



THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE
PREPAREE AU LABORATOIRE BIOGÉOSCIENCES

Ecole doctorale n°554

Environnements – Santé

Doctorat de Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement

Par

Léa Laurent

Évolution des risques agro-climatiques en lien avec les modifications de l'aléa climatique en contexte de réchauffement

Thèse présentée et soutenue à Dijon, le 12/03/2024

Composition du Jury :

| | | |
|-----------------------------|--|----------------------|
| Mme, Launay, Marie | Ingénieure de recherche, INRAE | Rapportrice |
| Mr, Drogue, Gilles | Professeur des universités, université de Lorraine | Rapporteur |
| Mme, Colbach, Nathalie | Directrice de recherche, INRAE | Présidente |
| Mr, Soubeyroux, Jean-Michel | Directeur Adjoint de la Climatologie, Météo France | Examineur |
| Mr, Ullmann, Albin | Maître de conférences HDR, université de Bourgogne | Directeur de thèse |
| Mr, Castel, Thierry | Maître de conférences HDR, Institut Agro Dijon | Codirecteur de thèse |
| Mr, Perrot, Claude | Responsable Domaine Assurance Récolte, GRAA | Invité |
| Mr, Bois, Benjamin | Maître de conférences, IUVV | Invité |

Titre : Évolution des risques agro-climatiques en lien avec les modifications de l'aléa climatique en contexte de réchauffement

Mots clés : aléa climatique, risque agro-climatique, sécheresse, agriculture, France, changement climatique

Résumé : Le changement climatique modifie l'aléa climatique et impose de reconsidérer les risques agro-climatiques. En France, depuis les années 1960, le changement climatique se traduit par une hausse abrupte des températures autour des années 1987/1988. Ces modifications rapides de l'aléa climatique sont susceptibles de modifier les risques agro-climatiques et d'entraîner des pertes historiques dans les récoltes. La compréhension des effets régionalisés du changement climatique sur les risques agro-climatiques constitue donc un enjeu majeur pour le monde agricole. La sécheresse est l'un des risques agro-climatiques qui impacte fortement la production agricole et les performances des assurances climatiques sur récoltes. Ce travail de thèse, fruit d'une collaboration entre un assureur et un laboratoire de recherche, se propose d'étudier comment et dans quelles proportions les modifications de l'aléa climatique affectent le risque sécheresse, et à terme les performances de l'assurance climatique sur récolte. Le blé, le maïs et la vigne sont des cultures importantes pour l'entreprise, et sont donc étudiées plus particulièrement dans ce travail.

Les données Safran-Isba-Modcou produites par Météo-France permettent, à l'échelle régionale, de quantifier l'évolution structurelle de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau sur la période 1959-2021. La prise en compte de la vulnérabilité des cultures via l'utilisation d'un modèle de bilan hydrique simplifié donne l'opportunité d'évaluer les changements dans la contrainte hydrique sur les bassins de production des cultures d'intérêt. La définition d'un seuil de stress hydrique pour les cultures étudiées conduit au développement d'un indice de sécheresse. Les distributions statistiques de ce dernier sont probabilisées avec un modèle de Tweedie, donnant lieu à une caractérisation régionalisée des modifications structurales du risque agro-climatique sécheresse suite aux réchauffements rapides observés en France.

Après le réchauffement rapide de 1987/1988, la demande évaporative est en forte hausse, particulièrement au printemps et en été. Cela induit un assèchement progressif des réservoirs en eau du sol, faisant augmenter la contrainte hydrique sur le couvert végétal. La prise en compte de la vulnérabilité des cultures d'intérêt montre que par exemple pour le blé tendre d'hiver, le bilan hydrique évolue en conséquence. Les périodes de dépassement du seuil de stress hydrique s'allongent ou s'intensifient avec le réchauffement, de manière variée selon les bassins de production considérés. Ces évolutions peuvent être expliquées par une forte augmentation de l'évapotranspiration. En fin de saison végétative, la modification des séquences sèches joue également un rôle. La structure du risque agro-climatique lié à la sécheresse en est affectée. Cela se traduit par une augmentation de l'intensité et/ou de l'occurrence des épisodes de sécheresse. Ces modifications dépendent du bassin de production étudié et s'accompagnent d'une hausse des sécheresses extrêmes.

Ces modifications du risque sécheresse suite à l'évolution rapide de l'aléa climatique affectent des stades sensibles des cultures, ce qui peut amener à des pertes de rendement importantes. Les performances de l'assurance multirisque climatique sont donc étroitement liées à l'évolution de ce type de risque. L'indice développé dans ces travaux montre, dans certaines conditions, une bonne corrélation avec l'indice de sinistralité utilisé par les assurances. Cela ouvre des perspectives pour étudier la volatilité des performances de l'assurance climatique sur récolte. Il convient néanmoins d'affiner et de consolider ces résultats, qui, pour certaines cultures telles que le blé, ne montrent pas d'améliorations probantes. La projection de ces indices sécheresse pourrait aider les assureurs à élaborer et tester des stratégies de prévention et d'adaptation territorialisées pertinentes pour l'ensemble des parties prenantes.

