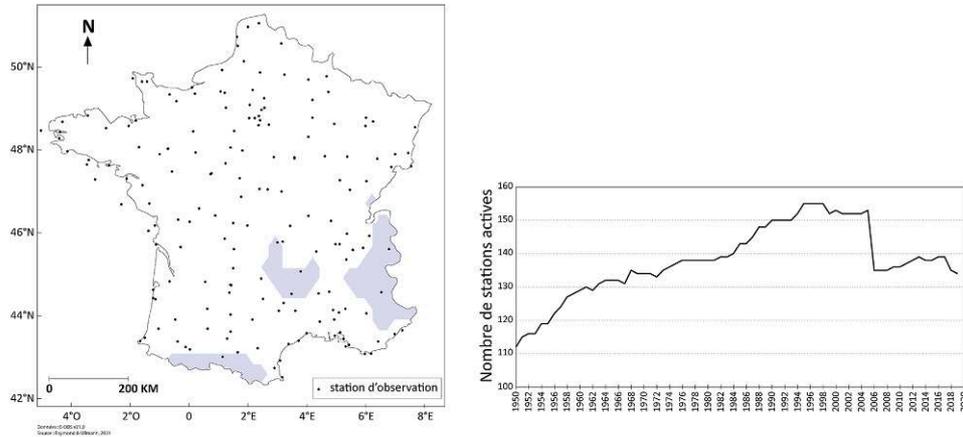
Données climatiques

- 6 Les données quotidiennes de précipitation E-OBS v.21.0e sont ici utilisées pour étudier les séquences sèches en France. Fournie par le "European Climate Assessment & Dataset project" (ECA&D ; Klok, Klein Tank, 2009) sur la période 1950-2019, cette grille de données, ayant ici pour résolution 0,1° (soit environ 10 km en longitude et latitude), est construite grâce à 16 038 séries issues de stations d'observation réparties à travers l'Europe, l'Asie occidentale et l'Afrique du nord (Haylock *et al.*, 2008 ; Cornes *et al.*, 2018). L'ensemble de données pour les précipitations quotidiennes (100 membres) est produit au moyen d'une procédure de simulation conditionnelle. Pour chacun des membres de l'ensemble, un champ aléatoire spatialement corrélé est produit à l'aide d'une fonction de corrélation spatiale pré-calculée. La moyenne à travers les membres est calculée et est fournie sous forme de champs de "meilleure estimation" (Cornes *et al.*, 2018). L'occurrence des précipitations a été "grillée" séparément aux cumuls en utilisant la méthode d'interpolation du spline en plaque mince (SPM). Nous avons bien conscience que les données grillées E-OBS ne sont pas strictement représentatives de la réalité du terrain à fine échelle, car cela dépend pleinement de la densité des stations utilisées sur le territoire étudié. Cette base de données est issue de l'interpolation spatiale, qui est pleinement influencée par la densité des stations d'observation utilisées sur le terrain. Là où il y a très peu de stations d'observations, les données E-OBS sont des données numériques liées à cette interpolation, et non à l'observation. Cependant, cette base de données est largement utilisée et validée.
- 7 Comme mentionné par Hofstra *et al.* (2009), un tel ensemble de données contient inévitablement des erreurs et des incertitudes, qui proviennent de nombreuses sources comme des changements dans l'emplacement des stations, des erreurs de mesure, des incertitudes liées à l'interpolation et à la densité du réseau de stations. C'est pourquoi l'ensemble de données E-OBS a été évalué de manière exhaustive dans la littérature (Hofstra *et al.*, 2009, 2010 ; Kyselý, Plavcová, 2010 ; Flaounas *et al.*, 2012 ; Herrera *et al.*, 2012 ; Prein, Gobeit, 2017). Hofstra *et al.* (2009) ont comparé les données E-OBS à trois autres ensembles de données qui ont une densité de stations plus élevée. Leurs résultats montrent que les données E-OBS reproduisent assez bien l'évolution temporelle des séries de précipitations, ainsi que les distributions spatiales. Hofstra *et*

al. (2010) ont approfondi l'influence de la densité du réseau sur l'estimation des moyennes surfaciques dans E-OBS. Leurs résultats ont confirmé le fait qu'un réseau clairsemé a un impact sur la distribution des précipitations surfaciques (sous-estimation de la moyenne et de la variance, encore plus pour les quantiles supérieurs), ce qui est dû au sur-lissage de la procédure d'interpolation. Kysely et Plavcová (2010) et Herrera *et al.* (2012) ont quant à eux comparé les données E-OBS avec des ensembles de données qui ont été spécifiquement conçus pour une région particulière, avec une densité de stations plus élevée que le réseau sous-jacent utilisé dans E-OBS. Les résultats obtenus à partir des deux études confirment que la densité clairsemée du réseau peut avoir un impact sur la queue de la distribution, en raison du lissage d'interpolation. Flaounas *et al.* (2012) ont comparé les données E-OBS avec des stations du programme HyMeX (Drobinski *et al.*, 2014) dans trois secteurs différents de la région méditerranéenne. En comparaison avec les études précédemment mentionnées (Hofstra *et al.*, 2009, 2010 ; Kysely, Plavcová, 2010 ; Herrera *et al.*, 2012), les résultats de Flaounas *et al.* (2012) montrent que les données E-OBS sont en meilleur accord avec les ensembles de données d'observation (bien que les régions soient différentes). Enfin, comme l'ont montré Prein et Gobeit (2017), les données en points de grille telles que E-OBS ont tendance à sous-évaluer la présence et les cumuls des précipitations dans les régions de montagne. Il ressort donc de ces évaluations que les données E-OBS sont une base de données intéressante, mais qui doit être utilisée de manière appropriée. Par exemple, la base de données E-OBS n'est pas adaptée à l'étude approfondie d'événements climatiques extrêmes tels que les précipitations intenses, car les valeurs des précipitations extrêmes sont nettement sous évaluées par rapport aux observations ponctuelles. Dans cette étude, on ne s'intéresse cependant pas aux cumuls de pluie, mais bien à l'absence et à la présence de pluie, ce qui est plutôt très bien reproduit dans la base de données E-OBS, notamment en plaine, comme l'ont démontré les études ci-dessus.

- 8 Pour le territoire français métropolitain (hormis la Corse), ce sont les séries issues de 173 stations d'observation qui sont utilisées pour alimenter la base de données E-OBS v. 21.0 (figure 1). Dans les faits, comme le montre la figure 1, sur la période 1950-2019, à aucun moment les 173 stations sont actives en même temps, car certaines sont mises en place plus tardivement et/ou se sont arrêtées précocement. En 1950, seules 112 des 173 stations sont déjà actives, d'autres se rajoutant au fil du temps pour arriver à 155 stations d'observation actives entre 1995 et 1998, seuil maximum de la période d'étude. Cette étude ayant pour thématique les séquences sèches en France métropolitaine, seuls les 6322 points de grilles couvrants le territoire français métropolitain sont conservés sur la fenêtre étudiée, allant de 5°O à 9°E et de 42°N à 52°N. Il est à noter que pour les régions de montagne (points de grille avec une altitude moyenne au-dessus de 1 000 m, en grisé sur la figure 1), le nombre de stations de mesure reste faible (1 station dans les Pyrénées, 3 stations dans le Massif central, 2 stations dans les Alpes). Ainsi, les résultats qui sont observés sur ces secteurs de montagne sont à prendre avec du recul, étant donné la très faible densité des stations et la tendance à sous-évaluer la présence des précipitations en montagne dans les données E-OBS. Ces données sont intéressantes pour travailler à des échelles régionales, étudier les dynamiques régionales, mais ne remplaceront en aucun cas les observations *in situ* pour des études portant sur la variabilité locale du climat.

