



HAL
open science

Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne.

Florian Raymond, Albin Ullmann, Pierre Camberlin

► To cite this version:

Florian Raymond, Albin Ullmann, Pierre Camberlin. Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne.. *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2018, pp.858. 10.4000/cybergeo.29156 . hal-01995960

HAL Id: hal-01995960

<https://hal.science/hal-01995960>

Submitted on 23 Aug 2019

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.



Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne

Very long winter dry spells in the Mediterranean basin: spatio-temporal variability and impact on cereal production in Spain

Florian Raymond, Albin Ullmann et Pierre Camberlin



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29156>

DOI : 10.4000/cybergeo.29156

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par Centre national de la recherche scientifique (CNRS)



Référence électronique

Florian Raymond, Albin Ullmann et Pierre Camberlin, « 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, document 858, mis en ligne le 14 juin 2018, consulté le 28 janvier 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29156> ; DOI : 10.4000/cybergeo.29156

Ce document a été généré automatiquement le 28 janvier 2019.

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne

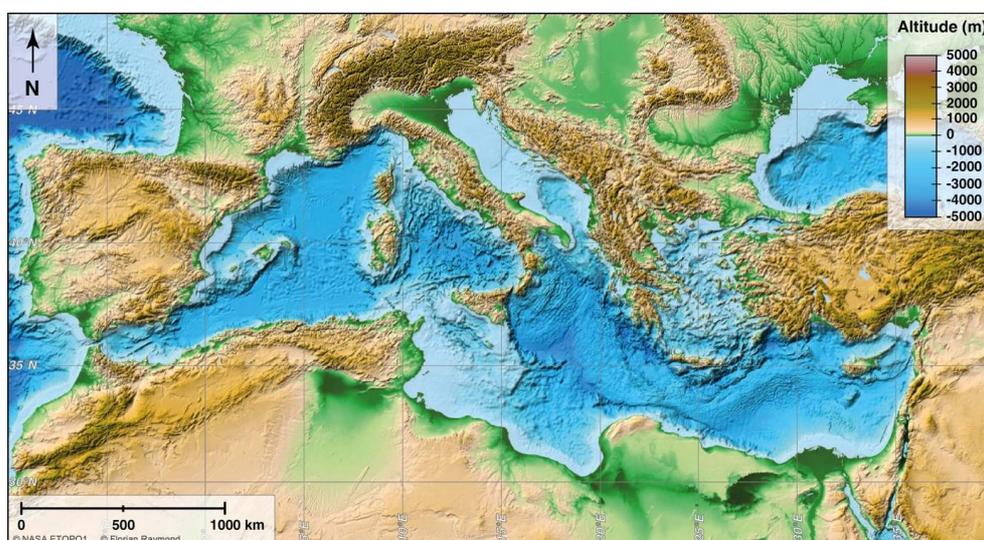
*Very long winter dry spells in the Mediterranean basin: spatio-temporal
variability and impact on cereal production in Spain*

Florian Raymond, Albin Ullmann et Pierre Camberlin

Introduction

- 1 Le bassin méditerranéen est une zone de transition abrupte entre le climat tropical et celui des moyennes latitudes. Il se caractérise par une orientation ouest-est et des traits de côte complexes aux multiples orientations, le plus souvent associés à un relief escarpé (figure 1).

Figure 1 : Topographie et Bathymétrie du bassin méditerranéen.



Source de la carte : modèle numérique de terrain, NASA ETOPO1, d'après Amante et Eakins (2009).
Image reproduite par F. Raymond.

- 2 Dans son dernier rapport d'évaluation, le GIEC qualifie cette région du monde comme étant l'une des plus exposées au changement climatique, d'autant plus que le bassin est déjà significativement soumis à des évolutions climatiques rapides depuis plusieurs décennies avec notamment un assèchement quasi-généralisé (Hoerling et al., 2012 ; IPCC, 2013). Densément peuplé, avec des degrés de vulnérabilité de la population très hétérogènes au sein du bassin, cet espace est particulièrement sensible aux épisodes de sécheresse affectant directement la ressource en eau. Avec la demande en eau grandissante pour les besoins domestiques mais également agricoles (FAO, 2011), la pression sur la ressource en eau atteint actuellement un niveau critique dans de nombreux pays du pourtour méditerranéen, notamment ceux de la rive sud et est, mais aussi en Espagne et dans la partie sud de l'Italie (Plan Bleu, 2014). Dans ce contexte démographique-climatique, les épisodes de sécheresse sont des « extrêmes » climatiques qui ont un impact sociétal particulièrement préoccupant.
- 3 Le climat méditerranéen étant caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides (Xoplaki et al., 2004 ; Lionello et al., 2006), les sécheresses pluviométriques « hivernales » sont des événements déterminants car ils affectent directement la période de recharge en eau des nappes phréatiques et le niveau des fleuves, des rivières et des lacs. Ces événements sont donc déterminants pour appréhender la problématique de déficit en eau, de sécheresse hydrologique et de pénurie. De plus, certaines pratiques, comme le développement des systèmes d'irrigation agricole viennent accentuer la pression sur la ressource en eau (FAO, 2011, Plan Bleu, 2014). Entre 1961 et 2006, le pourcentage de surfaces agricoles équipées de système d'irrigation a augmenté de 5% dans le nord de l'Afrique et de 9% dans le sud de l'Europe (FAO, 2011). En Espagne, 20% de l'eau utilisée pour l'irrigation des parcelles agricoles provient des nappes phréatiques (Hernandez Mora et al., 2007), chiffre qui atteint 60% dans les pays du Maghreb (Siebert et al., 2010).
- 4 L'objectif de cette étude est d'appréhender la sécheresse en Méditerranée à partir d'une approche innovante se focalisant sur les très longs épisodes sans pluie en hiver. En effet,

plus qu'un déficit classique du cumul périodique de pluie ou qu'un indice statistique de la sécheresse (type Standardized Precipitation Index (SPI), McKee et al., 1993 ; Palmer Drought Severity Index (PDSI), Palmer, 1965 ; Indice Standardisé de Sécheresse Pluviométrique (ISSP), Pita, 2000), ce travail propose tout d'abord de définir la sécheresse à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen comme étant un objet géographique et climatique à part entière, se basant sur la distribution temporelle des précipitations. Ces événements de « sécheresse » correspondent à des très longues séquences sans pluie caractérisées chacune par une localisation, une extension spatiale et temporelle. Ce travail propose ensuite d'étudier les impacts de ces longs épisodes secs sur la production céréalière en Espagne et d'en mesurer l'apport par rapport aux méthodes plus conventionnelles de définition de la sécheresse pluviométrique.

Données

Données climatiques

- 5 Ce sont les données des précipitations quotidiennes E-OBS de l'European Climate Assessment & Dataset (l'ECA&D ; Klok et Klein Tank, 2009) qui sont utilisées ici (version 10.0). Ces données en points de grille à haute résolution spatiale (0,25°) sont issues de l'interpolation de séries d'observation provenant de plus de 2300 séries issues de stations d'observation réparties sur l'Europe, le Proche-Orient et l'Afrique du Nord (Haylock et al., 2008). Pour cette étude, les données d'observation E-OBS sont extraites de 10°O à 40°E et de 28°N à 46°N sur la période 1957 à 2013 et pour la période allant de septembre à avril (appelée « saison humide » par la suite), période dite « pluvieuse » pour le domaine méditerranéen car regroupant la majorité des précipitations annuelles (Xoplaki, 2002).
- 6 Comme mentionné par Hoftra et al. (2009), un tel jeu de données contient inévitablement un certain nombre d'erreurs et d'incertitudes, causées par exemple par des changements de position des stations, des erreurs dans les mesures ou encore des incertitudes liées à l'interpolation des données. Haylock et al. (2008) indiquent que les incertitudes associées à la qualité du jeu de données dépendent fortement du nombre de stations utilisées. Ainsi, de nombreux points de grille de la base de données E-OBS, principalement situés au Proche-Orient et en Afrique du Nord, présentent des séries de données incomplètes. Le faible nombre de stations météorologiques sur ces deux régions en est la cause principale (Brunet et al., 2014). Les points de grille se trouvant sur la mer et ceux montrant un manque de données d'au moins une saison complète sur la période 1957-2013 sont alors exclus de l'analyse (soit 10 057 points de grille sur les 14 400 du domaine étudié, soit 70%).
- 7 En plus des données d'observation E-OBS, les données de pression réduite au niveau de la mer (PNM) et de vent zonal et méridien (U&V) issues des réanalyses atmosphériques NCEP/NCAR sont utilisées. Ces données, croisant des séries issues de l'observation directe, indirecte et de la modélisation du climat, proviennent du National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (Kalnay et al., 1996). D'une résolution horizontale de 2,5° x 2,5° en longitude et latitude, ces données sont extraites quotidiennement pour les saisons humides couvrant la période 1957-2013, sur le domaine allant de 50°O à 80°E et de 0° à 70°N pour la pression réduite au niveau de la mer et sur le domaine allant de 10°O à 40°E et de 28°N à 46°N pour les vents.