Title: The evolving agro-climatic risks related to changes in climate hazards in a warming context

Keywords: climate hazards, agro-climatic risks, drought, agriculture, France, climate change

Abstract: Climate change modifies climatic hazards and requires a reconsideration of agro-climatic risks. In France, since the 1960s, climate change has resulted in an abrupt rise in surface air temperature around 1987/1988. These rapid changes in climatic hazards are likely to modify agro-climatic risks and lead to historic crop losses. Understanding the regional effects of climate change on agro-climatic risks is therefore a major challenge for the agricultural sector. Drought is one of the agro-climatic risks that have a major impact on crop production and climatic crop insurance. This work, which results from a collaboration between an insurance company and a research laboratory, investigates how and to what extent changes in climatic hazards affect drought risk, and ultimately the performance of climatic crop insurance. Since wheat, maize and vineyards are the main crops in the company's portfolio, agro-climatic risk modifications will be studied specifically for these crops of interest.

The Safran-Isba-Modcou dataset, produced by Météo-France, allows to quantify structural changes in climatic hazard linked to water cycle on a regional scale over the period 1959-2021. Taking crop vulnerability into account by using a simplified water balance model provides an opportunity to assess changes in water constraint for each production basin of the crops of interest. The definition of a water stress threshold for the crops studied enables to develop a drought index. The statistical distributions of the latter are probabilized using a Tweedie model, resulting in a regionalized characterization of drought risk structural modifications after the rapid warming observed in France.

After the rapid warming of 1987/1988, evaporative demand increases sharply, particularly in spring and summer. This leads to a progressive drying-up of soil water reservoirs, increasing water stress on vegetation cover. Taking into account the vulnerability of the crops of interest shows that for winter bread wheat, for example, the water balance changes consequently. Periods when the water stress threshold is exceeded are lengthened or intensified with warming, depending on the production basin considered. These trends can be explained by a sharp increase in evapotranspiration. At the end of the growing season, changes in dry spells also play a role. This affects the structure of the drought-related agro-climatic risk, translating into an increase in the intensity and/or the occurrence of drought episodes. These changes depend on the production basin studied, and are associated with an increase in extreme droughts.

The changes in drought risk, resulting from the rapid evolution of climatic hazards, affect sensitive crop stages, and can lead to significant yield losses. The performance of climatic crop insurance is therefore closely linked to changes in this type of risk. Given certain conditions, the drought index developed in this work shows a good correlation with the loss ratio used by insurance companies. This opens up new avenues for studying the volatility of climatic crop insurance performance. However, we need to refine and consolidate these results, which do not show any convincing improvement for certain crops such as wheat. The projection of these drought indices could help insurers to develop and experiment territorialized prevention and adaptation strategies that are relevant to all stakeholders.



Remerciements

En premier lieu, mes remerciements vont à **Marie Launay** et **Gilles Drogue** pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit, et à **Nathalie Colbach** et **Jean-Michel Soubeyroux** pour avoir accepté d'en être les examinateurs. Merci également aux membres de mon comité de suivi de thèse, **Benjamin Sultan** et **Freddy Vinet**, pour leur suivi et leurs conseils lors de nos rendez-vous annuels. J'aimerais aussi faire une mention spéciale à **Benjamin Bois**, sans lequel ce projet n'aurait peut-être pas vu le jour. Merci pour ton suivi et tes conseils tout au long de ma thèse.

Au cours de ces années de thèse CIFRE, j'ai été encadrée par plusieurs personnes que je tiens à remercier profondément ici.

Thierry Castel, qui m'a suivie depuis ma formation d'ingénieur agronome et a su me guider de la meilleure des manières sur le chemin de la recherche. Un grand merci à vous pour votre accompagnement depuis ma dernière année d'école, pour votre investissement dans ce projet et vos conseils toujours avisés.

Albin Ullmann, qui me connaissait beaucoup moins que Thierry lorsque je suis arrivée dans l'équipe mais qui m'a quand même accordé sa confiance pour réaliser ce projet. Merci à toi pour ton accompagnement, ton dynamisme et ta sympathie.

Merci à vous deux pour tous les échanges scientifiques qu'on a pu avoir ensemble, pour avoir su me guider lorsque j'en avais besoin sans empiéter sur mon autonomie, et pour m'avoir permis de vivre beaucoup d'expériences enrichissantes au cours du projet.

Claude Perrot, qui m'a intégré pleinement dans son équipe du Domaine Assurance Récolte de Groupama Rhône-Alpes Auvergne et m'a fait découvrir le métier d'assureur. Merci à vous pour votre accompagnement, toutes nos discussions passionnantes, et vos invitations à toutes sortes d'évènements et de rencontres qui m'ont permis de m'immerger dans le monde de l'assurance. J'en profite pour remercier aussi les membres de l'équipe du Domaine Assurance Récolte pour leur accueil et leur curiosité, les experts avec lesquels j'ai pu aller sur le terrain pour découvrir l'expertise sinistre sur les récoltes, et les membres d'exo.expert dont j'ai pu suivre l'évolution au cours de ces quelques années.