Figure 1 : localisation des 173 stations d'observation situées sur le territoire métropolitain (hormis la Corse)



Lecture : En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS. L'évolution du nombre de stations d'observation actives en France métropolitaine sur la période 1950-2019 est montrée sur le panel de droite.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

Détection des séquences sèches

- 9 Un jour est considéré comme sec si le cumul des précipitations quotidiennes reçu est inférieur au seuil de 1mm, et ce pour chacun des 6322 points de grille étudiés. Ce seuil de 1mm est moins exposé aux erreurs de mesure sur les pluies faibles faites par les pluviomètres (Frei *et al.*, 2003). Ainsi, le seuil de 1mm sert régulièrement de référence dans la littérature scientifique pour dissocier les jours pluvieux des jours secs (Saaroni *et al.*, 2015 ; Raymond *et al.*, 2016 ; Hertig, Trambly, 2017 ; Fall *et al.*, 2019).
- 10 Dans cette étude et pour chacun des points de grille étudiés, une séquence sèche est définie comme une succession de jours secs. L'ensemble des séquences sèches est alors détecté pour les 6322 points de grille étudiés. Sur l'ensemble de la période 1950-2019 et pour l'ensemble des points de grille étudiés, les séquences sèches détectées sont comprises entre 1 jour et plusieurs dizaines de jours secs consécutifs. Cependant, dans le traitement des séquences sèches, les séquences de 1 jour sont retirées, car 1 jour sec compris entre deux jours humides ne peut pas vraiment être caractérisé de "séquence". De plus, les jours secs isolés représentent à eux seuls plus de 30 % de l'ensemble des séquences sèches détectées pour l'ensemble des points de grille étudiés. Conserver les jours secs isolés dans le traitement des séquences sèches biaiserait alors la notion de "séquence", c'est pourquoi ces jours secs isolés sont exclus de l'analyse. Ainsi dans cette étude, on considère comme une "séquence sèche" au moins deux jours consécutifs sans pluie. L'analyse de la variabilité des jours secs et séquences sèches est effectuée par décennie (7 décennies en tout), pour limiter les effets de la variabilité interannuelle et mettre en avant un signal plus clair sur la présence ou non d'évolution des caractéristiques des jours secs/séquences sèches sur les 70 dernières années.
- 11 Pour affiner l'analyse des séquences sèches en France sur la période 1950-2019, la détection de ces dernières est effectuée par saison. Ainsi, les quatre saisons calendaires sont ici utilisées, à savoir le printemps (mars/avril/mai), l'été (juin/juillet/août),

l'automne (septembre/octobre/novembre) et enfin l'hiver (décembre/janvier/février). Les séquences sèches sont détectées pour chacune des quatre saisons, soit pour les 70 printemps/étés/automnes de la période 1950-2019, mais pour seulement 69 hivers, car le mois de décembre 1949 et les mois de janvier et février 2020 ne sont pas disponibles dans la base de données E-OBS v.21.0.

- 12 Pour détecter les séquences sèches les plus longues, qui sont les plus impactantes, la première partie de la méthode développée par Raymond *et al.* (2016) est ici appliquée pour chacune des 4 saisons. Ainsi, dans un premier temps, pour chacun des points de grille étudiés et pour chacune des 7 décennies étudiées, on va retenir la gamme des différentes durées des séquences sèches détectées. Par exemple, si plusieurs séquences sèches d'une durée de 5 jours sont détectées pour un point de grille donné, on ne retiendra qu'une seule fois la valeur 5 (on retient donc uniquement la valeur de la durée, et non l'effectif associé à cette durée). Une fois l'ensemble des durées uniques appréhendées par saison, sont considérés comme "très longues séquences sèches", pour chacune des décennies, tous les épisodes dont la durée est supérieure au centile 80 (P80) appliqué à la gamme des durées des séquences sèches par points de grille, pour chacune des 4 saisons. Cette méthode est appliquée à chacune des 7 décennies étudiées, il y aura donc une valeur de centile 80 par décennie et par saison (et par point de grille), permettant de détecter les très longues séquences sèches propres à chaque décennie pour chacune des 4 saisons.
- 13 Étudier les séquences sèches par saisons est ici d'importance à plus d'un titre. En effet, sous les latitudes étudiées, les conditions pluviométriques sont particulièrement variables d'une saison à l'autre. Pour qualifier une séquence sèche de "longue", via un percentile, il est logiquement nécessaire de les considérer pour chacune des saisons. En outre, des séquences sèches se produisant par exemple en hiver, lorsqu'il devrait normalement pleuvoir, n'auront pas le même type d'impact que celles apparaissant en été lorsque les pluies sont déjà moins abondantes et fréquentes. Ainsi, dissocier l'étude de ces séquences en fonction des saisons permet d'être plus en phase avec les échelles temporelles idoines pour les études d'impact des sécheresses pluviométriques.

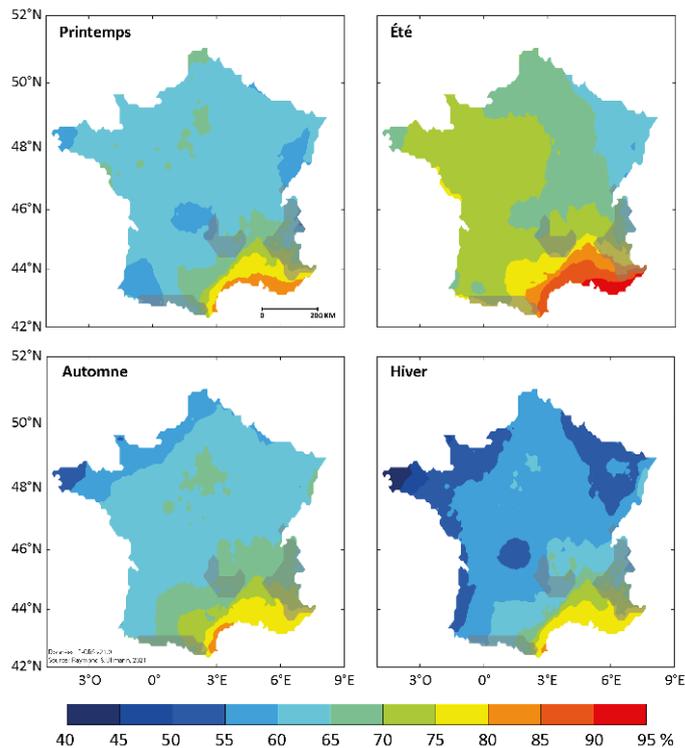
Variabilité spatio-temporelle de la distribution des jours secs

- 14 Avant d'étudier à proprement parler les séquences sèches, il est nécessaire d'analyser la distribution moyenne des jours secs et sa variabilité au cours de la période d'étude. La figure 2 montre ainsi le ratio moyen de jours secs par saison sur l'ensemble de la période d'étude. Sans surprise, on voit que la saison la moins fréquemment arrosée en France métropolitaine est l'été, avec de 55 % à 95 % de jours secs en moyenne. À l'inverse, la saison la plus régulièrement arrosée est l'hiver, avec moins de 45 % de jours secs sur certains secteurs.
- 15 Que ce soit au printemps, en été, à l'automne ou en hiver, on voit qu'une large région, principalement sous influence méditerranéenne (Sud-Est), est clairement le secteur français pour lequel il y a le plus fort ratio de jours secs, soit le secteur où il pleut le moins fréquemment. Ainsi, jusqu'à 85 % des jours en hiver sont secs sur l'extrême ouest du littoral méditerranéen, et jusqu'à 80 % pour le reste du littoral. À l'automne, le ratio de jours secs atteignant jusqu'à 85 % des jours d'hiver s'étend presque sur la moitié ouest du littoral méditerranéen. Au printemps, c'est tout le littoral méditerranéen qui

observe en moyenne jusqu'à 85 % de jours secs. En été, le littoral méditerranéen dépasse les 85 % de jours secs, atteignant même une moyenne s'approchant des 95 % de jours secs sur la moitié est de cette région. D'une manière générale, le climat méditerranéen, sous l'influence duquel se trouve ce large secteur littoral, est davantage sec que les autres grands types de climat affectant le territoire français (océanique, semi-continentale et de montagne ; Joly *et al.*, 2010), d'autant plus en été.

- 16 À l'inverse, les deux secteurs français les plus régulièrement arrosés, et donc avec le plus faible ratio moyen de jours secs par saison, se situent au niveau de la Bretagne/Normandie et de la région Grand Est. À l'automne, près d'un jour sur deux est sec sur la partie est de la Bretagne et sur l'extrême nord du département de la Manche. En hiver, près d'un jour sur deux est sec sur la grande majorité du Nord-Est, et jusqu'à seulement 40 % des jours sont secs au niveau du Finistère.

Figure 2 : ratio moyen de jours secs (seuil 1 mm/jour) pour chacune des 4 saisons sur la période 1950-2019



Lecture : En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

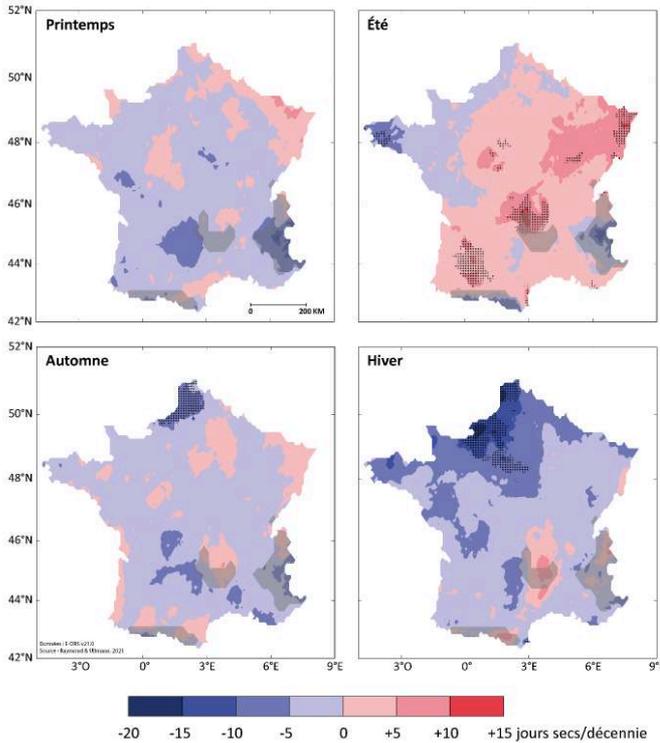
Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 17 La figure 3 montre les tendances associées au nombre moyen de jours secs par saison pour les 7 dernières décennies. Au printemps, les tendances majoritaires montrent un recul du nombre de jours secs, notamment au niveau des Alpes. En effet, 81 % du territoire français métropolitain est associé à une baisse du nombre de jours secs mais aucune n'est statistiquement significative (seuil de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson). L'automne est également majoritairement affecté par une baisse de nombre de jours secs (80 % du territoire), avec cette fois-ci des secteurs où la baisse est

significative, notamment au nord de la France, avec de -5 à -10 jours secs par décennie sur les 70 dernières années.