Données agricoles

- 8 Les données des rendements agricoles annuels moyens en Espagne¹, issues de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (ou FAO ; Food and Agriculture Organization), sont exploitées pour l'orge, le blé et l'avoine, pour les récoltes s'étalant de 1961 (début des données) à 2013. Les données de rendement sont exprimées en hectogramme par hectare (hg/ha).
- 9 Entre le début et la fin de la période étudiée, les rendements d'orge, de blé et d'avoine ont augmenté de façon quasi-linéaire. Ainsi, entre 1961 et 2013, les rendements d'orge sont passés d'environ 14 000 hg/ha à environ 30 000 hg/ha (soit environ +305 hg/ha par année), les rendements de blé d'environ 10 000 hg/ha à environ 32 000 hg/ha (soit environ +430 hg/ha par année) et les rendements d'avoine d'environ 9 000 hg/ha à environ 20 000 hg/ha (soit environ +230 hg/ha par année). Entre les années 1960 et aujourd'hui, l'agriculture a connu une mutation importante. Au milieu du XX^{ème} siècle, l'agriculture était dite "traditionnelle", il y avait beaucoup de petites exploitations agricoles. Par la suite, l'agriculture s'est modernisée, devenant davantage industrielle que traditionnelle, observant notamment une réduction importante du nombre d'exploitations mais une augmentation de leur taille. Cette industrialisation de l'agriculture s'est traduite par un fort développement des outils agricoles (machines), de nouvelles méthodes de cultures intensives, l'augmentation de l'irrigation, les améliorations variétales, etc. Par exemple, entre 1960 et 2000, l'utilisation de fertilisants a fortement augmenté en Espagne, passant de 17,7 kg/ha à 34,4 kg/ha de P₂O₃ (Trioxyde de Phosphore), de 14,9 kg/ha à 77,8 kg/ha de N (Azote) et de 5,4 kg/ha à 28,9 kg/ha de K₂O (Oxyde de Potassium) (Clar et al., 2015). Entre 1960 et 2000, le nombre de tracteurs a également fortement augmenté en Espagne, passant de 56 845 machines à 889 700 machines (soit une multiplication de plus de 15). Ces mutations agricoles et ces évolutions technologiques expliquent en grande partie la forte augmentation des rendements agricoles observée entre 1961 et 2013. Au vu de l'évolution des rendements d'orge, de blé et d'avoine entre 1961 et 2013 en Espagne, les tendances linéaires des rendements bruts sont retirées, pour obtenir des anomalies de rendement non influencées par leurs augmentations régulières au cours de la période 1961-2013, principalement d'origine anthropiques.

Méthodes

Détection des événements de très longs épisodes secs

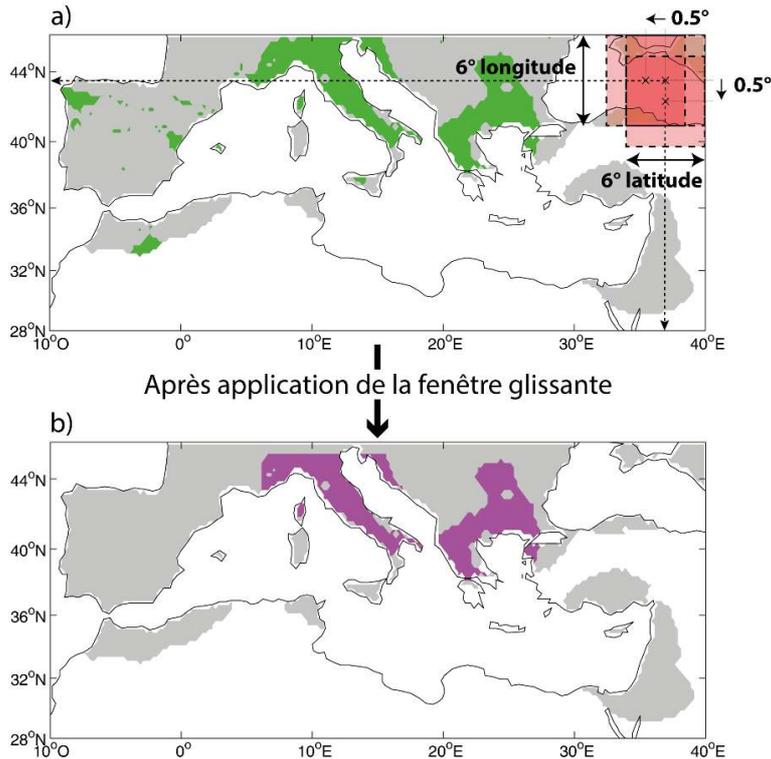
- 10 La première étape consiste à détecter les jours secs et les épisodes secs : un jour est considéré comme sec quand le cumul quotidien des précipitations est inférieur au seuil de 1 mm, et ce pour chacun des points de grille étudiés. Le seuil de pluie de 1 mm/jour est régulièrement utilisé dans la littérature scientifique comme étant le seuil qui différencie les jours secs des jours avec précipitations (Zhang et al., 2005 ; Lana et al., 2006 ; Serra et al., 2006 ; Sanchez et al., 2011 ; Hertig et al., 2013 ; Saaroni et al., 2015). Un épisode sec est donc défini comme étant une succession de jours secs.
- 11 La deuxième étape consiste à isoler les épisodes secs les plus longs au niveau de chacun des points de grille. Ainsi pour chaque point de grille, la gamme des valeurs de durée de

jours consécutifs sans pluie est calculée sur la période 1979-2013. Cette période est ici utilisée car elle représente une période climatique de référence récente (au moins 30 ans, comme le préconise l'OMM). Le centile 80 est ensuite calculé à partir de ces valeurs pour définir les épisodes secs les plus longs sur toute la période d'étude de 1957-2013. Définir les épisodes secs les plus longs de 1957 à 2013 à partir des centiles 80 calculés sur la période de référence 1979-2013 permet (i) de détecter des tendances dans la fréquence de ces longs épisodes secs et (ii) de s'assurer d'un échantillon de très longs épisodes secs suffisamment important pour faire une étude diagnostique robuste de leurs impacts sur les agrosystèmes.

- 12 Les épisodes de sécheresse étant des phénomènes climatiques d'échelle régionale, une méthode est ici utilisée pour appréhender les épisodes secs les plus longs, appelés événements de Très Longs Episodes Secs (eTLES) comme étant des « objets » géographiques et climatiques, avec des caractéristiques spatiales (localisation et extension) et temporelles (date de début et de fin), et non plus comme des événements observés à l'échelle des points de grille considérés individuellement. La mise en place d'une telle approche permettant de ne retenir que les épisodes de sécheresse ayant une cohérence spatiale permet d'observer les circulations atmosphériques synoptiques associées à ces événements climatiques extrêmes.
- 13 Pour créer ces objets climatiques extrêmes régionaux, une matrice binaire est utilisée, avec la valeur "0" pour tous les points de grille sans données, tous ceux qui sont affectés par des précipitations (cumuls quotidiens de précipitations supérieurs à 1 mm) ou bien affectés par un épisode sec d'une durée inférieure au centile 80. Sont codés avec la valeur "1" tous les points de grille affectés par des épisodes secs d'une durée supérieure à la valeur du centile 80 propre à chacun d'entre eux. Pour étudier des eTLES ayant une certaine cohérence spatiale à l'échelle du bassin méditerranéen, une fenêtre glissante est appliquée sur la matrice binaire pour chacun des 13 552 jours étudiés (56 saisons humides de 242 jours, sur la période 1957-2013). Cette fenêtre glissante permet d'exclure de l'étude les eTLES locaux et les points de grille isolés. La fenêtre glissante, de 6° de côté en longitude et latitude, se déplace tous les 0,5° sur le domaine étudié pour conserver uniquement les épisodes ayant une certaine cohérence spatiale et temporelle. Ainsi, si 50 % des points de grille contenus dans la fenêtre sont codés en "1", le jour est automatiquement retenu comme étant un jour d'eTLES et tous les points de grille de la fenêtre sont conservés. La fenêtre ne prend pas en compte les points de grille situés sur la mer et ceux n'étant pas étudiés. Un exemple est donné au travers de la figure 2. Pour le 1 janvier 1989, dans un premier temps, 1 060 points de grille sur les 4 343 ayant de la donnée sont codés en "1", étant concernés par un épisode sec d'une durée supérieure au percentile 80. Une fois la fenêtre glissante appliquée, il ne reste plus que 790 points de grille codés en "1", appartenant à un eTLES ayant une certaine cohérence spatiale régionale.
- 14 La sensibilité des résultats à la taille de la fenêtre glissante choisie et au pourcentage de points de grille codés en "1" retenus a été testée. Une fenêtre de moins de 6° de côté prend en compte des événements locaux et des points de grille isolés, sans réelle cohérence spatiale (de multiples petits secteurs très espacés les uns des autres sont affectés par un eTLES). Une fenêtre de plus de 6° de côté ne retient que quelques eTLES, affectant près de la moitié du bassin méditerranéen. Retenir un pourcentage de points de grille codés en "1" inférieur (supérieur) à 50 % a le même effet que retenir une fenêtre supérieure (inférieure) à 6° de côté.

- 15 Grâce à cette méthode, 76 eTLES ont été détectés sur la période 1957-2013, sur une durée totale de 4 423 jours (soit 33,1 % des 13 552 jours étudiés). Cette méthode de détection des très longs épisodes secs montrant une cohérence spatiale et temporelle est adaptée d'un projet portant sur les vagues de chaleur en Europe (Stéfanon et al., 2012). En termes du nombre de jours impactés par les eTLES par saison, une légère augmentation est observée à l'échelle globale du bassin, mais cette augmentation n'est pas significative.

Figure 2 : Exemple d'application de la fenêtre glissante pour le 01/01/1989.



Dans un premier temps, 1 060 points de grille sur les 4 343 étudiés sont codés en « 1 », étant affectés par un épisode sec d'une durée supérieure au centile 80 (a). Une fois la fenêtre glissante appliquée, il ne reste plus que 790 points de grille codés en « 1 », appartenant à un eTLES ayant une certaine cohérence spatiale d'échelle régionale (b). En blanc, tous les points de grille E-OBS qui n'ont pas de données de précipitations.