Xavier Aubouy, qui m'a permis de découvrir les activités de Groupama Mutuelle d'Assurance, et qui a toujours su répondre à mes besoins dans le cadre de mes recherches. Merci à vous pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux, votre accompagnement et votre enthousiasme. Je me réjouis de pouvoir poursuivre notre collaboration à l'issue de cette thèse.

Au cours de ce doctorat, j'ai pu à mon tour aussi encadrer scientifiquement deux stagiaires, **Maël Aubry** et **Clémence Hamot**. Je vous remercie de m'avoir fait confiance pour réaliser votre stage de fin d'études, et pour vos apports à mes travaux de recherche. Je vous souhaite le meilleur dans votre avenir professionnel, je suis fière d'avoir pu contribuer un peu à votre parcours.

Ce travail de thèse aurait été beaucoup moins agréable sans la bienveillance et la bonne humeur des membres de l'équipe du Centre de Recherches de Climatologie. **Benjamin Pohl**, mon tout premier Maître Jedi, qui m'a conforté dans ma décision de me lancer dans une thèse et accompagné de la meilleure des manières : merci pour tout. **Julien P.**, **Mario** et **Hugues** fournisseurs officiels de bonne humeur et de blagues : promis je n'oublie pas le lard et les bonbons des Vosges. **Julien C.** et **Alex** que je remercie pour leur partage d'expérience et leurs conseils avisés. **Pascal**, **Nadège**, **Yves**, **Marie-Charlotte**, **Pierre**, **Olivier** que je remercie pour les échanges qu'on a pu avoir au détour d'un repas ou d'une sortie, et leur bienveillance.

L'entraide entre jeunes chercheurs est également primordiale dans le bon déroulement d'une thèse. Beaucoup de doctorants de l'équipe sont devenus aujourd'hui des amis, et je souhaite les remercier pour tout ce qu'on a pu partager ensemble. Ceux qui sont docteurs maintenant, et qui ont quitté le nid du CRC : **Thibaut**, **Pauline**, **Sébastien** et **Asmat**, merci pour ces bons moments et à bientôt. Mais aussi tous les docteurs en devenir : **Sarah**, **Lola**, **Quentin**, **Erika**, **Julianne**, **Valentin**, **Catinca** et **Julita**. Je vous souhaite plein de courage, que la Force soit avec vous ! Sans oublier **Mélissa**, qui a commencé sa thèse en même temps que moi : merci pour tous ces moments partagés, qui ont largement dépassé le cadre professionnel. C'était très agréable de vivre cette expérience à tes côtés, et je te souhaite le meilleur pour la suite.

Parce qu'il faut parfois aussi savoir décrocher, j'aimerais remercier ceux avec lesquels j'ai pu oublier le temps d'une soirée, d'une sortie ou d'un weekend mes recherches : mes amis.

Ceux qui font partie de mon monde depuis quelques temps, et avec qui je peux me défouler en tapant dans un ballon : mes amis volleyeurs **Cécile**, **Rémi**, **Léna** et **Paul**. Il faut être 6 pour faire une équipe, alors je remercie bien sûr aussi tous les autres avec lesquels je joue plus ou moins régulièrement.

Ceux qui font partie de mon monde depuis un peu plus longtemps, que j'ai rencontrés lors de mon cursus à AgroSup Dijon et qui sont devenus des amis. **Pauline** et **Marie**, mes colocataires adorées, que je remercie pour leur bonne humeur, nos fous rires et leurs encouragements. **Mathilde**, que je remercie pour son amitié à toute épreuve, même celle de l'éloignement : merci pour ta folie et tous ces chouettes moments passés (et à venir). Mais aussi **Cléa**, **Blanche**, **Guillaume** et les autres : je n'oublierais jamais mon passage à l'école grâce à vous, et je suis heureuse d'avoir pu participer à des moments importants de vos vies même après le diplôme.

Ceux qui font partie de mon monde depuis encore plus longtemps, mes amis de prépa. Merci à vous **Marion**, **Julieth**, **Marie**, **Clément**, **Paul** et **Maxence**, sans vous je n'aurais peut-être pas aussi bien vécu la prépa. Je suis heureuse qu'on puisse garder le contact, même si nous avons suivi des voies différentes. Je vous souhaite le meilleur pour la suite et j'espère qu'on continuera à se voir encore longtemps.

Et enfin ceux qui font partie de mon monde depuis très longtemps, pour certains presque depuis toujours, mes amis vosgiens. Merci **Nico**, **Paul**, **Rémi**, **Jeanne**, **Alexia**, **Robin**, **Nico**, **Félix**, **Malou**, **Quentin**, **Marie**, **Anaëlle** : je n'aurais pas pu espérer meilleurs compagnons d'enfance et d'adolescence au milieu des sapins. Je suis si fière qu'on ait réussi à garder de tels liens, j'espère que cela durera aussi longtemps que possible.

Arrivant presque au terme de ces remerciements, j'ai une pensée pour mes **grands-parents**, qui m'accompagnent de près ou de plus loin, je vous aime. Je n'oublie pas non plus les autres membres de ma famille : cousins, cousines, tantes et oncles, qui m'accompagnent dans ce parcours tous à leur manière.