- 18 Une nette opposition est observée entre l'été, marqué par une augmentation du nombre de jours secs quasi-généralisée sur l'ensemble du territoire, et l'hiver, où à l'inverse la tendance quasi-globale est à la diminution du nombre de jours secs (figure 3). En été, 74 % du territoire français est concerné par une augmentation du nombre de jours secs, témoignant probablement d'un signal à l'assèchement estival quasi-généralisé. En outre, il est à noter que la grande majorité des tendances qui sont statistiquement significatives est associée à une augmentation du nombre de jours secs (14 % des secteurs montrant une augmentation du nombre de jours secs ont un signal significatif). Ces augmentations significatives s'organisent surtout selon un large axe Sud-Ouest/Nord-Est, avec des évolutions pouvant aller jusqu'à +15 jours secs par décennie, comme au nord du Massif Central. Seuls certains secteurs montrent des tendances inverses, à savoir le sud du Finistère et une partie des Alpes (figure 3). En hiver, 90 % du territoire montre des diminutions du nombre de jours secs mais avec seulement 7 % de diminutions significatives (figure 3). C'est le cas de la moitié nord de la France, qui est en quasi-totalité affectée par un recul du nombre de jours secs, avec des résultats significatifs pouvant aller jusqu'à -20 jours secs par décennie en Seine-Maritime et dans le Pas-de-Calais.
- 19 Pour résumer, depuis les années 1950, la majeure partie de la France a vu le nombre de jours secs augmenter en été. Autrement dit, l'été est de moins de moins fréquemment arrosé. Cette tendance participe potentiellement à un assèchement estival quasi-généralisé à l'ensemble de la France métropolitaine, bien que pour caractériser pleinement un assèchement estival, il faudrait également prendre en considération l'évolution des cumuls de pluie estivaux. En hiver, ces jours secs tendent à être moins fréquents sur la plupart du territoire, avec cependant peu de diminutions fortes et significatives. Pour les saisons de transition, l'automne et le printemps, les évolutions sont plus spatialement complexes, bien que les diminutions du nombre de jours secs soient majoritaires. Cependant, presque aucune tendance n'est statistiquement significative durant ces deux saisons de transition.

Figure 3 : évolution du nombre total de jours secs par décennie pour chacune des quatre saisons sur la période 1950-2019



Lecture : Par exemple, + 15 jours secs/décennie en saison estivale représente une augmentation d'environ +105 jours (15×7 décennies) sur les 920 jours (10×92 jours) entre la première et la dernière décennie estivale étudiée. Les secteurs en pointillés noirs montrent des tendances statistiquement significatives pour un seuil de 0,05, d'après le test de Bravais-Pearson. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 20 Appréhender l'absence de pluie par l'étude des séquences sèches et de leurs caractéristiques spatiales (structuration géographique) et temporelles (saisons, durées, nombres, tendances) permet de mieux comprendre la structuration interne, c'est-à-dire infra saisonnière, de la sécheresse pluviométrique. C'est pourquoi l'étude va désormais porter sur les séquences sèches.

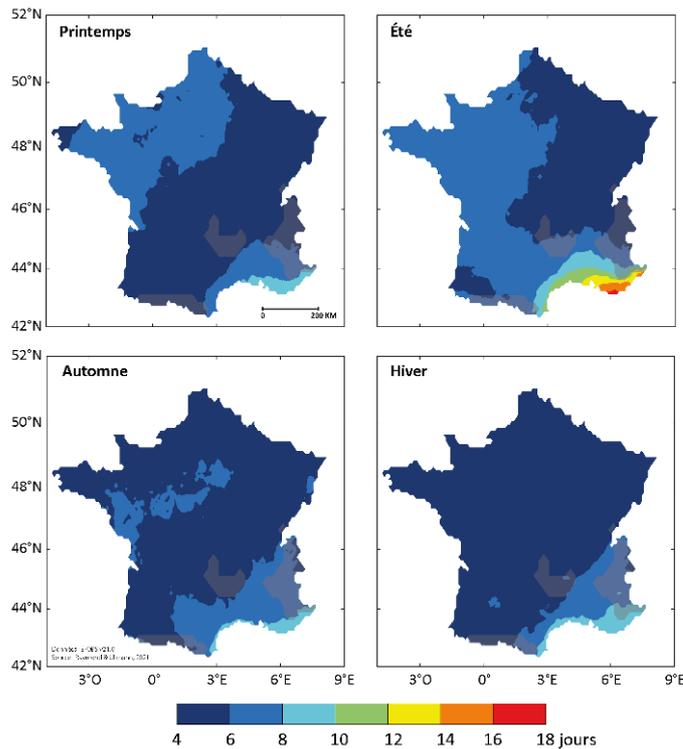
Variabilité spatio-temporelle des séquences sèches

Évolution de la durée moyenne de séquences sèches

- 21 Que ce soit au printemps, en été, à l'automne ou en hiver, lorsqu'il ne pleut pas sur le territoire français métropolitain, cela dure en moyenne entre 4 et 8 jours consécutifs. Seul le Sud-Est de la France observe des séquences sèches en moyenne bien plus longues, avec au moins 8 jours secs consécutifs au printemps, à l'automne et en hiver, et jusqu'à 18 jours secs consécutifs en été, avec un maximum aux alentours de Toulon. Ces observations sont cohérentes avec celles de la figure 2, car ce large secteur, principalement sous influence méditerranéenne, est bien moins fréquemment arrosé que le reste du territoire, notamment en été, avec jusqu'à 95 % de jours sans pluie.

Ainsi, les quelques jours pluvieux autour du littoral méditerranéen sont espacés par des périodes sèches les plus longues du territoire.

Figure 4 : durée moyenne des séquences sèches par saison pour la période 1950-2019

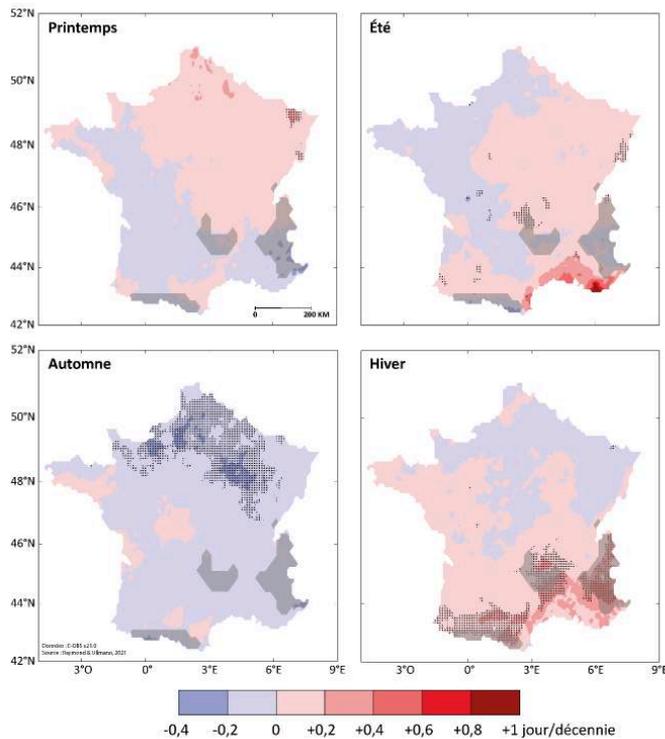


Lecture : Dans la détection des séquences sèches, les jours secs isolés (un jour sec entouré par deux jours pluvieux) ne sont pas comptabilisés. En grisés, les points de grille contenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 22 Au printemps et en été, environ 60 % du territoire français métropolitain est affecté par une légère augmentation de la durée moyenne des séquences sèches depuis les années 1950 (principalement toute la moitié est du pays), avec cependant très peu de tendances significatives (figure 5). Seuls la Moselle, le Haut-Rhin, le Puy-de-Dôme et l'Allier connaissent une augmentation significative de la durée des séquences sèches durant ces deux saisons (figure 5). Il est à noter qu'en été, c'est tout le pourtour méditerranéen qui montre les plus fortes augmentations de la durée moyenne des séquences sèches, avec de +0,2 à +1 jour/décennie. Pour autant, ces évolutions les plus marquées ne sont pas statistiquement significatives (figure 5). C'est surtout en automne et en hiver que la France a connu les évolutions les plus marquées. En automne, la tendance est à une baisse généralisée de la durée des séquences sèches sur plus de 85 % du territoire, et notamment pour le Nord de la France, où cette baisse est la plus importante et significative (figure 5). En hiver, c'est l'inverse, puisque plus de 65 % du territoire est affecté par une hausse de la durée des séquences sèches, avec des augmentations significatives concentrées dans la moitié sud du pays (figure 5).