Les événements de très longs épisodes secs : classification

- 16 Pour appréhender les principales configurations spatiales récurrentes des eTLES à l'échelle du bassin méditerranéen, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est appliquée aux 76 eTLES précédemment détectés. Compte tenu de la différence de durée de chaque eTLES, appliquer la CAH à partir de la totalité des 4 423 jours affectés par un eTLES biaiserait les résultats. En effet, les eTLES les plus longs seraient de fait surreprésentés par rapport aux plus courts. De plus, cette approche ne privilégierait pas l'aspect "événementiel" des eTLES. Ainsi, le jour médian de chacun des 76 eTLES est retenu pour la CAH. Le jour médian correspond à la date se trouvant au milieu de la période affectée par l'eTLES. Ce jour est le plus représentatif de chacun des eTLES puisqu'il correspond, dans la grande majorité, au jour qui connaît l'extension spatiale maximale des événements. Pour détecter les principales configurations d'eTLES,

l'algorithme de CAH (utilisant la métrique de la distance euclidienne) est alors appliqué à la matrice binaire des jours médians de chacun des 76 événements (soit sur les 76 jours médians).

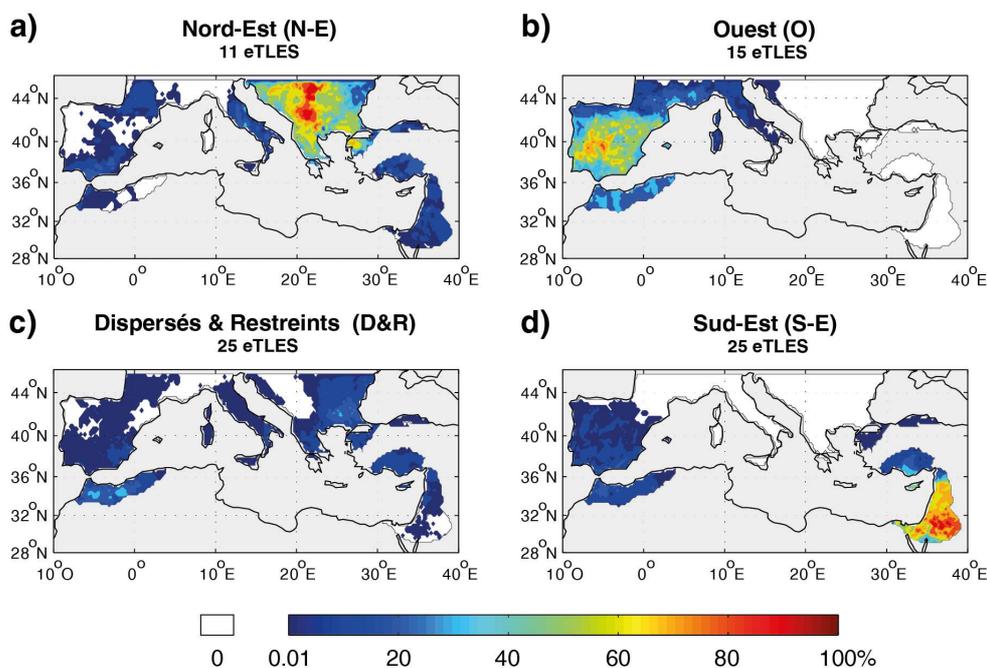
- 17 Lorsqu'on utilise une méthode de classification, le choix de la meilleure partition est un problème récurrent, se basant parfois même sur la subjectivité, qui est généralement dictée par l'expérience des chercheurs (Gong et Richman, 1995). Objectivement, une classification a pour but de maximiser la variance interclasse et de minimiser la variance intraclasse. D'après le dendrogramme et l'inertie du dendrogramme (non montré), le premier découpage qui montre une faible variabilité intraclasse est un découpage en 4 classes. Une classification basée sur 5, 6, 7 ou 8 classes entraîne ici des redondances dans la géographie des différentes configurations d'eTLES, pour au moins deux classes. De ce fait, la décision finale de garder 4 classes, représentant les principales configurations d'eTLES dans le bassin méditerranéen, se base autant sur des arguments quantitatifs, souvent utilisés dans les analyses en classes, que sur la pertinence des différentes configurations spatiales issues de la classification.
- 18 La méthodologie utilisée pour détecter les eTLES et les regrouper en principales configurations à l'échelle du bassin méditerranéen est plus finement détaillée dans l'article de Raymond et al., 2016b.

Les eTLES hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et conditions atmosphériques associées

Les configurations d'eTLES récurrentes dans le bassin méditerranéen

- 19 La Figure 3 présente les quatre configurations d'eTLES. La première configuration, appelée "Nord-Est" (N-E), regroupe 11 événements centrés sur les Balkans (figure 3a). La seconde configuration, appelée "Ouest" (O), regroupe 15 événements centrés sur la Péninsule Ibérique (figure 3b). La troisième configuration, appelée "événements Dispersés & Restreints" (D&R), rassemble 25 événements répartis sur l'ensemble du bassin méditerranéen (figure 3c). La quatrième et dernière configuration, appelée "Sud-Est" (S-E), regroupe 25 événements centrés sur le Levant (figure 3b). La géographie des eTLES à l'échelle du bassin méditerranéen, présentée au travers de ses configurations spatiales les plus récurrentes, est contrainte par la disponibilité des données traitées. L'absence de toute structure récurrente en rive sud de la Méditerranée est surtout le reflet de l'insuffisance des données sur ce secteur méditerranéen, plutôt qu'une réalité climatique.

Figure 3 : les 4 principales configurations récurrentes d'eTLES à l'échelle du bassin méditerranéen, pour les 56 saisons humides (de septembre à avril) couvrant la période 1957 à 2013.



a) « Nord-Est » (N-E), b) « Ouest » (O), c) « Dispersés & Restreints » (D&R) et d) « Sud-Est » (S-E). Pour chacune des 4 classes, la palette de couleurs indique les pourcentages d'eTLES affectant chacun des points de grille. Un pourcentage de 100 % indique que tous les eTLES regroupés dans la classe concernée affectent le point de grille en question. En gris, les points de grille n'étant touchés par aucun des 76 eTLES, ou n'ayant pas de données de précipitations.

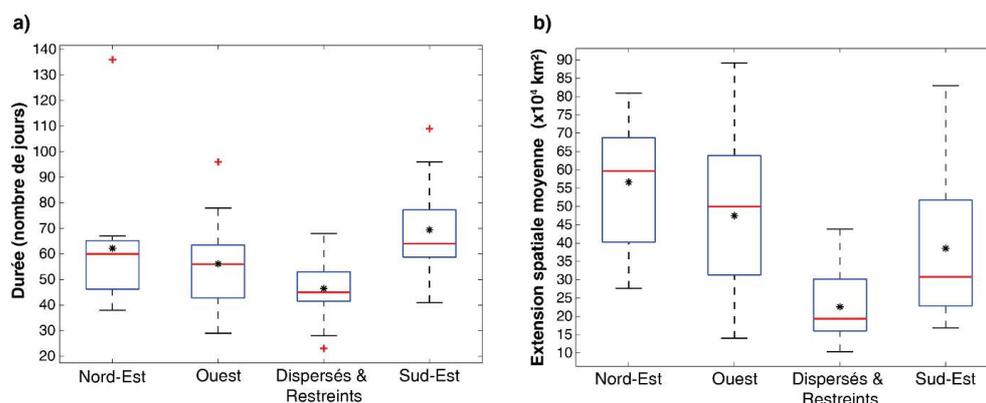
Caractéristiques spatio-temporelles des quatre configurations d'événements de très longs épisodes secs

- 20 La figure 4 montre les paramètres de centralité et la variabilité des eTLES dans chacune des 4 configurations précédemment détectées, en termes de durée et d'extension spatiale moyenne des eTLES. La configuration Nord-Est est associée à la plus grande variabilité dans la durée des eTLES, et possède l'événement le plus long (136 jours, considéré ici comme une valeur exceptionnelle). La configuration Dispersés & Restreints rassemble des eTLES plus courts, avec en moyenne 46 jours par événement (figure 4a). La configuration Sud-Est (centrée sur le Levant) rassemble des eTLES parmi les plus longs, avec une durée moyenne des 25 eTLES de l'ordre de 69 jours par événement. La durée moyenne des eTLES est de 62 jours par événement pour la configuration Nord-Est (centrée sur les Balkans), et de 56 jours par événement pour la configuration Ouest (centrée sur la Péninsule Ibérique ; figure 4a). Ces résultats peuvent s'expliquer en partie par la fréquence des jours de pluie dans le bassin méditerranéen. Durant la saison humide, il pleut entre 20 % et 40 % des jours sur la Péninsule Ibérique et les Balkans (Raymond et al., 2016a). Au Levant, la fréquence d'apparition des précipitations est bien plus faible en saison humide (entre 0,1 % et 25 % des jours), ce qui favorise des périodes sèches plus longues que dans le reste du bassin méditerranéen.
- 21 La configuration Ouest montre la plus grande variabilité en termes d'extension spatiale moyenne, avec des événements affectant, en moyenne, entre 140 400 km² et 891 900 km²

(soit environ entre 4 % et 23 % du domaine d'étude). La configuration Nord-Est rassemble des eTLES spatialement étendus, avec en moyenne 566 182 km² par événement (soit environ 14 % du domaine d'étude ; figure 4b). Les configurations Ouest et Sud-Est rassemblent des eTLES un peu moins étendus que la configuration Nord-Est, avec en moyenne respective 474 720 km² et 385 560 km² par événement (soit environ 12 % et 10 % du domaine d'étude).