Je garde une place toute particulière pour celui qui a débarqué dans ma vie au milieu de cette thèse, et qui s'y est fait une place de choix. **Maxime**, mon amour. Merci d'être là, d'avoir su m'écouter, me rassurer, me redonner confiance en moi lorsque j'en manquais. Je suis heureuse de démarrer une nouvelle étape de ma vie à tes côtés.

Mes derniers mots iront à mes **parents** et ma sœur, **Fanny**. Votre accompagnement à toute épreuve, votre confiance, votre patience m'ont mené jusqu'ici. Merci énormément, pour tout. Je vous aime.

Avant-propos

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) entre l'équipe du Centre de Recherche de Climatologie du laboratoire Biogéosciences (UMR CNRS/uB 6282, université de Bourgogne, Dijon) et le Domaine Assurance Récolte de Groupama Rhône-Alpes Auvergne (Bourges).

La thèse était encadrée par les directeurs de thèse Thierry Castel (Maître de conférences, Institut Agro Dijon) et Albin Ullmann (Maître de conférences, université de Bourgogne), le responsable scientifique dans l'entreprise Claude Perrot (responsable du Domaine Assurance Récolte, Groupama Rhône-Alpes Auvergne, Bourges) et le responsable administratif dans l'entreprise Xavier Aubouy (Direction Études, Tarification et Pilotage, Secteur Risques Professionnels Agricoles, Groupama Assurances Mutuelles, Paris).

Au cours du doctorat, plusieurs déplacements dans l'entreprise (Groupama Rhône-Alpes Auvergne et Groupama Assurances Mutuelles) ont été réalisés. Des journées de terrain pour découvrir l'expertise sinistre sur des parcelles de blé, de maïs et de vigne ont également été organisées, afin de mieux comprendre le fonctionnement et la gestion des contrats d'assurance récolte tels que le contrat d'assurance MultiRisque Climatique (MRC).

Le projet de thèse CIFRE présenté dans ce manuscrit porte sur l'analyse du risque agro-climatique lié à la sécheresse sur les trois cultures les plus importantes pour l'entreprise, et a pour objectif d'aider à une meilleure compréhension des risques pouvant impacter la performance de ces contrats MRC.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciements | 7 |
| Avant-propos | 11 |
| Table des matières | 13 |
| Liste des abréviations | 17 |
| Liste des figures | 19 |
| Liste des tableaux | 23 |
| Introduction générale..... | 25 |
| 1.1. Les risques agro-climatiques en France : contexte, gestion et enjeux..... | 26 |
| 1.1.1. Un contexte agricole particulier en Europe de l’Ouest : la stagnation des rendements 26 | |
| 1.1.2. Les risques agro-climatiques | 27 |
| 1.1.3. Les dispositifs d’accompagnement des exploitations agricoles à la gestion du risque | 28 |
| 1.1.4. La sinistralité de l’assurance multirisque climatique : un enjeu majeur..... | 30 |
| 1.1.4.1. La situation de l’assurance MRC en France..... | 30 |
| 1.1.4.2. Étude de cas : impact de la sécheresse sur le ratio S/P du maïs de Groupama.... | 32 |
| 1.2. Le réchauffement climatique en France métropolitaine et les composantes du cycle de l’eau local | 35 |
| 1.2.1. La (les) rupture(s) de stationnarité dans les températures..... | 35 |
| 1.2.2. Variabilité spatio-temporelle des précipitations et des séquences sèches | 37 |
| 1.2.3. Le cycle de l’eau impacté | 38 |
| 1.3. Objectifs de la thèse | 41 |
| Méthodologie générale..... | 45 |
| Liminaire : stratégie méthodologique déployée dans la thèse | 46 |
| 2.1. Étude de l’aléa climatique lié au cycle de l’eau..... | 48 |
| 2.1.1. La base de données Safran-Isba-Modcou (SIM)..... | 48 |
| 2.1.1.1. La chaîne SIM..... | 48 |
| 2.1.1.2. Les variables climatiques du cycle de l’eau | 49 |
| 2.1.2. La détection des ruptures avec les statistiques bayésiennes..... | 51 |
| 2.2. Modélisation et étude du bilan hydrique..... | 52 |
| 2.2.1. Les bassins de production agricoles | 52 |
| 2.2.2. Les données agronomiques et pédologiques..... | 53 |
| 2.2.3. Modélisation du bilan hydrique du blé et du maïs..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4. Modélisation du bilan hydrique de la vigne | 56 |
| 2.3. Étude du risque de sécheresse et modélisation statistique..... | 59 |
| 2.3.1. Définition de la vulnérabilité des cultures | 59 |
| 2.3.2. Caractérisation du risque : le modèle de Tweedie..... | 61 |
| Chapitre 1 : Impacts d'un changement abrupt des températures sur les composantes climatiques principales du cycle de l'eau local en France. | 63 |
| 3.1. Partie 1 : Avant-propos | 64 |
| 3.2. Partie 2 : How abrupt changes in surface temperature impact the main climatic components of the local water cycle over France?..... | 67 |
| Abstract | 67 |
| Keywords | 67 |
| Introduction..... | 68 |
| Material and methods..... | 70 |
| Study area and data | 70 |
| Agro-climatic indices | 71 |
| Statistical analysis..... | 72 |
| Results | 72 |
| Detection of shift in temporal evolution of variables linked to the local water cycle | 72 |
| 1987/1988 shift: a turning point | 75 |
| Geographical response of local water cycle variables to temperature shift..... | 78 |
| Discussion and conclusion..... | 80 |
| Acknowledgements | 81 |
| Conflict of interest statement | 82 |
| Data availability statement | 82 |
| Supplementary Material | 83 |
| Chapitre 2 : Impacts d'un changement abrupt des températures sur le cycle de l'eau en France. Cas du blé tendre d'hiver..... | 87 |
| 4.1. Partie 1 : Avant-propos | 88 |
| 4.2. Partie 2 : How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area..... | 91 |
| Abstract | 91 |
| Keywords | 91 |
| Introduction..... | 92 |
| Material and methods..... | 93 |
| Study area and datasets | 93 |