Figure 5 : évolution de la durée moyenne des séquences sèches par décennie pour chacune des quatre saisons sur la période 1950-2019



Lecture : Les secteurs en pointillés noirs montrent des tendances statistiquement significatives pour un seuil de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

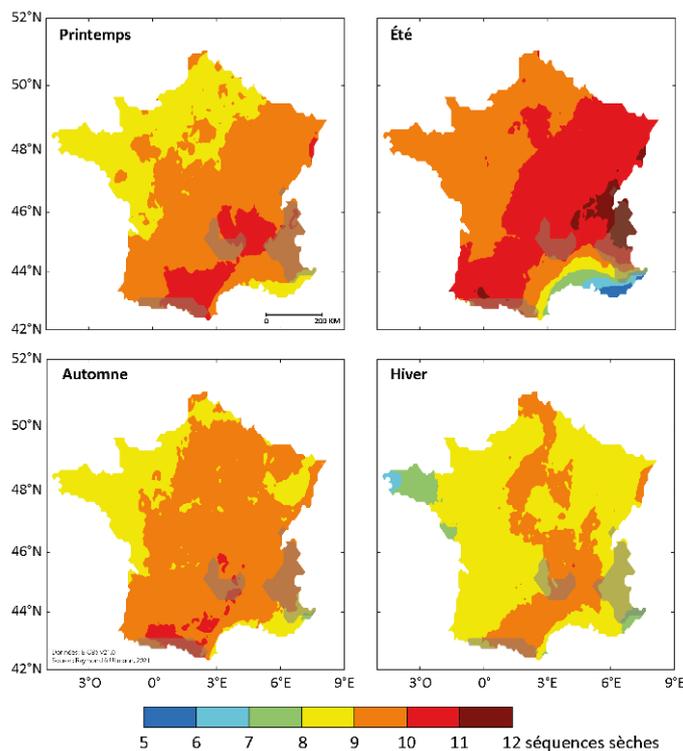
- 23 En comparant la figure 5 à la figure 3, on retrouve certaines concordances entre l'évolution du nombre de jours secs et l'évolution de la durée des séquences sèches. Ainsi, la diminution du nombre de jours secs statistiquement significative observée dans le Nord de la France à l'automne (figure 3) est associée à une diminution statistiquement significative de la durée moyenne des séquences sèches (figure 5). En été, les quelques secteurs étant associés à une augmentation statistiquement significative du nombre de jours secs (Sud-Ouest, Centre, Nord-Est ; figure 3) semblent également être associés à une augmentation statistiquement significative de la durée moyenne des séquences sèches (figure 5).
- 24 Pour autant, une concordance entre l'évolution du nombre de jours secs et l'évolution de la durée moyenne des séquences sèches n'est pas systématique. C'est notamment le cas en hiver, où le nombre de jours secs diminue de manière marquée et statistiquement significative sur la moitié nord du pays (figure 3), sans pour autant que cette diminution soit associée à une baisse statistiquement significative de la durée des séquences sèches (figure 5). Inversement, la moitié sud de la France n'est pas affectée par une augmentation statistiquement significative du nombre de jours secs hivernaux (figure 3), alors que la durée des séquences sèches l'est (figure 5). Ainsi, les évolutions du nombre de jours secs moyen entre les années 1950 et les années 2010 peuvent être expliquées en partie par l'évolution de la durée des séquences sèches, mais pas

uniquement. C'est pourquoi il est également intéressant de regarder l'évolution du nombre de séquences sèches par saison.

Évolution du nombre moyen de séquences sèches

- 25 Que ce soit au printemps ou à l'automne, le territoire français est en moyenne affecté par 8 à 11 séquences sèches par saison (figure 6), ayant une durée comprise entre 4 et 8 jours (figure 4). En hiver, le nombre moyen de séquences sèches est légèrement inférieur, à savoir entre 8 et 10 séquences sèches pour la grande majorité du territoire et de 6 à 8 séquences sèches en Bretagne, car cette région est plus régulièrement arrosée en hiver que le reste du pays (entre 45 % et 60 % de jours humides ; figure 2).
- 26 Contrairement aux trois autres saisons, l'été montre un contraste important en termes de nombre de séquences sèches. L'été est la saison affectée par le plus grand nombre de séquences sèches pour la quasi-totalité du territoire, avec en moyenne de 9 à 12 séquences sèches (figure 6). Cette observation est logique car c'est en été que le territoire français est le moins fréquemment arrosé (figure 2). En revanche, le pourtour méditerranéen est affecté par le plus faible nombre de séquences sèches, toutes saisons confondues (entre 5 et 9 séquences sèches), car lorsqu'elles se produisent, ces séquences sèches estivales durent bien plus longtemps que sur le reste du pays (de 10 à 18 jours secs consécutifs en moyenne ; figure 4).

Figure 6 : nombre moyen de séquences sèches par saison pour la période 1950-2019

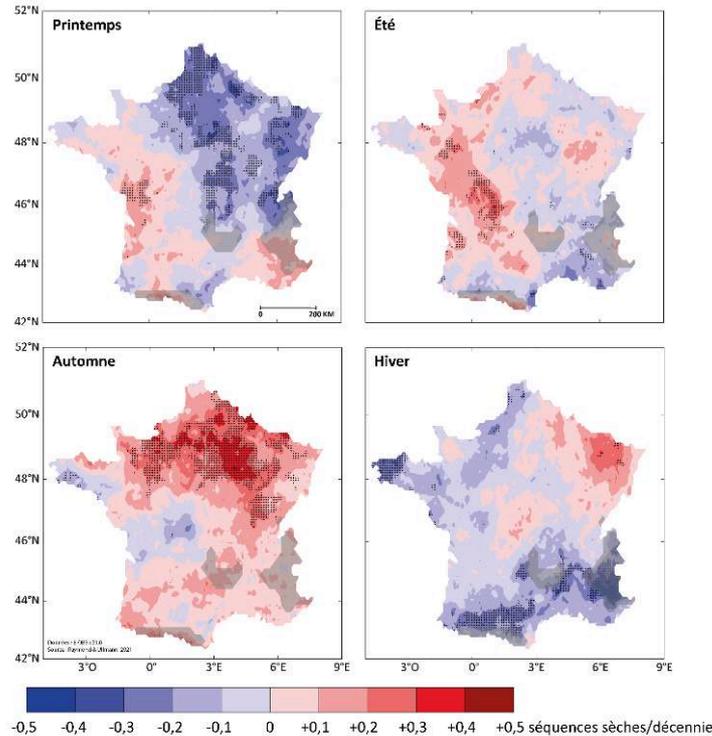


Lecture : Dans la détection des séquences sèches, les jours secs isolés (un jour sec entouré par deux jours pluvieux) ne sont pas comptabilisés. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 27 L'évolution du nombre moyen de séquences sèches entre les années 1950 et 2010 montre une vraie opposition entre le printemps et l'automne. Au printemps, le Nord et tout le quart-nord-est de la France (Hauts-de-France, Île-de-France, Grand Est, Bourgogne-France-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes) sont affectés par un recul significatif du nombre de séquences sèches par décennie, compris entre -0,1 à -0,4 séquences sèches (26 % des diminutions sont significatives ; figure 7). Cependant, les régions PACA, Nouvelle-Aquitaine et Pays de la Loire connaissent quant à elles une augmentation du nombre de séquences sèches, avec des augmentations statistiquement significatives sur un secteur bordé par La Rochelle et Poitiers (figure 7). En automne, la carte semble presque s'inverser, avec cette fois-ci une augmentation du nombre de séquences sèches s'étalant sur toute la moitié nord et le quart nord-est de la France (25 % des augmentations sont statistiquement significatives ; figure 7).
- 28 En été, c'est surtout une partie de la frange ouest de la France qui est affectée par une augmentation significative du nombre de séquences sèches, allant jusqu'à +0,4 séquences sèches par décennie autour des départements de la Vienne, de la Charente et des Deux-Sèvres. Au contraire, le pourtour méditerranéen montre quant à lui un recul du nombre de séquences sèches, mais avec seulement 2 % de baisses significatives (figure 7). En hiver, la grande majorité du pays (72 % des points de grille) est affectée par un recul du nombre de séquences sèches depuis les années 1950, pouvant atteindre jusqu'à -0,5 séquences sèches par décennie, notamment au niveau des Alpes (figure 7). Ces reculs sont les plus forts et en majorités significatifs sur une bonne partie du sud de la France, mais également sur la partie ouest de la Bretagne (figure 7). À l'inverse, le Nord-Est de la France a plutôt connu une augmentation du nombre de séquences sèches en hiver, sans pour autant être une augmentation statistiquement significative (figure 7).