- 22 En plus de rassembler les événements les plus courts, la configuration Dispersés & Restreints rassemble également les événements les moins étendus, avec une extension moyenne de 226 044 km² par événement (soit environ 6 % du domaine d'étude) et est associée à la variabilité la plus faible, avec des événements allant de 103 500 km² à 438 300 km² (soit environ de 3 % à 11 % du domaine d'étude ; figure 4b). La configuration D&R regroupe donc des eTLES plus courts et plus régionaux/locaux, répartis dans l'ensemble du bassin, ce qui explique son nom. Contrairement aux trois autres configurations, ce n'est pas sur un critère de proximité géographique que se singularise cette configuration (les eTLES ne sont pas centrés sur un secteur en particulier), mais principalement sur des critères statistiques liés à l'extension spatiale des événements. En effet, la classification se basant sur les jours médians des 76 eTLES, seule la notion d'extension spatiale des eTLES est prise en compte pour effectuer la classification. Il s'agit alors d'une configuration résiduelle regroupant des eTLES mal classables, ayant en commun leur faible extension.

Figure 4 : Boîtes à moustaches de a) la durée (en nombre de jours) et de b) l'extension spatiale moyenne (en km²) des 76 eTLES répartis dans les quatre principales configurations d'événements de très longs épisodes secs : Nord-Est, Ouest, Dispersés & Restreints et Sud-Est.



La ligne centrale de la boîte représente la médiane (il existe autant de valeurs supérieures qu'inférieures à la médiane dans la série statistique). Les bords de la boîte correspondent au premier quartile (bord inférieur) et au troisième quartile (bord supérieur). Un quart des valeurs sont inférieures au premier quartile (trois quart supérieures). À l'inverse, trois quarts des valeurs sont inférieures au troisième quartile (un quart supérieures). Les extrémités des moustaches sont calculées en utilisant 1,5 fois l'espace interquartile, qui correspond à la distance entre le premier et le troisième quartile. Les valeurs isolées qui se situent en dehors de la boîte à moustaches et qui sont représentées par des croix rouges sont considérées comme exceptionnelles, extrêmes. Les étoiles noires représentent les valeurs moyennes.

Les principales conditions atmosphériques associées aux configurations d'eTLES

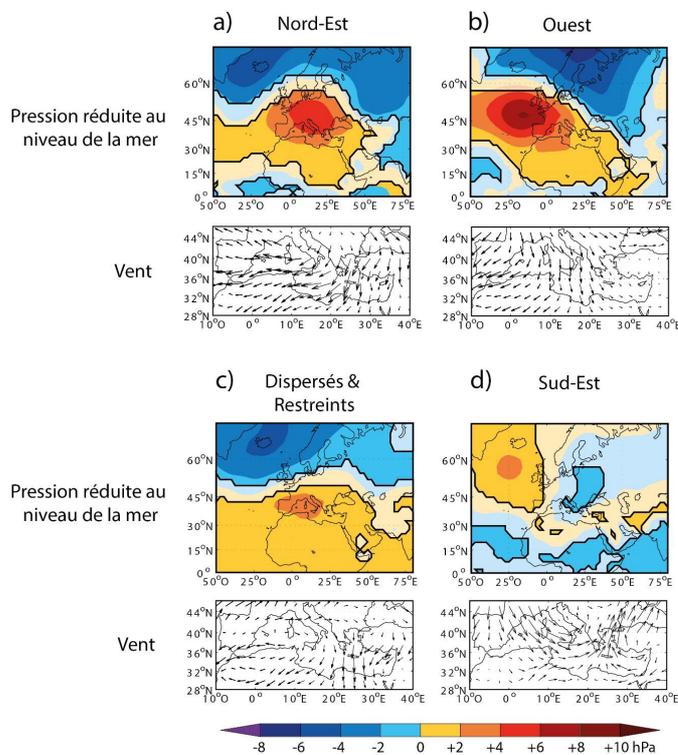
- 23 La figure 5 présente la circulation atmosphérique moyenne de large échelle associée aux quatre configurations d'eTLES présents en Méditerranée. Ces conditions atmosphériques sont ici appréhendées via les anomalies désaisonnalisées de pression réduite au niveau de

- la mer (PNM) et du vent à 995 hPa (U&V), qui permettent de faire fi des variations saisonnières des conditions atmosphériques sur le domaine Euro-Atlantique.
- 24 La configuration Nord-Est, regroupant 11 eTLES centrés sur les Balkans, est associée à des anomalies de pression réduite au niveau de la mer, positives et significatives au-dessus de la majeure partie de l'Europe, et à des anomalies de pression réduite au niveau de la mer négatives et significatives au-dessus de l'Islande et du nord de l'Europe (figure 5a). Ces conditions atmosphériques décrivent une situation de blocage anticyclonique sur l'Europe centrale, qui donne lieu à des anomalies de vent de nord-est sur la partie est du bassin méditerranéen, incluant les Balkans.
 - 25 La configuration Ouest, regroupant 15 eTLES centrés sur la Péninsule Ibérique, est associée à des anomalies de pression réduite au niveau de la mer positives et significatives au-dessus de l'Europe de l'Ouest et de l'Atlantique nord, et des anomalies de pression réduite au niveau de la mer négatives et significatives au nord de l'Europe (figure 5b). La situation de blocage anticyclonique observée sur l'ouest de l'Europe et le nord de l'océan Atlantique donne lieu à des anomalies de vent de Nord-Est sur la partie Ouest du bassin méditerranéen, incluant la Péninsule Ibérique et le Maghreb.
 - 26 Comme attendu, des blocages anticycloniques sont donc associés aux eTLES regroupés dans les configurations Nord-Est et Ouest. Il est cependant important de constater que pour les Balkans (configuration Nord-Est) comme pour la Péninsule Ibérique (Configuration Ouest), les conditions anticycloniques accompagnant les eTLES sont localisées à environ 1 000 km au nord-ouest des secteurs touchés par les événements de sécheresse. Ces conditions anticycloniques, du fait de leurs positions particulières vis-à-vis des secteurs touchés par les événements, favorisent l'occurrence des eTLES sur ces deux sous-régions méditerranéennes par : (i) le report des perturbations plus au nord et/ou plus au sud du bassin méditerranéen, sous l'effet du blocage anticyclonique, (ii) la subsidence d'un air sec à proximité du cœur de l'anticyclone, et (iii) une advection horizontale d'air froid et sec sur le flanc est de la zone anticyclonique, en provenance des latitudes boréales (voir également Raymond et al., 2017). Ces différents éléments vont conjointement favoriser un ciel dégagé (sans nuages) et une absence de précipitation, expliquant le développement des eTLES sur ces deux sous-régions méditerranéennes.
 - 27 Contrairement aux configurations Nord-Est et Ouest, la configuration Dispersés & Restreints ne regroupe pas des eTLES centrés sur une région spécifique du bassin méditerranéen, mais 25 événements, en moyenne moins étendus (et moins longs) que les autres, qui sont dispersés sur l'ensemble du bassin. Cette configuration est associée à des anomalies négatives et significatives de pression réduite au niveau de la mer sur l'Islande et des anomalies positives et significatives de pression réduite au niveau de la mer sur la partie ouest de la mer Méditerranée, donnant lieu à de faibles anomalies de vent antihoraires sur le bassin méditerranéen (figure 5c). Les conditions anticycloniques associées à la configuration Dispersés & Restreints sont cette fois-ci localisées au-dessus de la partie ouest de la mer Méditerranée. La relative faiblesse des conditions anticycloniques associées à cette configuration s'explique par le fait que la classe Dispersés & Restreints regroupe des événements dispersés sur l'ensemble du bassin, et non pas préférentiellement sur un secteur particulier, comme pour les configurations Nord-Est et Ouest.
 - 28 Les eTLES regroupés dans la configuration Sud-Est, affectant principalement le Levant, sont associés à des très faibles anomalies positives de pression réduite au niveau de la mer

au-dessus du Levant (figure 5d). À l'inverse, de faibles anomalies négatives de pression réduite au niveau de la mer sont observées au-dessus de l'Europe, donnant lieu à des anomalies de vent horaires sur le bassin méditerranéen. Ainsi, les eTLES localisés au Levant ne sont pas associés à des anomalies de pression réduite au niveau de la mer particulièrement marquées, comparé aux eTLES localisés dans les Balkans et dans la Péninsule Ibérique. Cela s'explique par le fait que la grande majorité des eTLES détectés au Levant commencent un 1^{er} septembre et sont dans la continuité de la saison sèche estivale dans cette sous-région méditerranéenne. Entre mai et septembre, le cumul moyen des précipitations au Levant est d'environ 7 mm. En moyenne, il y a moins de 2 mm de pluie en septembre dans cette sous-région méditerranéenne.

- 29 Les eTLES détectés au Levant ne sont donc pas des épisodes secs au sens strict et on peut les qualifier de "saisonniers". Lorsqu'un eTLES est détecté au Levant en début de saison, cela veut dire que la période pluvieuse commence a priori tardivement sur ce secteur. Les saisons pour lesquelles il n'y a pas d'eTLES détectés au Levant en septembre indiquent un début de la saison pluvieuse a priori plus avancé sur ce secteur.

Figure 5 : Anomalies désaisonnalisées de pression réduite au niveau de la mer (en hPa ; panel du haut) et de vents à 995 hPa (en m.s⁻¹ ; panel du bas) associés aux jours d'eTLES regroupés dans les quatre configurations.



a) Nord-Est, b) Ouest, c) Dispersés & Restreints et d) Sud-Est. Les anomalies significatives au seuil de confiance de 0,05 d'après le test en T de Student apparaissent en couleurs vives et sont entourées en noir.