| | |
|---|-----|
| Phenological modeling and maximal evapotranspiration..... | 95 |
| Water balance modeling | 96 |
| Water balance results analysis..... | 97 |
| Results | 98 |
| Water balance daily mean cycle modification | 98 |
| Spatial disparities in the evolution of hydric stress..... | 100 |
| Evolution of climatic variables linked to water cycle | 102 |
| Discussion | 103 |
| Conclusion | 105 |
| Declaration of Competing Interest..... | 106 |
| Data availability | 106 |
| Acknowledgments..... | 106 |
| Chapitre 3 : Le réchauffement climatique à l'échelle régionale augmente l'occurrence et l'intensité du risque sécheresse pour le blé tendre d'hiver..... | 109 |
| 5.1. Partie 1 : Avant-propos | 110 |
| 5.2. Regional climate warming increase occurrence and intensity of winter wheat drought risk. 113 | |
| Abstract | 113 |
| Keywords..... | 113 |
| Introduction..... | 114 |
| Material and methods..... | 115 |
| Study area and datasets | 115 |
| Phenology and water balance modeling..... | 118 |
| Water balance analysis..... | 119 |
| Modeling drought risk with Tweedie distributions..... | 120 |
| Results | 120 |
| Water balance daily mean cycle modifications..... | 120 |
| Water stress index evolution and drought risk modifications | 122 |
| Geographical pattern of extreme hydric stress index evolution..... | 126 |
| Discussion | 128 |
| Conclusion | 131 |
| Authors contributions | 132 |
| Acknowledgments..... | 132 |
| Supplementary Material | 133 |
| Discussion générale..... | 137 |

| | |
|--|-----|
| 6.1. Impacts du réchauffement abrupt sur le bilan hydrique du maïs et de la vigne | 138 |
| 6.1.1. Le cas du maïs..... | 138 |
| 6.1.2. Le cas de la vigne | 142 |
| 6.2. Indice de stress hydrique et sinistralité de l'assurance multirisque climatique | 150 |
| Conclusion générale | 155 |
| Références bibliographiques | 163 |
| Annexes | 177 |

Liste des abréviations

AMO : Atlantic Multidecadal Oscillation, oscillation multidéennale atlantique

CEPMMT : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme / ECMWF : European Centre for Medium-range Weather Forecasts

CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche

DJF : Décembre-Janvier-Février

ECA : Emission Control Area, zone de contrôle des émissions

ETM : ÉvapoTranspiration Maximale / MET : Maximal EvapoTranspiration

ETP : ÉvapoTranspiration Potentielle / PET : Potential EvapoTranspiration

ETR : ÉvapoTranspiration Réelle / AET : Actual EvapoTranspiration

FAO : Food and Agriculture Organization, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