Figure 7 : évolution du nombre moyen de séquences sèches par décennie pour chacune des quatre saisons sur la période 1950-2019



Lecture : Les secteurs en pointillés noirs montrent des tendances statistiquement significatives pour un seuil de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

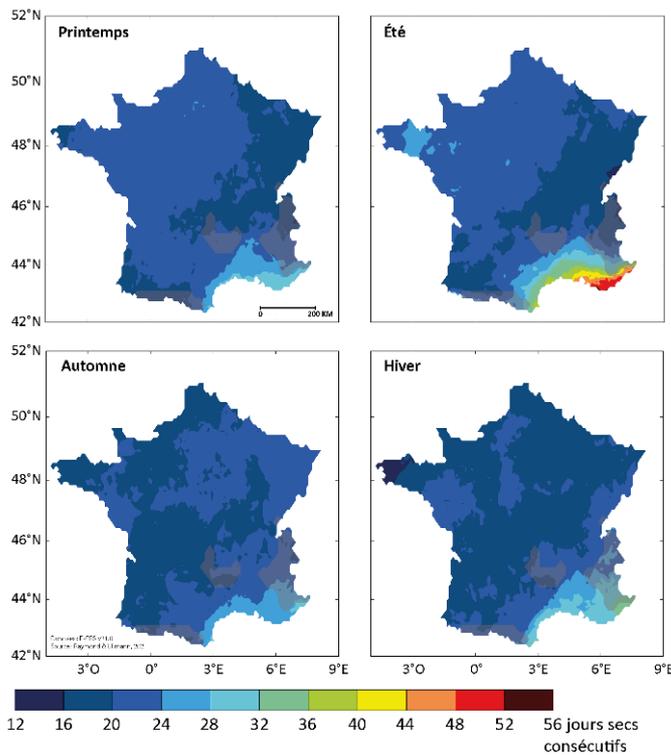
- 29 Pour résumer, en été, le littoral méditerranéen est affecté par des séquences sèches bien plus longues que pour le reste du pays. Cette différence de durée s'estompe durant les autres saisons. Le climat méditerranéen est en effet caractérisé par des étés chauds et surtout très secs par rapport au reste de la France, notamment en raison de l'effet du décalage vers le Nord des hautes pressions subtropicales associé à la retombée de la cellule de Hadley. La durée des séquences sèches a significativement baissé au nord de la France à l'automne, mais leur nombre a significativement augmenté. Inversement, la durée des séquences sèches a significativement augmenté au sud en hiver, mais leur nombre a significativement diminué. Enfin, le nombre de séquences sèches a significativement diminué sur tout le quart-nord-est de la France au printemps, alors qu'il a significativement augmenté sur presque toute la bordure ouest de la France en été.
- 30 Parmi l'ensemble des séquences sèches, il est important d'étudier les plus longues, c'est-à-dire celles jouant un rôle prépondérant dans les multiples impacts de l'absence trop prolongée de pluie sur les activités socio-économiques qui dépendent du cycle de l'eau.

Variabilité spatio-temporelle des très longues séquences sèches

Durée moyenne des très longues séquences sèches

- 31 En préambule, il est important de rappeler que les très longues séquences sèches sont définies localement (pour chaque point de grille) et que leur durée et leur nombre sont donc représentatifs des caractéristiques géo-climatiques locales. La figure 8 présente la géographie moyenne des très longues séquences sèches en France. Il en ressort deux éléments particulièrement saillants. Le premier est bien évidemment la durée des très longues séquences sèches du domaine méditerranéen, notamment en été, avec plus d'un mois consécutif sans pluie en moyenne, voire même jusqu'à 56 jours. Ce secteur, sous l'influence du climat méditerranéen, est affecté par des étés chauds et secs. Sur le reste de la France, les très longues séquences sèches estivales durent jusqu'à 24 jours en moyenne (figure 8). Cependant, il est intéressant d'ajouter que cette singularité méditerranéenne s'estompe durant les autres saisons (printemps, automne, hiver), avec cette fois-ci un écart maximum de 12 jours entre les très longues séquences sèches du domaine méditerranéen et celles observées sur le reste du territoire (figure 8). La deuxième particularité concerne les différences saisonnières dans la structuration spatiale de la durée des très longues séquences sèches. Tout d'abord, en excluant le secteur méditerranéen qui présente logiquement les séquences sèches les plus longues, on observe une certaine homogénéité sur l'ensemble du reste du territoire, avec des séquences sèches les plus longues qui durent en moyenne entre 16 et 24 jours consécutifs quelle que soit la saison. Cependant en regardant plus précisément, en hiver il s'agit plutôt d'une opposition Nord-Ouest/Sud-Est, avec des durées plus longues dans la moitié sud-est de la France que dans la moitié nord-ouest (figure 8), qui est plus régulièrement soumise au passage des systèmes dépressionnaires des latitudes tempérées générant de la pluie. En été, la France est plutôt divisée en 3 parties distinctes, avec tout d'abord l'arc méditerranéen pour lequel s'exprime pleinement la sécheresse estivale, puis une différenciation entre la façade est, plus semi-continentale et montagnarde, et le reste du pays, majoritairement sous influence océanique (figure 8). La structuration spatiale des très longues séquences sèches au printemps ressemble à celle observée en été.

Figure 8 : durée moyenne des très longues séquences sèches par saison pour la période 1950-2019



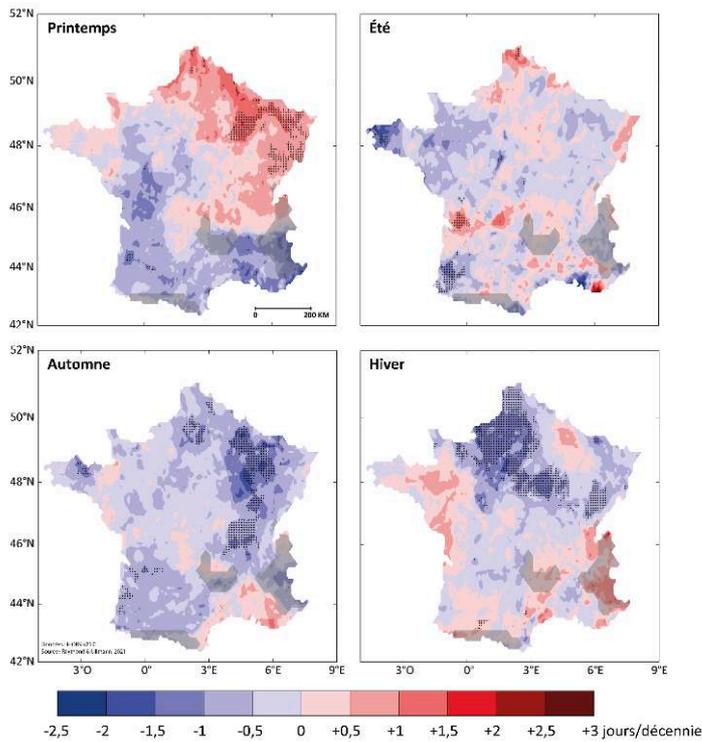
Lecture : En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

Évolution des très longues séquences sèches

- 32 La figure 9 présente les tendances des durées des très longues séquences sèches en France depuis les années 1950. Il en ressort qu'au printemps, c'est tout le quart-nord-est qui observe un allongement de ces épisodes secs les plus longs. Plus de 15 % de ces augmentations sont statistiquement significatives, notamment en Alsace et sur un secteur couvrant la Marne, la Haute-Marne, la Meuse et la Moselle (figure 9). En revanche, en automne, ces mêmes secteurs connaissent plutôt une baisse significative de la durée des très longues séquences sèches, baisse qui est d'ailleurs presque généralisée à l'ensemble du territoire français, hormis l'arc méditerranéen (figure 9). En hiver, c'est surtout le centre-nord et le Nord de la France qui voient un raccourcissement significatif de la durée des très longues séquences sèches (figure 9). Aucune structuration spatiale claire et statistiquement significative sur l'évolution de la durée des très longues séquences sèches ne se dégage en été. Les plus fortes évolutions (bien que non statistiquement significatives) s'observent sur la côte d'Azur, avec une forte augmentation au niveau de Toulon, et une diminution marquée entre Marseille et Montpellier.