- 30 Pour résumer, au cours des 56 saisons de la période 1957-2013, 76 eTLES sont détectés et répartis dans quatre configurations récurrentes : Nord-Est (11 eTLES centrés sur les Balkans), Ouest (15 eTLES centrés sur la Péninsule Ibérique), Dispersés & Restreints (25 eTLES répartis sur différentes régions du bassin méditerranéen et caractérisés par des extensions spatiales et durées moyennes moins importantes que les autres eTLES) et Sud-

Est (25 eTLES centrés sur le Levant, principalement à caractère "saisonnier", car ils sont pour la grande majorité la continuation de l'été sec observé à l'est du bassin méditerranéen). Les configurations d'eTLES sont associées à des blocages anticycloniques principalement localisés à environ 1 000 km au nord-ouest des secteurs affectés par des eTLES. Ces blocages entraînent, à des échelles régionales, la subsidence d'un air sec au-dessus des secteurs concernés par les eTLES et l'advection horizontale d'un air sec et froid en provenance des latitudes boréales, favorisant un ciel dégagé et l'absence de précipitation, ce qui est propice à l'occurrence de longues périodes sèches.

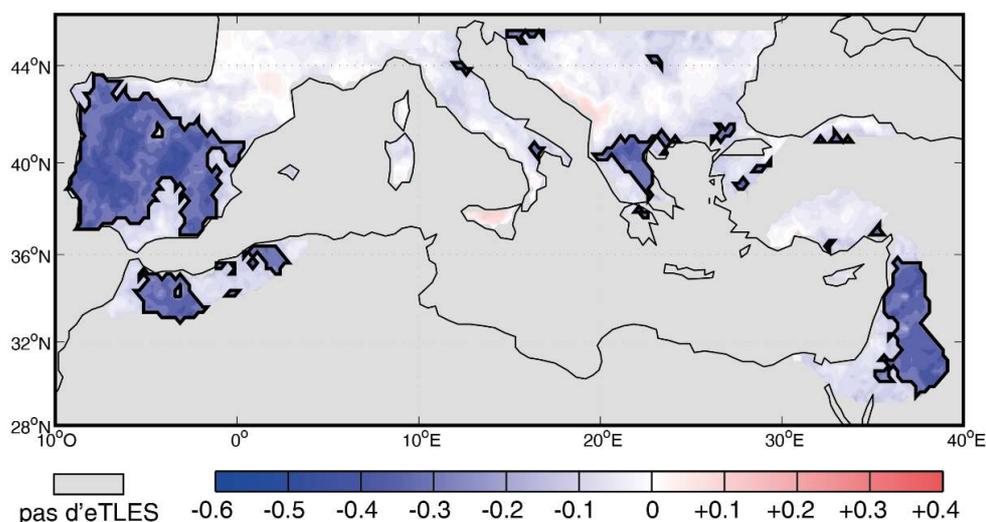
Impacts des eTLES sur certains agrosystèmes espagnols

- 31 Au cours des 56 saisons humides couvrant la période 1957-2013, 76 eTLES se sont produits à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen. L'objet eTLES, de par ses caractéristiques (se basant sur la distribution temporelle des précipitations, en ayant des critères de localisation, de durée et d'extension spatiale), est un objet climatique et géographique transversal et donc mobilisable pour des études d'impacts. L'objectif est ici d'étudier des répercussions directement imputables aux eTLES sur les rendements de céréales en Espagne. L'hypothèse ici posée est que l'objet eTLES véhicule une information spécifique supplémentaire par rapport aux cumuls de pluie et aux ratios de jours secs, pour expliquer certains impacts sur les agrosystèmes. Cela vient entre autres de l'hypothèse que la croissance des cultures d'hiver, en plus d'être sensible à la quantité d'eau reçue, est sensible à la distribution temporelle des précipitations au cours de la saison humide.

L'Espagne et les cultures céréalières

- 32 Notre choix se porte sur l'étude de l'impact des eTLES sur les rendements de céréales en Espagne pour plusieurs raisons, énumérées ci-dessous.
- 33 Comme le montre la figure 6, l'Espagne est un pays où les cumuls saisonniers de précipitations et le nombre de jours d'eTLES par saison sont corrélés de façon significative pour la majorité du territoire. Comme indiqué sur la figure 6, les corrélations sont négatives. Cela veut dire que d'une manière générale, plus le nombre de jours d'eTLES est élevé, moins les cumuls de pluie saisonniers sont élevés. Comme évoqué précédemment, on part de l'hypothèse que l'objet eTLES véhicule une information spécifique supplémentaire aux cumuls de pluie pour expliquer certains impacts sur les agrosystèmes. Pour vérifier cette hypothèse, on souhaite travailler sur un pays pour lequel les eTLES sont corrélés avec les cumuls de pluie, pour ensuite chercher à en dissocier les impacts sur quelques agrosystèmes. C'est pourquoi, au regard de la figure 6, l'Espagne est un pays qui remplit pleinement ces critères. Comme observé, l'Espagne est régulièrement affectée par des eTLES impactant de façon significative les cumuls saisonniers de pluie. Entre 1957 et 2013, 46 eTLES ont affecté ce pays, répartis sur 34 saisons humides. La durée moyenne des 46 eTLES est de 50 jours par événement, leur extension spatiale moyenne couvrant environ 22 % de la surface du territoire Ibérique.

Figure 6 : Corrélation, par point de grille, entre les cumuls saisonniers des précipitations et le nombre de jours d'eTLES par saison, pour les 56 saisons humides sur la période 1957-2013.



En Bleu, les corrélations négatives, en rouge, les positives. Les résultats significatifs pour un seuil de confiance de 0.1 d'après le teste de Bravais-Pearson apparaissent en couleurs vives et sont encadrés en noir. En gris, tous les points de grille E-OBS qui ne comptent pas d'eTLES.

- 34 Les eTLES étant détectés au cours des saisons humides, il est judicieux d'étudier l'impact des eTLES sur des cultures d'hiver. En termes de volume de production, les céréales sont les principales cultures en Espagne, et représentent 24 % de la surface agricole utile en 2015 (source : ministère de l'agriculture espagnol ; www.mapama.gob.es). Les principales céréales cultivées en Espagne, que son l'orge, le blé et l'avoine, sont des céréales d'hiver, semées entre les mois de novembre et décembre, et récoltées entre les mois de juin et juillet (USDA, 1994). Ces trois types de céréales représentent plus de 87 % de la superficie totale agricole dédiée aux céréales en Espagne (d'après la moyenne sur la période 2008-2014 calculée par le ministère de l'agriculture espagnol). De plus, comme le montre le tableau 1, ces trois espèces de céréales sont majoritairement cultivées sous la forme d'une agriculture pluviale (qui représente respectivement 88 %, 87 % et 92 % des surfaces cultivées propres à chacune de ces trois céréales sur la période 2008-2014). De ce fait, les rendements de l'orge, du blé et de l'avoine sont pleinement tributaires des précipitations durant la saison humide. Enfin, l'Espagne est un des seuls pays méditerranéens où la culture céréalière est présente sur la quasi-totalité du territoire, que ce soit pour l'orge, le blé ou l'avoine (USDA, 1994).

Tableau 1 : Part des cultures pluviales et irriguées (et rendements moyens associés en hg/ha) pour les trois céréales les plus cultivées en Espagne : l'orge, le blé et l'avoine.

	Cultures pluviales		Cultures irriguées	
	ratio surface cultivée (%)	rendement moyen (hg/ha)	ratio surface cultivée (%)	rendement moyen (hg/ha)
Orge	88	27 000	12	44 000
Blé	87	29 000	13	47 000
Avoine	92	18 000	8	33 000

Les données utilisées dans ce tableau sont une moyenne sur la période 2008-2014, et proviennent du ministère de l'agriculture, de la pêche, de l'alimentation et de l'environnement espagnol (WWW.MAPAMA.GOB.ES).

Impacts des eTLES sur les rendements de céréale en Espagne

- 35 Pour rappel, les données de rendement agricole issues de la FAO sont disponibles sur la période 1961-2013. Ainsi, pour étudier l'impact des eTLES sur les rendements d'orge, de blé, et d'avoine, tous les jours impactés par des eTLES affectant la Péninsule Ibérique sur les 53 saisons de la période 1960 à 2013 sont retenus (les rendements de l'année 1961 étant associés à la saison 1960-1961). Comme expliqué précédemment, les tendances linéaires ont été retirées aux rendements bruts pour obtenir des anomalies de rendement non influencées par leurs augmentations régulières au cours de la période 1961-2013.

Corrélations linéaires entre rendements de céréales et indicateurs hydrologiques

- 36 Le tableau 2 montre les coefficients de corrélation entre les rendements saisonniers d'orge, de blé et d'avoine, et les cumuls saisonniers de précipitations, les ratios de jours secs par saison et le nombre de jours d'eTLES par saison, pour les 53 saisons de la période 1960-2013. Pour les trois indicateurs hydrologiques, les corrélations avec les rendements sont calculées sur les saisons entières (de septembre à avril), mais également sur la première partie de la saison (de septembre à décembre) et sur la deuxième partie de la saison (de janvier à avril). Ce découpage permet d'observer plus précisément l'influence des indicateurs hydrologiques sur les rendements, pour la période qui précède/concerne la semence des céréales puis pour la période qui accompagne le développement des plants.
- 37 Tout d'abord, le tableau 2 permet d'observer une corrélation positive significative (seuil de confiance de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson) entre les rendements d'orge, de blé et d'avoine et les cumuls saisonniers de précipitations. Ainsi, plus les cumuls de précipitations sont élevés, meilleurs sont les rendements, et inversement. Cependant, les corrélations ont des valeurs comprises entre 0,32 et 0,37, ce qui est somme toute relativement faible, car renvoyant à des coefficients de détermination compris entre 0,10 et 0,14. Cela nous indique que statistiquement, la variabilité interannuelle des cumuls de précipitations explique uniquement 10 % à 14 % de la variabilité des rendements d'orge, de blé et d'avoine en Espagne, ce qui est faible.
- 38 En ce qui concerne les corrélations entre les ratios de jours secs par saison et les rendements des trois types de céréales, les valeurs sont négatives et significatives (seuil

de confiance de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson) lorsqu'on observe l'ensemble de la saison (tableau 5.2). La corrélation la moins significative concerne l'avoine (-0,322), la plus significative concerne l'orge (-0,396), ce qui reste faible. Ainsi, les coefficients de détermination sont compris entre 0,1 et 0,16, soit entre 10 % et 16 % des rendements qui sont expliqués par les ratios de jours secs par saison.