FFA : Fédération Française de l'Assurance

FMSE : Fonds de Mutualisation Sanitaire et Environnemental

FNGCA : Fonds National de Garanties des Calamités Agricoles

FSN : Fonds de Solidarité Nationale

FTSW : Fraction of Transpirable Soil Water, fraction d'eau du sol transpirable

GDD : Growing Degree-Days, degrés-jours de croissance

HDI : High Density Interval, intervalle de haute densité

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

ISN : Indemnité de Solidarité Nationale

JJA : Juin-Juillet-Août

Kc : coefficient cultural

Ks : coefficient de stress hydrique

NAO : North Atlantic Oscillation, oscillation Nord Atlantique

MAM : Mars-Avril-Mai

MRC : MultiRisque Cimatique

PAC : Politique Agricole Commune

PRELIQ : PRÉcipitations LIQuides

Ratio S/P : ratio Sinitre à Primes

RCP : Radiative Concentration Pathways, trajectoires de concentration radiative

REW : Relative Extractible Water, fraction d'eau extractible

RPG : Registre Parcellaire Graphique

RU : Réserve Utile

SIM : Safran-Isba-Modcou

SON : Septembre-Octobre-Novembre

SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration

SST : Sea Surface Temperature, température de surface de l'océan

STICS : Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards

SWD : Soil Water Deficit, déficit hydrique du sol

SWI : Soil Water Index, indice d'humidité des sols

UE : Union Européenne / EU : European Union

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Tendances et taux de croissance des rendements nationaux des cultures majoritaires françaises pour le 20 ^{ème} et le 21 ^{ème} siècle. (a) Tendances des rendements, pour les cultures saisonnières et les cultures saisonnières agrégées (1900-2016). (c) Taux de croissance annuels relatifs des rendements, pour les cultures saisonnières et les cultures saisonnières agrégées (1900-2016). Source : <i>Schaubberger et al., 2018</i> | 26 |
| Figure 2 : Schéma d'ensemble du dispositif de l'assurance récolte réformée. Source : <i>Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (2022)</i> | 29 |
| Figure 3 : Evolution annuelle du ratio S/P brut et cumulé depuis 2005 des contrats MRC, en %. Source : <i>Fédération Française de l'Assurance (2023)</i> | 31 |
| Figure 4 : Évolution annuelle du ratio S/P des contrats MRC et aléas climatiques majoritairement déclarés, par ordre d'importance. * donnée non disponible, estimation Groupama. <i>Données internes à l'entreprise, Fédération Française de l'Assurance (FFA)</i> | 31 |
| Figure 5 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir) et de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en rouge) sur les départements du bassin de production des Pays de la Loire (Charente-Maritime, Deux-Sèvres et Vendée). | 33 |
| Figure 6 : Analyses par un modèle de régressions linéaires et un modèle bayésien pour la détection de ruptures dans les températures minimales et maximales moyennes annuelles. (a) Températures minimales et maximales observées, moyennes postérieures bayésiennes (en pointillés) et partitions linéaires (en bleu et rouge). (b) Probabilités postérieures bayésiennes et point de rupture structural du modèle de régression linéaire (ligne verticale). Source : <i>Brulebois et al., (2015)</i> | 36 |
| Figure 7 : Moyenne mobile trimestrielle (traits pleins) et médiane (traits pointillés) des débits pour les périodes 1969-1987 (bleu) et 1988-2009 (rouge), et variabilité correspondante avec les percentiles 0,25-0,75 (aires colorées). Source : <i>Brulebois et al., (2015)</i> | 39 |
| Figure 8 : Diagramme synthétisant la méthodologie de la thèse. | 46 |
| Figure 9 : Carte des points de grille Safran couvrant la France métropolitaine. | 48 |
| Figure 10 : Cartes des bassins de production majoritaires des cultures d'intérêt. Les points de grille colorés en orange et bleu sont les points de grille pour lesquels la surface est recouverte d'au moins 10% par des parcelles respectivement de blé tendre d'hiver et de maïs, les points de grille colorés en vert sont ceux pour lesquels la surface est recouverte d'au moins 1% par des parcelles de vigne, selon le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2019 (<i>Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019</i>). Les contours rouges délimitent les bassins de production majoritaires pour chaque culture. | 52 |
| Figure 11 : Carte des classes de réserve utile en eau du sol pondérées et moyennées par point de grille Safran. Les données brutes des classes de réserve utile en eau du sol sont tirées de la base de données de l'initiative GISSol (<i>Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011</i>)..... | 53 |
| Figure 12 : Schéma de fonctionnement de la chaîne de modélisation du bilan hydrique de la vigne. D'après (<i>Aubry, 2022</i>). | 57 |
| Figure 13 : Différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché : (A) moûts concentrés, jus de raisin, vins de table et jeunes vignobles en formation ; (B) vins blancs, vins rouges légers, fruités ; (C) vins jeunes de qualité, équilibrés mais avec prédominance du fruit sur la structure, seuils limites pour les vins blancs et (D) vins de qualité, concentrés, équilibrés et aptes pour le vieillissement. D'après <i>Ojeda & Saurin (2014)</i> | 60 |
| Figure 14: (a) Yearly and (b, c, d) seasonal evolution of variables linked to water cycle between 1959 and 2019. PET: Potential EvapoTranspiration; AET: Actual EvapoTranspiration. Gray bars: SIM chains values; | |