Figure 9 : évolution de la durée moyenne des très longues séquences sèches par décennie pour chacune des quatre saisons sur la période 1950-2019



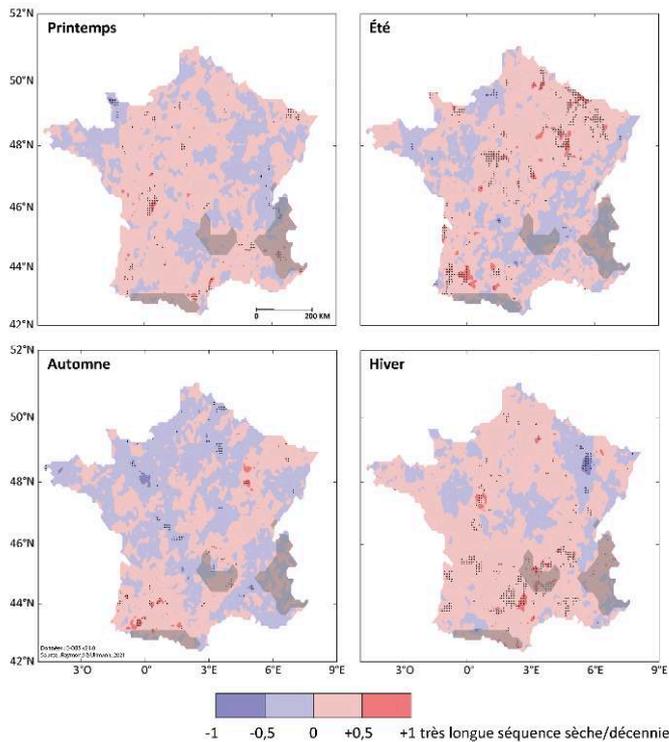
Lecture : Les secteurs en pointillés noirs montrent des tendances statistiquement significatives pour un seuil de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 33 En ce qui concerne la fréquence des très longues séquences sèches, la structuration spatiale des tendances est ici plus complexe. En effet, par définition, un épisode extrême est relativement rare et il est souvent difficile de détecter des tendances significatives spatialement structurées et homogènes. Néanmoins, la figure 10 montre qu'au printemps, en été et en hiver, plus de 68 % du territoire français est associé à une augmentation du nombre de ces très longues séquences sèches, augmentation cependant non significative pour la grande majorité. Pour autant, certaines augmentations sont significatives, principalement en été et en hiver, mais là encore, leurs géographies sont sensiblement différentes. En été, il apparaît que les augmentations statistiquement significatives du nombre de très longues séquences sèches s'organisent selon un axe Sud-Ouest/Nord-Est, traversant la France des Pyrénées-Atlantiques jusqu'aux Ardennes via le Massif Central (figure 10), et représentent 18 % des augmentations. En hiver, les augmentations significatives, représentant 15 % des augmentations, concernent essentiellement le Sud de la France et particulièrement toute la partie sud du Massif Central (figure 10). Là encore, il est intéressant de constater que pour certaines régions, comme par exemple le Sud-Ouest de la France, et pour les mêmes saisons (l'été et l'automne), les très longues séquences sèches ont tendance à se raccourcir, mais à devenir plus fréquente (figures 9 et 10). C'est l'inverse pour d'autres secteurs et d'autres saisons, comme par exemple le

département de la Manche au printemps, où les très longues séquences sèches se sont rallongées tout en devenant significativement moins fréquentes (figure 9 et 10).

Figure 10 : évolution du nombre moyen de très longues séquences sèches par décennie pour chacune des quatre saisons sur la période 1950-2019



Les secteurs en pointillés noirs montrent des tendances statistiquement significatives pour un seuil de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson. En grisés, les points de grille comprenant une altitude moyenne supérieure à 1 000 m, pour lesquels les résultats sont à prendre avec du recul compte tenu de la faible densité de stations et de la tendance à la sous-évaluation des précipitations en secteur de montagne dans les E-OBS.

Raymond F., décembre 2020, données E-OBS.

- 34 Pour résumer, en été, le littoral méditerranéen est logiquement affecté par de très longues séquences sèches, bien plus longues que pour le reste du pays. Cette différence s'estompe à nouveau durant les autres saisons. Sur le quart-nord-ouest de la France, la durée des très longues séquences sèches a significativement augmenté au printemps, alors qu'elle a significativement diminué à l'automne. En hiver, la durée des très longues séquences sèches a significativement diminué sur une majeure partie du Nord de la France.

Discussions

- 35 L'étude des sécheresses pluviométriques par une approche épisodique via les séquences sèches permet d'extraire les caractéristiques spatio-temporelles intrinsèques de l'absence de pluie en termes de durée et de fréquence, ainsi que de mieux comprendre son évolution depuis les années 1950. En automne, la mise en perspective de l'évolution de la durée des séquences sèches (figure 5) et du nombre de séquences sèches (figure 7) permet d'expliquer l'évolution du nombre de jours secs (figure 3) depuis les années

1950. En effet, la baisse significative du nombre de jours secs au nord de la France (départements de la Somme et du Pas-de-Calais ; figure 3) s'explique principalement par une diminution significative de la durée des séquences sèches (figure 5). Pourtant, on observe également que le nombre de séquences sèches y a augmenté depuis les années 1950 (figure 7). Pour autant, l'augmentation du nombre de séquences sèches sur ces deux départements n'est pas statistiquement significative et ne vient donc pas contrebalancer la diminution significative de la durée des séquences sèches. Ces modes de variabilité composites expliquent vraisemblablement une partie de la baisse significative du nombre de jours secs sur la Somme et le Pas-de-Calais. Pour le reste du territoire, l'évolution de la durée des séquences sèches et du nombre de séquences sèches semblent se compenser. Ainsi, aucune tendance clairement significative n'apparaît concernant le nombre de jours secs (figure 3), car lorsque le nombre de séquences sèches semble augmenter (figure 7), leur durée moyenne semble au contraire diminuer (figure 5), et inversement.

- 36 Le constat est du même ordre pour le printemps. Aucune tendance claire et homogène n'a été observée sur le nombre de jours secs (figure 3), car comme à l'automne, l'augmentation du nombre de séquences sèches (figure 7) semble être compensée par une diminution de la durée de ces séquences sèches (figure 5), dont les plus longues (figure 9), et inversement. Cependant, comme évoqué précédemment, la diminution statistiquement significative du nombre de séquences sèches sur une majorité de la moitié est de la France est associée à une augmentation de la durée de ces séquences sèches, statistiquement significative pour les plus longues.
- 37 En hiver, l'augmentation significative de la durée moyenne des séquences sèches au sud de la France (figure 5) est contrebalancée par la diminution du nombre de séquences sèches (figure 7), donnant lieu à une stationnarité du nombre de jours secs (figure 3). Les observations faites sur la moitié nord-est de la France, notamment les départements de la Seine-Maritime, de l'Eure et du Pas-de-Calais, montrent une diminution significative du nombre de jours secs (figure 3), qui serait probablement due au recul du nombre de séquences sèches depuis les années 1950 (figure 7), mais également au recul de la durée des séquences les plus longues (figure 9). Ces diminutions de la durée et du nombre de séquences sèches hivernales au nord-est de la France pourraient être expliquées par l'évolution de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) depuis les années 1980. En effet, comme l'explique Cassou (2004), la moitié nord de la France connaît des hivers davantage humides sur la fin du XXe siècle que dans les années 1960/1970, du fait d'une répétition de la phase positive de l'ONA, qui renforce les dépressions hivernales générant de la pluie et des vents violents sur toute la moitié nord de l'Europe. À l'inverse, la répétition de la phase positive de l'ONA donne lieu à des hivers frais mais secs sur la partie sud de l'Europe (et de la France), expliquant certainement une partie de l'augmentation de la durée moyenne des séquences sèches en hiver dans le Sud de la France. Dans son étude, Raymond (2017) montre une tendance significative à la hausse du nombre de jours de la phase positive de l'ONA par hiver (larges hivers, de septembre à avril) entre la fin des années 1950 et le début des années 2010, à l'inverse de la phase négative de l'ONA. Ainsi, la dépression islandaise et l'anticyclone des Açores ont tendance à se renforcer en hiver à la fin du XXe siècle, par rapport aux années 1950. Ce renforcement des deux principaux pôles barométriques de l'ONA a entraîné une accélération et un décalage septentrional des principaux rails des

perturbations tempérées, confirmant ainsi la répétition d'hivers plus fréquemment arrosés sur le Nord de la France et moins fréquemment arrosés sur le sud de la France.