- 39 Les résultats sont différents lorsqu'on divise les saisons en deux sous-saisons d'amplitude égale. Les cumuls de pluie et les ratios de jours secs, sur la première partie de la saison (de septembre à décembre), ne sont pas corrélés de façon significative (seuil de confiance de 0,05 d'après Bravais-Pearson) aux rendements d'orge, de blé et d'avoine. À l'inverse, ces deux indicateurs hydrologiques sont corrélés de façon significative avec les rendements sur la deuxième partie de la saison (de janvier à avril ; seuil de confiance de 0,05 d'après Bravais-Pearson) (tableau 2). Cela semble indiquer que les rendements d'orge, de blé et d'avoine sont légèrement moins bons lorsque les cumuls de pluie sont faibles et/ou les ratios de jours secs sont élevés durant la période de montaison et le début de la période d'épiaison/de floraison des plants (au printemps), mais pas durant la période de redressement, ou du moins pas durant la germination, premier stade de la période de redressement (juste après la semence des graines).
- 40 Les corrélations entre le nombre de jours d'eTLES par saison et les rendements d'orge (-0,458), de blé (-0,558) et d'avoine (-0,454) sont négatives et significatives, mais restent modérées (tableau 2). Cela veut dire que pour l'orge, le blé et l'avoine, les rendements sont expliqués à hauteur d'environ 21 %, 31 % et 21 % par le nombre de jours d'eTLES, respectivement. Plus le nombre de jours concernés par un/des eTLES est élevé, moins les rendements semblent être bons. Les corrélations significatives sont plus élevées (en valeur absolue) pour le nombre de jours d'eTLES par saison que pour les cumuls saisonniers de pluie et les ratios saisonniers de jours secs (présentés précédemment). Cela veut dire que le nombre de jours d'eTLES affecte davantage les rendements de ces trois types de céréales que les simples cumuls de pluie et les ratios de jours secs.
- 41 Si on regarde pour les deux sous-saisons, contrairement aux cumuls de pluie et aux ratios de jours secs, le nombre de jours d'eTLES est corrélé de façon négative et significative aux rendements, à la fois pour la période allant de septembre à décembre et pour la période allant de janvier à avril. Cela signifie qu'une ou plusieurs longues séquences sans pluie affectent les cultures durant la période de redressement, durant la période de montaison et au début de la période d'épiaison/de floraison, contrairement aux cumuls et aux ratios de jours secs. Au cours de la première partie de la saison, les eTLES assèchent entre autres les sols, ce qui n'est pas favorable à une bonne germination des grains lorsqu'ils sont mis en terre. Une fois les parcelles semées, et la germination effectuée, une/des longues séquences sans pluie vont ralentir/stopper la croissance des plants (deuxième partie de la saison), qui vont se retrouver en situation de stress hydrique, ce qui explique les rendements moins bons. Ces résultats indiquent que le nombre de jours d'eTLES affecte davantage les rendements d'orge, de blé et d'avoine (cultures pluviales d'hiver) que les simples cumuls de pluie et les ratios de jours secs, et ce, sur l'ensemble de la saison, que ce soit sur la période de semence ou de développement des plants.

Tableau 2 : Corrélation entre la variabilité interannuelle des rendements d'orge, de blé et d'avoine, pour lesquels la tendance linéaire respective a été retranchée, et la variabilité des cumuls de pluie saisonniers, des ratios de jours secs saisonniers et du nombre de jours d'eTLES par saison, en Espagne, pour la période 1960-2013.

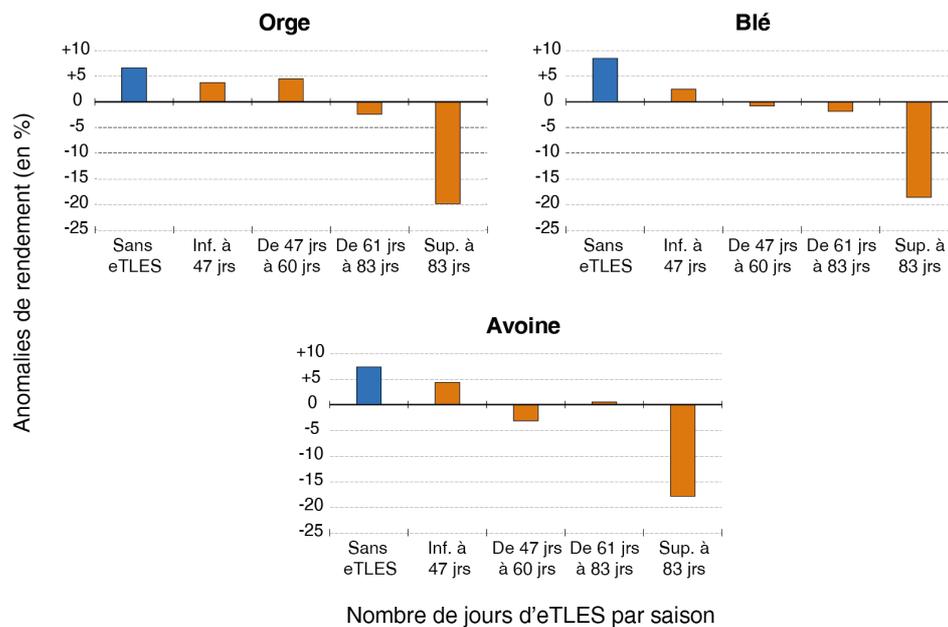
	Cumuls saisonniers de pluie			Ratios de jours secs			Nombre de jours d'eTLES		
	saison entière	septembre à décembre	janvier à avril	saison entière	septembre à décembre	janvier à avril	saison entière	septembre à décembre	janvier à avril
Orge	0,372	0,236	0,333	-0,396	-0,161	-0,404	-0,458	-0,320	-0,343
Blé	0,342	0,233	0,291	-0,381	-0,167	-0,377	-0,558	-0,377	-0,431
Avoine	0,322	0,163	0,33	-0,322	-0,075	-0,382	-0,454	-0,289	-0,369

Les corrélations sont calculées sur la saison entière et sur les sous-saisons allant de septembre à décembre et de janvier à avril. Les valeurs en gras sur fond rouge indiquent des corrélations positives et significatives, celles en gras sur un fond bleu des corrélations négatives et significatives (seuil de confiance de 0,05 d'après le test de Bravais-Pearson). Les valeurs soulignées indiquent les corrélations maximales (en valeur absolue) pour chaque culture.

Rendements et saisons avec/sans eTLES

- 42 La figure 7 permet d'étudier plus en détails l'influence du nombre de jours d'eTLES sur les rendements. Elle présente les anomalies moyennes des rendements d'orge, de blé et d'avoine (en pourcentage par rapport aux rendements moyens sur la période 1961-2013), pour (i) les saisons qui ne sont pas affectées par des eTLES (saisons sans eTLES), puis pour (ii) les saisons impactées par des eTLES (saisons avec eTLES) et pour différentes classes de nombre de jours d'événement par saison. Les saisons avec eTLES sont ainsi réparties en quatre classes déterminées à partir des quartiles calculés sur le nombre de jours d'eTLES par saison sur la période 1960-2013.
- 43 Pour l'orge, le blé et l'avoine, les rendements associés aux saisons sans eTLES sont en moyenne supérieurs de +6,6 %, +8,5 % et +7,4 % par rapport aux rendements moyens respectifs de ces trois types de céréales (figures 7a, 7b et 7c). En présence d'eTLES, les rendements sont moins bons. Ainsi, pour les saisons associées à jusqu'à 83 jours d'eTLES, les rendements d'orge varient en moyenne entre +4,5 % et -2,4 % par rapport aux rendements moyens d'orge, ceux de blé varient entre +2,5 % et -1,9 % et ceux d'avoine entre +4,3 % et -3,2 %. Les saisons les plus affectées par des eTLES (au moins 84 jours d'eTLES par saison) sont associées à des rendements en forte baisse par rapport aux rendements moyens, avec en moyenne -9,9 % pour l'orge, -18,6 % pour le blé et -17,8 % pour l'avoine.
- 44 Bien que que les saisons avec eTLES affichent en moyenne des rendements inférieurs aux saisons sans eTLES, il semble surtout que ce soit les saisons les plus sévèrement touchées par les eTLES (en termes de nombre de jours d'eTLES) qui se démarquent par des rendements anormalement bas.

Figure 7 : Anomalies moyennes de rendement (en % des rendements moyens de référence) a) d'orge, b) de blé et c) d'avoine, selon différentes classes portant sur le nombre de jours d'eTLES par saison de la période 1960-2013.



Les tendances linéaires associées aux rendements de la période 1960-2013 sont retirées pour obtenir des anomalies de rendement. Les rendements moyens de références sont calculés à partir des rendements bruts sur la période 1961-2013. La première classe (histogramme bleu) regroupe 20 saisons sans eTLES. Les quatre autres classes (histogrammes oranges) se basent sur les quartiles calculés sur le nombre de jours d'eTLES par saison : le quartile 1 (47 jours d'eTLES dans la saison), le quartile 2 (61 jours d'eTLES) et le quartile 3 (84 jours d'eTLES). Ainsi, la deuxième classe regroupe 8 saisons, tout comme les troisième et quatrième classes. La cinquième classe regroupe 8 saisons, tout comme les troisième et quatrième classes. La cinquième classe regroupe les 9 saisons les plus touchées par les eTLES.