| | |
|--|-----|
| gray solid curves: Bayesian posterior mean values. Solid colored curves: Bayesian posterior mean values; dashed colored curves: SIM chains values. Vertical dashed line indicate 1987..... | 74 |
| Figure 15: Daily mean cycles of variables linked to the water cycle. (a, b, c, d, e, f) Black solid curves: mean cycle of SIM values from 1959 to 1987; red solid curves: mean cycle of SIM values from 1988 to 2019. (g, h) Black solid curves: mean cycle of SIM values from 1959 to 1987; red solid curves: mean cycle of SIM values from 1988 to 2014; purple solid curves: mean cycle of SIM values from 2015 to 2019. The solid curve shows the ensemble mean, the color shading extends to ± 1 standard deviation to show interannual variability. | 77 |
| Figure 16: Map of the anomalies of period 1988-2019 compared to period 1959-1987 for (a, c, e, g) liquid precipitation (mm) and (b, d, f, h) ratio AET/PET. (a, b) Year, (c, d) Spring, (e, f) Summer, (g, h) Autumn. | 79 |
| Figure 17: Map of the main winter bread wheat production basins in metropolitan France. Transparent grid is the Safran-Isba-Modcou climate data grid (Météo France), orange points are the points on which at least 10% of the surface is covered by winter bread wheat fields according to the 2019 Registre Parcellaire Graphique (<i>Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019</i>). Red contours represent main winter bread wheat production basins: 1. Nord-Pas-de-Calais, 2. Parisian Basin, 3. Poitou-Charentes, 4. Centre, 5. Bourgogne/Rhône-Alpes, 6. Aquitain Basin. The background map comes from OpenStreet Map database..... | 94 |
| Figure 18: Crop coefficient (Kc) function of cumulative degree-days needs for winter bread wheat. | 95 |
| Figure 19: Water balance daily mean cycle for each winter bread wheat main production zone. Green: daily mean for 1960–1987 period; red: daily mean for 1988–2021 period. Blue line: stress threshold. | 99 |
| Figure 20: Difference in the number of days under hydric stress threshold (40%) (1988–2021 period – 1960–1987 period) for each SIM grid point containing at least 10% of its area covered with winter bread wheat fields. (a) Annual scale, (b) spring March-April-May (MAM), (c) summer June-July-August (JJA). | 101 |
| Figure 21: Map of the main winter bread wheat production basins in metropolitan France and associated useful soil water reserve. The area of each SIM grid point shown is covered by at least 10% wheat fields according to the 2019 survey of the Registre Parcellaire Graphique (<i>Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019</i>). Blue colors correspond to classes of useful water reserve (mm, see map legend). Red contours represent main winter bread wheat production basins: 1. Nord-Pas-de-Calais, 2. Parisian Basin, 3. Poitou-Charentes, 4. Centre, 5. Bourgogne/Rhône-Alpes, 6. Aquitain Basin. The background map comes from OpenStreet Map database. | 116 |
| Figure 22: Water balance daily mean cycle for all winter bread wheat production basins. Green: daily mean for 1960–1987 period; blue: daily mean for 1988-2014 period; red: daily mean for 2015-2021 period. Black dashed line: stress threshold. Gray, line and point fillings represent the annual cumulative hydric stress index (mm). | 121 |
| Figure 23: Density histograms of annual water stress index (mm) for all winter bread wheat main production basins and associated Tweedie distributions. Green bars: 1960-1987 period; blue bars: 1988-2014 period; red bars: 2015-2021 period. The first class on the far left (zero water stress) is represented by a thinner bar, the associated density value (exceeding y limits) is written in the corresponding colored text. | 122 |
| Figure 24: Same as Figure 23 but for each winter bread wheat production basin..... | 123 |
| Figure 25: Proportion of years exceeding the 90 th percentile of the water stress index of all the winter bread wheat production basins of the 1960-1987 period. (a) Period 1: 1960-1987; (b) period 2: 1988-2014; (c) period 3: 2015-2021..... | 127 |
| Figure 26 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire du maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2020. Ligne bleue pointillée : seuil de stress hydrique (40%). Zones 1, 2, 3, 4 et 5 respectivement les bassins de production de Bretagne, des Pays de la Loire, Aquitain, d'Alsace et de la vallée du Rhône. | 140 |

| | |
|--|------------|
| Figure 27 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). (a) Échelle annuelle, (b) printemps (MAM), (c) été (JJA). | 141 |
| Figure 28 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire de la vigne. En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2021. Lignes bleues pointillées : seuils de stress hydrique léger, modéré, fort et très fort, respectivement 36%, 21%, 7% et 1%. Zones 1, 2, 3, 4, 5 et 6 respectivement les bassins de production de Champagne, de la vallée de la Loire, d’Alsace, de Bourgogne/Rhône, du Bordelais et de la région méditerranéenne. | 143 |
| Figure 29 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, échelle annuelle. (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%). | 145 |
| Figure 30 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, été (JJA). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%). | 146 |
| Figure 31 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, automne (SON). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%). | 147 |
| Figure 32 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir), de l’indice de stress hydrique tiré de l’indice d’humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l’indice de stress hydrique calculé pour le maïs (en rouge) pour les départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée. | 151 |
| Figure 33 : Évolutions annuelles du ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama (en noir), de l’indice de stress hydrique tiré de l’indice d’humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l’indice de stress hydrique calculé pour le blé (en rouge) pour les départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne. | 152 |