- 38 Par ailleurs, l'augmentation du nombre de jours secs en été, associée à une augmentation de la durée moyenne des séquences sèches et du nombre des très longues séquences sèches dans la partie nord et nord-est de la France, peut être en partie expliquée par le renforcement des conditions de blocages anticycloniques sur le Nord de l'Océan Atlantique pendant la période estivale. En effet, dans leur étude, Kysely et Huth (2006) observent une augmentation de la fréquence de conditions atmosphériques estivales du type anticyclonique au-dessus de l'Europe sur la deuxième moitié du XXe siècle. De ce fait, les tempêtes estivales (associées à des conditions atmosphériques du type cyclonique), apportant de la pluie sur l'Europe de l'Ouest durant la saison traditionnellement plus sèche, ont diminué depuis le début du XXe siècle en Europe et sur le nord-est de l'océan Atlantique (Kysely, Huth, 2006 ; Wang *et al.*, 2008).
- 39 En ce qui concerne les très longues séquences sèches, dans le Nord et tout le quart-nord-est de la France, leur durée moyenne a significativement augmenté au printemps alors qu'elle a diminué en automne et en hiver (figure 9). Par ailleurs, le nombre de très longues séquences de sécheresses pluviométriques y a augmenté en été (figure 10). En hiver, c'est la moitié sud de la France qui a connu une augmentation du nombre de très longues séquences sèches (figure 10). Là encore, l'ONA, avec le décalage des principaux rails des perturbations tempérées hivernaux vers le Nord, semble jouer un rôle dans la dichotomie Nord/Sud en termes d'évolution de la durée et du nombre des très longues séquences sèches. Comme cela a été montré par Raymond *et al.* (2018a), les séquences sèches les plus longues sur la partie ouest et Nord du bassin méditerranéen sont liées à des conditions de blocages anticycloniques à large échelle, localisées à environ 1 000 km au nord-ouest des secteurs impactés par ces événements extrêmes, associées à la subsidence d'un air sec et à l'advection horizontale d'air froid et sec sur le flanc de la zone anticyclonique. Ces différents éléments vont conjointement favoriser un ciel dégagé (sans cellules convectives et donc sans nuages) et donc l'absence de précipitations sur une période plus ou moins longue. Ces longues séquences sans pluie au nord du bassin méditerranéen prennent généralement fin avec l'arrivée de conditions atmosphériques dépressionnaires depuis le nord de l'Europe, caractéristiques des Ondes de Rossby. Buehler *et al.* (2011) et Trambly et Hertig (2018) ont également fait le même constat sur les longues séquences sèches en Europe et au nord du bassin méditerranéen, qui sont associées à des blocages anticycloniques renforcés sur l'Océan Atlantique mêlés à des anomalies négatives d'humidité relative et spécifique, caractéristique de la phase positive de l'ONA. Ainsi, la durée des longues séquences sèches en France est globalement tributaire de la durée des conditions de blocages anticycloniques localisées au nord-ouest des secteurs impactés.

Conclusion

- 40 Cette étude avait pour objectif d'étudier l'absence de pluie en France depuis les années 1950 pour chacune des 4 saisons, à travers l'étude de la distribution spatio-temporelle des jours secs et des séquences sèches, notamment des plus longues.
- 41 Ainsi, au printemps et à l'automne, l'augmentation significative du nombre de séquences sèches sur la moitié nord du pays semble être compensée par la diminution significative de leur durée moyenne (et inversement), ne permettant pas de dégager

une tendance claire et marquée de l'évolution du nombre de jours secs au cours de ces deux saisons de transition. C'est également le cas en hiver pour le Sud de la France, où l'augmentation significative de la durée des séquences sèches est compensée par la diminution significative de leur nombre. En revanche, toujours en hiver, le Nord de la France est quant à lui affecté par une augmentation conjointe du nombre et de la durée des séquences sèches, et notamment des plus longues d'entre elles, entraînant une augmentation significative du nombre de jours secs depuis les années 1950. En été, saison la plus sèche, une augmentation du nombre de jours secs est avérée depuis les années 1950 sur la majeure partie du territoire. Cette dernière est principalement associée à l'augmentation de la durée moyenne des séquences sèches et du nombre des plus longs de ces épisodes.

- 42 De façon générale, une absence de tendances claires et significatives quant au nombre de jours secs en France ne veut pas forcément dire que la distribution temporelle des précipitations, et donc par ricochet des jours sans pluie, n'a pas évolué. En effet, on observe ici que dans certains cas, une absence de tendance sur le nombre de jours secs peut finalement cacher une augmentation de la durée des séquences sèches mais une diminution du nombre de ces séquences, ou inversement. De telles évolutions peuvent engendrer certains impacts pour les sociétés et l'environnement, et notamment sur l'agriculture. Comme l'ont montré Raymond *et al.* (2018b), une absence prolongée de précipitation en hiver et au printemps (sécheresse météorologique) peut engendrer une baisse significative des rendements des cultures céréalières hivernales pluviales, car les plants ont un besoin régulier en eau pendant les périodes de montaison et de floraison (sécheresse agricole). Ainsi, une diminution du nombre de séquences sèches devrait être une bonne nouvelle pour ces domaines d'activité, sauf si cette évolution est accompagnée par une augmentation de la durée de ces séquences sèches, comme c'est le cas en hiver pour la moitié sud de la France et au printemps pour une large partie de l'est du territoire.
- 43 Appréhender la sécheresse pluviométrique par l'étude des séquences sèches et de leurs caractéristiques spatiales (structuration géographique) et temporelles (saisons, durées, nombres, tendances) permet ainsi de regarder cet aléa au travers "d'épisodes réels". Cette démarche permet donc de se rapprocher des échelles de temps et d'espace idoines pour les études d'impacts. En outre, considérant que la vulnérabilité des agro-systèmes et du cycle de l'eau face à l'absence prolongée de pluie n'est pas équivalente en fonction de la saison, cette démarche permet également d'être mieux en phase avec les besoins en matière d'études des risques liés aux sécheresses pluviométriques.
- 44 Cette approche climatique typiquement géographique facilitera, par la suite, une étude prospective sur la sécheresse pluviométrique, en utilisant les simulations numériques des modèles de climat. Cela permettra d'étudier les effets du changement climatique sur les caractéristiques spatio-temporelles des séquences sèches en France au cours du XXI^e siècle, notamment des plus longues, et ainsi d'aider à l'anticipation des impacts du changement climatique sur les activités économiques dépendant du cycle de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Buehler T., Raible C.C., Stocker T.F., 2011, "The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40", *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 63, No.2, 174-187.
- Cassou C., 2004, "Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique", *Météorologie*, vol. 45, 21-32.
- Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M., Jones P.D., 2018, "An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123, 9391-9409.
- Douguedroit A., 1983, "Un siècle de sécheresse estivale à Marseille", *Climatologie*, vol. 3, 34-38.
- Drobinski P., Ducrocq V., Alpert P., Anagnostou E., Béranger K., Borga M., Braud I., Chanzy A., Davolio S., Delrieu G., Estournel C., Filali Boubrahmi N., Font J., Grubisic V., Gualdi S., Homar V., Ivancan-Picek B., Kottmeier C., Kotroni V., Lagouvardos K., Lionello P., Llasat M.C., Ludwig W., Lutoff C., Mariotti A., Richard E., Romero R., Rotunno R., Roussot O., Ruin I., Somot S., Taupier-Letage I., Tintore J., Uijlenhoet R., Wernli H., 2014, "HyMeX, a 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 95, 1063-1082.
- Drumond A., Gimeno L., Nieto R., Trigo R., Vicente-Serran S.M., 2017, "Drought episodes in the climatological sinks of the Mediterranean moisture source: The role of moisture transport", *Global and Planetary Change*, vol. 151, 4-14.
- Fall C.M.N., Lavaysse C., Drame M.S., Panthou G., Gaye A.T., 2019, "Wet and dry spells in Senegal: evaluation of satellite-based and model re-analysis rainfall estimates", *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, in review.
- Flaounas E., Drobinski P., Borga M., Calvet J.C., Delrieu G., Morin E., Tartari G., Toffolon R., 2012, "Assessment of gridded observations used for climate model validation in the Mediterranean region: the HyMeX and MED-CORDEX framework", *Environmental Research Letters*, 7. 024017.
- Frei C., Christensen J.H., Déqué M., Jacob D., Jones R.G., Vidale P.L., 2003, "Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps", *Journal of Geophysical Research*, vol. 108(D3), 4124.
- Flaounas E., Drobinski P., Borga M., Calvet J.C., Delrieu G., Morin E., Tartari G., Toffolon R., 2012, "Assessment of Gridded Observations Used for Climate Model Validation in the Mediterranean Region: the HyMeX and MED-CORDEX Framework", *Environmental Research Letters*, vol. 7, No.2, 024017.
- Gibelin A.L., 2015, "Évolution du climat passé en France métropolitaine depuis les années 1950", No.PowerPoint, [en ligne]. URL: http://www.meteo.fr/cic/meetings/2015/agrometeo/documents/1_01.pdf.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M., 2008, "A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006", *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, D20119.

Herrera S., Gutiérrez J.M., Ancell R., Pons M.R., Frías M.D., Fernandez J., 2012, "Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)", *International Journal of Climatology*, vol. 32, 74-85.

Hertig E., Seubert S., Vogt G., Paeth H., Jacobeit J., 2013, "Changes of total versus extreme precipitation and dry periods until the end of the twenty-first century: statistical assessments for the Mediterranean area", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 111, 1-20.

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

Hoerling M., Eischeid J., Perlwitz J., Quan X., Zhang T., Pegion P., 2012, "On the increased frequency of Mediterranean drought", *Journal of Climate*, vol. 25, 2146-2161.

Hofstra N., Haylock M., New M., Jones P., 2009, "Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature", *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, D21101.

Hofstra N., New M., McSweeney C., 2010, "The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data", *Climate Dynamics*, vol. 35, 841-858.