- 45 A titre de comparaison, Garcia-Herrera et al. (2007) ont mis en avant l'advection d'un air froid et sec provenant des latitudes boréales durant la période couvrant décembre 2004 à février 2005, provoquant une importante sécheresse météorologique en Péninsule Ibérique. Cette sécheresse, détectée dans notre étude et étant caractérisée par 108 jours d'eTLES répartis en deux événements en Espagne et un cumul de pluie de 286 mm au cours de la saison (soit -43 % par rapport aux cumuls moyens de la période 1960-2013), se ressent sur les rendements. Ainsi, les rendements d'orge (-58 %), de blé (-53 %) et d'avoine (-44 %) ont été bien plus faibles que les rendements moyens de référence de la période 1961-2013. C'est également le cas de la forte sécheresse de la saison 2011-2012, mise en avant par Trigo et al. (2013) et également détectée dans cette étude, se traduisant par 124 jours d'eTLES en Péninsule Ibérique, répartis sur deux événements. Tout comme pour la saison 2004-2005, cette forte sécheresse météorologique (seulement 311 mm cumulés sur les 8 mois, soit -38 % comparativement à la moyenne de la période 1960-2013) se ressent sur les récoltes de l'année 2012, avec des rendements de l'ordre de -33 % pour l'orge, -38 % pour le blé et -28 % pour l'avoine, en comparaison avec les rendements moyens.
- 46 Le tableau 3 présente la différence entre les rendements des saisons avec eTLES et les rendements des saisons sans eTLES (rendements moyens sans eTLES - rendements moyens avec eTLES, en %) pour quatre classes de cumuls de pluie par saison. Sur le même principe que la figure précédente, les quatre classes se basent sur les quartiles calculés

sur les cumuls des précipitations de la période 1960-2013. Le tableau 3 permet donc d'observer, à cumuls de pluie comparables, les différences entre les saisons affectées par un/des eTLES et les saisons non affectées par un eTLES, en termes de rendements moyens. En bleu (rouge) sont indiquées les situations où les anomalies moyennes de rendements associées aux saisons affectées par au moins un eTLES sont inférieures (supérieures) à celles des saisons sans eTLES (les écarts sont indiqués).

- 47 D'une manière générale, il y a davantage de valeurs négatives que positives (ou nulles) concernant l'orge, le blé et l'avoine. Cela signifie qu'à cumuls de pluie comparables, les rendements moyens des saisons avec eTLES sont en moyennes moins bons que ceux des saisons sans eTLES. Pour les saisons les moins arrosées (cumuls de pluie inférieurs à 414 mm par saison), les rendements moyens d'orge, de blé et d'avoine des saisons avec eTLES sont respectivement inférieurs de -36 %, 27 % et -53 % par rapport aux rendements moyens des saisons sans eTLES (tableau 3).
- 48 Pour la classe regroupant les saisons ayant reçu entre 414 mm et 485 mm de pluie, seul le blé montre des rendements moyens légèrement inférieurs pour les saisons avec eTLES (-3 % ; tableau 3). À l'inverse, l'orge (+4 %) affiche des rendements moyens légèrement supérieurs pour les saisons avec eTLES, comparativement aux saisons sans eTLES. L'avoine indique des rendements moyens comparables entre les saisons avec eTLES et sans eTLES.
- 49 Pour la classe regroupant les saisons ayant reçu entre 486 mm et 590 mm de pluie, le blé (-12 %) et l'avoine (-8 %) ont des rendements moyens inférieurs pour les saisons avec eTLES (tableau 3). L'orge affiche des rendements moyens comparables entre les saisons avec eTLES et les saisons sans eTLES.
- 50 Un effet additionnel de la répartition des pluies sur les rendements est également détectable durant les saisons les plus arrosées (tableau 3). En effet, pour ces saisons (cumuls de pluie supérieurs à 590 mm), celles avec eTLES montrent des rendements moyens inférieurs de -9 % pour l'orge, le blé et l'avoine, par comparaison aux saisons sans eTLES.

Tableau 3 : Différence entre les rendements moyens des saisons avec eTLES et les rendements moyens des saisons sans eTLES (rendement moyens sans eTLES – rendements moyens avec eTLES ; en %), suivant quatre classes associées aux cumuls de pluie par saisons en Espagne, pour la période 1960-2013.

	Orge	Blé	Avoine
Inf. à 414 mm	-36 %	-27 %	-53 %
de 414 mm à 485 mm	+4 %	-3 %	=
de 486 mm à 590 mm	=	-12 %	-8 %
Sup. à 590 mm	-9 %	-9 %	-9 %

Rendements moyens : **saisons avec eTLES < saisons sans eTLES**
saisons avec eTLES > saisons sans eTLES

Les valeurs en bleu (en rouge) indiquent des rendements inférieurs (supérieurs) pour les saisons affectées par un/des eTLES, comparativement aux saisons non affectées par un eTLES. Les écarts entre les rendements moyens sont indiqués. Les quatre classes sur les cumuls saisonniers moyens de pluie se basent sur les quartiles calculés sur les cumuls saisonniers : le quartile 1 (414 mm de pluie dans la saison humide), le quartile 2 (486 mm) et le quartile 3 (591 mm). Ainsi, la première classe regroupe 13 saisons, tout comme les deuxièmes et troisièmes classes. La quatrième classe regroupe 14 saisons.

- 51 Pour résumer, à l'échelle du bassin méditerranéen, le nombre de jours d'eTLES est relié de façon significative aux cumuls de pluie saisonniers sur les secteurs qui sont les plus soumis aux eTLES (Péninsule Ibérique, Maghreb, sud Balkans, nord-ouest Anatolie et Levant), mais l'intensité de ces relations demeure modérée. Les résultats ont ensuite montré que le nombre de jours d'eTLES affecte davantage les rendements d'orge, de blé et d'avoine (espèces plantées en hiver et cultivées au travers d'une agriculture pluviale) que les simples ratios de jours secs et les cumuls de pluie. Au-delà du fait que les saisons avec eTLES affichent en moyenne des rendements inférieurs aux saisons sans eTLES, il semble surtout que ce soit les saisons les plus sévèrement touchées par les eTLES qui se démarquent par des rendements anormalement bas. A cumuls de pluie comparables entre les différentes saisons étudiées, les rendements moyens associés aux saisons affectées par un/des eTLES sont généralement moins bons que ceux associés aux saisons sans eTLES.

Conclusion

- 52 Pour appréhender les longues séquences sans pluie comme des événements climatiques et géographiques singuliers caractérisés par des critères de localisation, de durée et d'extension spatiale, une méthodologie originale a été appliquée dans l'étude. Après une première étape basée sur la détection des plus longues séquences sans pluie respectives à chacun des points de grille étudiés, cette méthode s'est ensuite orientée vers une approche par fenêtre glissante, permettant de retenir uniquement les épisodes secs les plus longs ayant une certaine cohérence spatiale et temporelle à l'échelle du bassin méditerranéen. Ainsi, les événements détectés par cette méthode ont été définis comme étant des événements de très longs épisodes secs (appelés eTLES). Cette approche a permis de caractériser les sécheresses en Méditerranée en prenant en compte la

distribution temporelle des précipitations, et non pas comme des simples cumuls de pluie ou de jours secs appréhendés à l'échelle des points de grille.

- 53 Sur la période 1957-2013, 76 eTLES d'une durée moyenne de 58,2 jours ont été détectés. Les 76 eTLES ont ensuite été répartis dans quatre configurations récurrentes à l'échelle du bassin méditerranéen : Nord-Est (groupant 11 eTLES centrés sur les Balkans), Ouest (15 eTLES centrés sur la Péninsule Ibérique), Dispersés & Restreints (25 eTLES répartis sur différentes régions du bassin méditerranéen) et Sud-Est (25 eTLES centrés sur le Levant, principalement à caractère saisonnier). Les configurations d'eTLES Nord-Est et Ouest sont liées à des blocages anticycloniques localisés à environ 1 000 km au nord-ouest des secteurs affectés par les eTLES, favorisant un ciel dégagé et l'absence de précipitations.
- 54 En termes d'impacts des eTLES sur les productions de céréales en Espagne, les résultats ont montré que le nombre de jours d'eTLES affecte davantage les rendements d'orge, de blé et d'avoine (espèces d'hiver cultivées au travers d'une agriculture pluviale) que les cumuls de pluie et ratios de jours secs saisonniers. Il apparaît que ce sont les saisons les plus sévèrement touchées par les eTLES qui se démarquent par des rendements anormalement bas. À cumuls de pluie comparables entre les différentes saisons, les rendements moyens associés aux saisons avec eTLES sont généralement moins bons que ceux associés aux saisons sans eTLES. Au vu de ces résultats, l'hypothèse posée semble se vérifier : l'objet eTLES véhicule donc une information spécifique supplémentaire aux cumuls de pluie et aux ratios de jours secs pour expliquer certains impacts sur les rendements agricoles en Espagne. Il semble donc bien que la croissance des cultures d'hiver, en plus d'être sensible à la quantité d'eau reçue, soit sensible à la distribution temporelle des précipitations au cours de la saison humide. Il aurait néanmoins été intéressant d'ajouter un volet plus qualitatif à cette étude d'impact des eTLES sur les rendements de céréales en Espagne, basé sur des enquêtes auprès de certains agriculteurs espagnols. Cependant, une telle étude est extrêmement compliquée à mettre en place, c'est pourquoi notre analyse s'est basée uniquement sur les données de rendement en céréale issues de la FAO.
- 55 Dans le contexte de changement climatique observé et à prévoir, cette étude a montré tout l'intérêt de l'approche géo-climatique des longues séquences sans pluie comme un indicateur robuste et pertinent de la sécheresse en saison humide dans le bassin méditerranéen. D'un point de vue agronomique, aborder la sécheresse par l'objet climatique "eTLES" est pertinent, car comme il a été vu, à cumuls saisonniers comparables, ces événements climatiques affectent les rendements au-delà des simples déficits de pluie. Du fait de son caractère interdisciplinaire, l'objet eTLES pourrait également être utilisé dans des études abordant les répercussions de ces longues séquences sans pluie sur des indicateurs de stock et de disponibilité en eau (sur la consommation d'eau d'irrigation ; le niveau des nappes souterraines ; les arrêtés de restriction des prélèvements) mais également pour en étudier les répercussions sur des phénomènes sensibles à l'humidité des sols comme l'activité végétale, les feux de forêt et les vagues de chaleur estivales.
- 56 D'un point de vue prospectif, les eTLES ont également l'avantage d'être bien reproduits dans les simulations climatiques régionales (Raymond et al., 2018), car contrairement aux cumuls saisonniers, qui prennent en compte la fréquence et l'intensité des précipitations, les eTLES concernent uniquement la distribution temporelle des précipitations. La variabilité des eTLES a l'avantage d'être cohérente spatialement, ce qui laisse supposer des projections plus robustes sur la période future. De plus, les eTLES sont reliés à des