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M., Wavresky P., 2010, "Les types de climats en France, une structuration spatiale", *Cybergeo: European Journal of Geography*, [en ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, No.501.

Klok E.J., Klein Tank A.M.G., 2009, "Updated and extended European dataset of daily climate observations", *International Journal of Climatology*, vol. 29, 1182-1191.

Kyselý J., Huth R., 2006, "Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 85, 19-36.

Kyselý J., Plavcová E., 2010, "A critical remark on the applicability of E-OBS European gridded temperature data set for validating control climate simulations", *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, D23118.

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*, vol. 38, 45-56.

Prein A.F., Gobeit A., 2017, "Impacts of uncertainties in European gridded precipitation observations on regional climate analysis", *International Journal of Climatology*, vol. 37, 305-327.

Rapport AGRESTE, 2018, "Une sécheresse qui s'accroît en septembre", *Agreste Infos Rapides - Climatologie*, octobre 2018, No.2018, 147 p.

Rapport AGRESTE, 2019, "Sécheresse et record de chaleur en juillet", *Agreste Infos Rapides - Climatologie*, août 2019, No.2019, 115 p.

Rapport AGRESTE, 2020, "Sécheresse marquée en juillet", *Agreste Infos Rapides - Climatologie*, août 2020, No.2020, 108 p.

Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., Drobinski P., Chateau Smith C., 2016, "Extreme dry spell detection and climatology over the Mediterranean Basin during the wet season", *Geophysical Research Letters*, vol. 43, 7196-7204.

Raymond F., 2017, "Longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen et conditions atmosphériques associées : variabilité contemporaine et future (1957-2100)", Thèse de doctorat, Université de Bourgogne Franche-Comté, *TEL archives ouvertes*.

- Raymond F., Drobinski P., Ullmann A., Camberlin P., 2018a, "Extreme dry spells over the Mediterranean Basin during the wet season: assessment of HyMeX/Med- CORDEX regional climate simulations", *International Journal of Climatology*, vol. 38, 3090-3105.
- Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., 2018b, "Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne", *Cybergeo: European Journal of Geography*, [en ligne], Environnement, Nature, Paysage, No.858. URL: <http://journals.openedition.org/cybergeo/29156>.
- Saaroni H., Ziv B., Lempert J., Gazit Y., Morin E., 2015, "Prolonged dry spells in the Levant region: climatologic-synoptic analysis", *International Journal of Climatology*, vol. 35, 2223-2236.
- Soubeyrou J.M., Vidal J.P., Baillon M., Blanchard M., Céron J.P., Franchistéguy L., Régimbeau F., Martin E., Vinedon J.C., 2010, "Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou", *La Houille Blanche*, No.5, 30-39.
- Soubeyrou J.M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.P., Martin E., Dandin P., 2012, "Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec". *La Météorologie*, vol. 78, 21-30.
- Soubeyrou J.M., Neppel L., Veysseire J.M., Tramblay Y., Carreau J., Gouget V. 2015, "Évolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique", *La Houille Blanche*, No.1, 27-33.
- Spinoni J., Vogt J.V., Naumann G., Barbosa P., Dosio A., 2018, "Will drought events become more frequent and severe in Europe?", *International Journal of Climatology*, vol. 38, 1718-1736.
- Tramblay Y., Hertig E., 2018, "Modelling extreme dry spells in the Mediterranean region in connection with atmospheric circulation", *Atmospheric Research*, vol. 202, 40-48.
- Vidal J.P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyrou J.M., Blanchard M., Baillon M., 2010, "Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, No.3, 459-478.
- Vidal J.P., Martin E., Kitova N., Najac J., Soubeyrou J.M., 2012, "Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, No.8, 2935-2955.
- Wang X.L., Zwiers F.W., Swail V.R., Feng Y., 2009, "Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874-2007", *Climate Dynamics*, vol. 33, 1179-1195.
- Zakhem B.A., Kattaa B., 2016, "Investigation of hydrological drought using Cumulative Standardized Precipitation Index (SPI 30) in the eastern Mediterranean region (Damascus, Syria)", *Journal of Earth System Science*, vol. 125, 969-984.
- Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S.K., Koltermann P., 2013, "Changes in the duration of Europe wet and dry spells during the last 60 years", *Journal of Climate*, vol. 26, 2022-2047.

RÉSUMÉS

Ce travail propose d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des sécheresses pluviométriques (absence prolongée de pluie) à l'échelle de la France métropolitaine, depuis les années 1950 et pour chacune des quatre saisons (printemps, été, automne, hiver). Une approche par séquences sèches permet d'en appréhender les caractéristiques spatio-temporelles intrinsèques : géographie, saisonnalité, durée et fréquence. Au printemps et à l'automne, l'augmentation du nombre de séquences sèches semble être compensée par la diminution de leur durée moyenne (et

inversement). L'été, saison plus sèche, connaît une augmentation du nombre de jours secs depuis les années 1950 sur la majeure partie du territoire, principalement du fait de l'augmentation de la durée moyenne des séquences sèches et du nombre des séquences les plus longues. En hiver, le Nord de la France est soumis à une augmentation du nombre de séquences sèches ainsi que de la durée des plus longues d'entre elles, entraînant une augmentation du nombre total de jours secs depuis les années 1950. Cette étude démontre qu'une absence de tendances claires et significatives quant au nombre de jours secs en France ne signifie pas forcément que la distribution temporelle des précipitations n'a pas évolué. Bien au contraire, une absence de tendance sur le nombre de jours secs peut finalement cacher une augmentation de la durée des séquences sèches mais une diminution du nombre de ces séquences, ou inversement. Ces différents modes de variabilité spatio-temporelle des absences de pluie sont autant d'échelles idoines pour les études d'impacts, notamment sur les activités économiques dépendant du cycle de l'eau.

This work proposes the study of spatial and temporal variability of rainfall droughts (no rain) on the scale of metropolitan France since the 1950s and for each of the four seasons (spring, summer, autumn, winter). A dry period approach makes it possible to understand the intrinsic spatio-temporal characteristics: geography, seasonality, duration and frequency. In spring and autumn, the increase in the number of dry spells seems to be offset by the decrease in their average duration (and vice versa). The summer season, which is the driest season, has seen an increase in the number of dry days over most of the territory, mainly due to the increase in the average duration of dry spells and the number of the longest of them. In winter, the north of France is subject to an increase in the number of dry spells as well as the duration of the longest ones, leading to an increase in the total number of dry days. This study shows that an absence of clear and significant trends in the number of dry days in France does not necessarily mean that the temporal distribution of precipitation has not changed. An absence of trends in the number of dry days may hide an increase in the duration of the dry periods but a decrease in the number of these periods, or vice versa. These different modes of spatio-temporal variability in the absence of rain are all suitable scales for impact studies, particularly on economic activities dependent on the water cycle.

Este trabajo propone estudiar la variabilidad espacio-temporal de la sequías pluviométricas (ausencia prolongada de precipitaciones) a la escala de Francia metropolitana, desde el año 1950 y para cada una de las cuatro estaciones (primavera, verano, otoño e invierno). La aproximación a partir de los periodos de sequía permite apropiarse de las características espacio-temporales intrínsecas como la geografía, estacionalidad, duración y frecuencia. En la primavera y en el otoño, el aumento del número de periodos secos parece estar compuesto por la disminución de su duración media (e inversamente). En el verano, la estación más seca presenta un aumento del número de días secos desde los años 1950 sobre la mayor parte del territorio, principalmente debido al incremento de la duración media de los periodos secos y del número más extenso de ellas. En invierno, el Norte de Francia exhibe un incremento del número de periodos secos, así como la duración de las más largas entre ellas, conllevando un aumento del número total de días secos desde 1950. Este estudio demuestra que la ausencia de tendencias claras y significativas en cuanto al número de días secos en Francia no significa forzosamente que la distribución temporal de las precipitaciones no haya evolucionado. Al contrario, una ausencia de tendencia sobre el número de días secos puede significar un aumento en la duración de los periodos secos, pero una disminución del número de ellos o inversamente. Estos diferentes modos de variabilidad espacio-temporal de ausencia de precipitaciones son escalas apropiadas para los estudios de impacto, sobre todo en lo que refiere a actividades económicas dependientes del ciclo del agua.

INDEX

Mots-clés : sécheresse, variabilité climatique, changement climatique

Palabras claves : sequía, variabilidad climática, cambio climático

geographyun 908, 926, 250

Keywords : drought, climate variability, climate change

AUTEURS

FLORIAN RAYMOND

Post-Doctorant, LMD/IPSL, École Polytechnique, Université Paris Saclay, ENS, PSL Research University, Sorbonne Université, CNRS, Palaiseau, France. florian.raymond@lmd.ipsl.fr /
Enseignant-chercheur, Département de Géographie, Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, UMR7533 Ladyss, 2 rue de la Liberté, F-93526 Saint-Denis. florian.raymond@univ-paris8.fr

ALBIN ULLMANN

Enseignant-chercheur, Centre de Recherches de Climatologie, UMR6282 Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France. albin.ullmann@u-bourgogne.fr