circulations atmosphériques d'échelle zonale à régionale, bien simulées par les modèles de climat. Ainsi, l'étude de la variabilité future des eTLES, dans un contexte d'assèchement observé et à prévoir du bassin méditerranéen, permettrait une réflexion en termes d'adaptation des pratiques agricoles futures, pour favoriser des espèces moins sensibles aux longues séquences sèches, mais également moins gourmandes en eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Brunet M., Gilabert A., Jones P.D., 2014, "A historical surface climate dataset from station observations in Mediterranean North Africa and Middle East areas", *Geoscience Data Journal*, Vol. 1, No.2, 121-128.
- Clar E., Martin-Retortillo M., Pinilla V, 2015, *Agricultura y desarrollo Economico en España, 1870-2000*, Sociedad Española de historia agraria - Documentos de Trabajo. DT-SEHA n. 1503, Septiembre de 2015.
- FAO, 2011, *The state of the world's land and water resources for food agriculture (SOLAW), Managing systems at risk*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, London, Rome and Earthscan.
- Garcia-Herrera R., Paredes D., Trigo R.M., Franco Trigo I., Hernandez E., Barriopedro D., Mendez M.A., 2007, "The outstanding 2004/05 Drought in the Iberian Peninsula : Associated Atmospheric Circulation", *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, 483-498.
- Gong X. et Richman M.B., 1995, "On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the rockies", *Journal of Climate*, Vol. 8, 897-931.
- 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.
- Hernandez-Mora N., Cortina L.M., Madurga R.L., Gimena E.C., 2007, *Groundwater in the Southern Member States of the European Union: an assessment of current knowledge and future prospects*, Country report for Spain, European Academies Science Advisory Council.
- 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.
- 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.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D., 1996, "The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project", *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 77, 437-471.
- 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.
- Lana X., Martinez M.D., Burgueno A., Serra C., Martin-Vide J., Gomez L., 2006, "Distribution of long dry spells in the Iberian Peninsula, years 1951-1990", *International Journal of Climatology*, Vol. 26, 1999-2021.
- Lionello P., Boscolo R., Alpert P., Artale V., Li L., Luterbacher J., May W., Trigo R., Tsimplis M., Ulbrich U., Xoplaki E., 2006, "The Mediterranean Climate: An overview of the main characteristics and issues", *Developments in Earth and Environmental Sciences*, Vol. 4, 1-26.
- McKee T.B.N., Doesken J., Kleist J., 1993, "The relationship of drought frequency and duration to time scales", Eight Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, CA, 179-184.
- Palmer, W.C., 1965, *Meteorological Drought*, Office of Climatology, US Weather Bureau Research Paper No. 45.
- Pita M.F., 2000, « Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens, Application au bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne) ». *Actes du XIII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Nice, France, 225-234.
- Plan Bleu, 2014, *EAU : Gestion de la demande, Approche économique de la gestion de la demande en eau en Méditerranée, Instruments économiques*, Valbonne, Les Cahiers du Plan Bleu, n°15.
- Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., 2016a, « Précipitations intenses sur le Bassin Méditerranéen : quelles tendances entre 1950 et 2013 ? », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 760, mis en ligne le 07 janvier 2016, consulté le 07 janvier 2016. URL : <http://cybergeo.revues.org/27410> ; DOI : 10.4000/cybergeo.27410.
- Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., Drobinski P., Chateau Smith C., 2016b, "Extreme dry spell detection and climatology over the Mediterranean Basin during the wet season", *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, 7196-7204.
- Raymond F., Ullmann A., Camberlin P., Oueslati B., Drobinski P., 2017, "Atmospheric conditions and weather regimes associated with extreme winter dry spells over the Mediterranean basin", *Climate Dynamics*, Vol. 50, 4437-4453.
- Raymond F., Drobinski P., Ullmann A., Camberlin P., 2018, "Extreme dry spells over the Mediterranean Basin during the wet season: assessment of HyMeX/Med- CORDEX regional climate simulations", *International Journal of Climatology*, first online published 15 March 2018, DOI: 10.1002/joc.5487
- 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.
- Sanchez E., Dominguez M., Romera R., Lopez de la Franca N., Gaertner M.A., Gallardo C., Castro M., 2011, "Regional modelling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions", *Climatic Change*, Vol. 107, 625-634.

- Serra C., Bruguero A., Martinez M.D., Lana X., 2006, "Trends in dry spells across Catalonia (NE Spain) during the second half of the 20th century", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 85, 165-183.
- Siebert S., Burke J., Faures J.M., Frenken K., Hoogeveen J., Döll P., Portmann F.T., 2010, "Groundwater use for irrigation - a global inventory", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, 1863-1880.
- Stefanon M., D'Andrea F., Drobinski P., 2012, "Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region", *Environmental Research Letters*, Vol. 7, 14-23.
- Trigo R.M., Añel J.A., Barriopedro D., Garcia-herrera R., Gimeno L., Nieto R., Castillo R., Allen M.R., Massey N., 2013, "The record winter drought of 2011-2012 in the Iberian Peninsula", *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 94, s41-s45.
- USDA, 1994, *Major world crop areas and climatic profiles*, World agricultural Outlook Board, United States Department of Agriculture, Washington D.C., Agricultural handbook n°664.
- Xoplaki E., 2002, *Climate variability over the Mediterranean*, Bern, thèse de doctorat de l'Université de Bern, suisse, 193 p.
- Xoplaki E., Gonzalez-Rouco J.F., Luterbacher J., Wanner H., 2004, "Wet season Mediterranean precipitation variability : influence of largescale dynamics and trends", *Climate Dynamics*, Vol. 23, 63-78.
- Zhang X., Aguilar E., Sensoy S., Melkonyan H., Tagiyeva U., Ahmed N., Kutaladze N., Rahimzadeh F., Taghipour A., Hantosh T. H., Albert P., Semawi M., Ali M.K., Al-Shabibi M.H.S., Al-Oulan Z., Zatari T., Al Dean Khelet I., Hamoud S., Sagir R., Dimercan M., Eken M., Adiguzel M., Alexander L., Peterson T.C., Wallis T., 2005, "Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D22104.

NOTES

1. Disponibles sur le site <http://www.fao.org/faostat/fr/#data>

RÉSUMÉS

Ce travail porte sur l'étude des longues séquences hivernales sans pluie à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen. L'objectif est de définir ces événements climatiques « extrêmes » comme des objets géographiques et climatiques caractérisés par une localisation, une extension spatiale et temporelle, puis d'en mesurer les impacts sur la production céréalière en Espagne. 76 événements de Très Longs Episodes Secs (eTLES) sont détectés sur la période 1957-2013. Ces eTLES sont regroupés en quatre configurations récurrentes à l'échelle du bassin méditerranéen : nord-est, ouest, dispersés & restreints et sud-est. Les configurations d'eTLES sont associées à des blocages anticycloniques localisés à environ 1 000 km au nord-ouest des secteurs impactés. Il est ensuite montré que les eTLES affectent davantage les rendements d'orge, de blé et d'avoine

(espèces d'hiver cultivées au travers d'une agriculture pluviale) que les cumuls de pluie et les ratios de jours secs saisonniers.

This study concerns the long winter sequences without rain on the scale of the entire Mediterranean basin scale. Objectives are (i) to define these extreme events as geographical and climatological objects characterized by a location, a spatial extension and a temporal length and (ii) measured impacts of these events on the cereal production in Spain. 76 events of Very Long Dry Spells (eVLDS) are detected over the 1957-2013 period. These eVLDS are grouped into four typical recurrent configurations on the scale of the Mediterranean basin: North-East, West, scattered & localised and South-East. The eVLDS configurations are associated with anticyclonic conditions located about 1 000 km northwest of the impacted areas. The eVLDS have a greater impact on barley, wheat and oat yields (winter crops grown through rainfed agriculture) than rainfall totals and seasonal dry day ratios.

INDEX

Mots-clés : Méditerranée, sécheresse, changement climatique, impact environnemental, agrosystème

geographyun 908, 925, 724

Keywords : Mediterranean, drought, climate change, environmental impact assessment (eia), agriculture

AUTEURS

FLORIAN RAYMOND

Centre de Recherches de Climatologie, UMR6282 Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France.

florian.raymond@u-bourgogne.fr.

ALBIN ULLMANN

Centre de Recherches de Climatologie, UMR6282 Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France.

albin.ullmann@u-bourgogne.fr.

PIERRE CAMBERLIN

Centre de Recherches de Climatologie, UMR6282 Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France.

pierre.camberlin@u-bourgogne.fr.