Liste des tableaux

| | |
|--|------------|
| Tableau 1 : Liste des aléas et des phénomènes climatiques couverts par les contrats d'assurance récolte MultiRisque Climatique (MRC) subventionnés. D'après Ouvrié (2020) et Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (2023). | 28 |
| Tableau 2 : Seuils de déficit hydrique en fonction des différentes méthodes d'estimations. D'après Aubry (2022) ; Lebon et al. (2003) ; Leeuwen et al. (2009) ; Ojeda et al. (2002) ; Ojeda & Saurin (2014). | 60 |
| Table 3: Percentage of grid points recording a significant shift in 1987/1988, anomalies (ΔPET, mm) and 95% confidence interval of the difference in the mean (95% HDI) over the entire french metropolitan territory at annual and seasonal scales, for potential evapotranspiration (PET, mm). * means significant difference according to Bayesian difference test. | 75 |
| Table 4: Same as in Table 3 but for actual evapotranspiration (AET, mm). | 75 |
| Table 5: Same as in Table 3 but for liquid precipitation (PRELIQ, mm). | 76 |
| Table 6: Difference of 1988–2019 period compared to 1959–1987 period for potential evapotranspiration (PET) at the annual and seasonal scale. * indicates that the difference is significant according to Bayesian differences test (95% HDI). | 102 |
| Table 7: Same as Table 6 but for liquid precipitation (PRELIQ). | 102 |
| Table 8: Agronomic, pedologic and climatic characteristics of the six winter wheat production basins studied. Period 1: 1960-1987; period 2: 1988-2014; period 3: 2015-2021. PET: Potential EvapoTranspiration, PRELIQ: liquid precipitation. Production basins 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain production basins. * indicates that the difference is significant according to Bayesian differences test (95%HDI). | 117 |
| Table 9: Mean occurrence and intensity of water stress events according to the fitted Tweedie distributions and mean water stress index (mm). Period 1: 1960-1987, period 2: 1988-2014, period 3: 2015-2021. Production basins 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain production basins. | 125 |

Introduction générale

1.1. Les risques agro-climatiques en France : contexte, gestion et enjeux

1.1.1. Un contexte agricole particulier en Europe de l'Ouest : la stagnation des rendements

Depuis trois décennies en Europe de l'Ouest, les rendements agricoles de plusieurs cultures montrent une stagnation marquée (Brisson *et al.*, 2010; Finger, 2010). Les points d'inflexion sont souvent identifiés au début des années 1990 (Peltonen-Sainio *et al.*, 2009). Plusieurs causes sont mises en évidence, notamment le ralentissement des améliorations génétiques, la mise en place de limitations législatives à l'utilisation de certains intrants, ou encore les aléas climatiques (Hawkins *et al.*, 2013; Lin & Huybers, 2012; Michel & Makowski, 2013).

La France est très affectée par cette stagnation des rendements, particulièrement la culture du blé, avec 70 à 80% des surfaces cultivées impactées (Grassini *et al.*, 2013; Ray *et al.*, 2012; Schaubberger *et al.*, 2018) (Figure 1). Ce plafonnement des rendements du blé questionne la sécurité alimentaire, la France étant le premier producteur de l'Union Européenne (UE) en 2020, et exportant la moitié de sa production aux autres pays de l'UE et au reste du monde (Agreste, 2021).

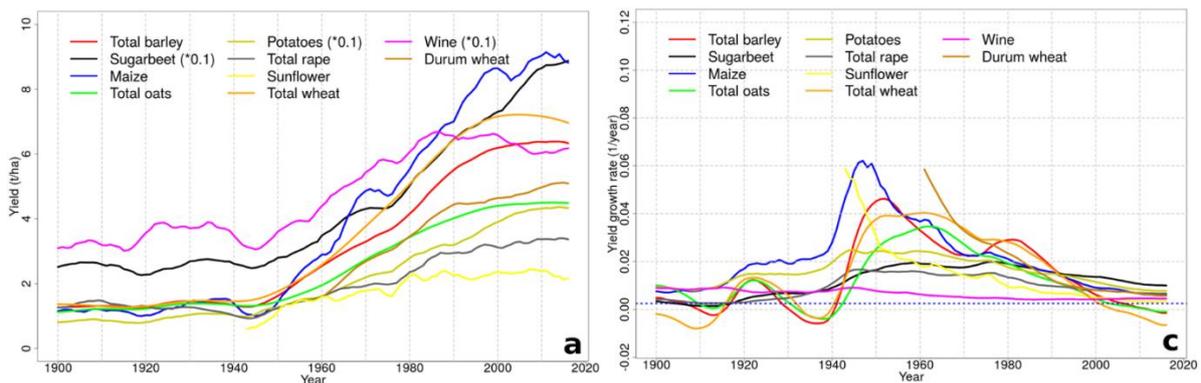


Figure 1 : Tendances et taux de croissance des rendements nationaux des cultures majoritaires françaises pour le 20^{ème} et le 21^{ème} siècle. (a) Tendances des rendements, pour les cultures saisonnières et les cultures saisonnières agrégées (1900-2016). (c) Taux de croissance annuels relatifs des rendements, pour les cultures saisonnières et les cultures saisonnières agrégées (1900-2016). Source : Schaubberger *et al.*, 2018.

Pour expliquer cette stagnation des rendements dans le pays, plusieurs facteurs sont identifiés : potentiel physiologique atteint, changement des conditions climatiques, modification des politiques agricoles et des subventions, modification des itinéraires techniques de culture, diminution des investissements pour irriguer/fertiliser, ou encore augmentation des surfaces en agriculture biologique (Schaubberger *et al.*, 2018). La combinaison subtile de ces facteurs modulée dans le temps (par exemple avec l'évolution des variétés cultivées) et l'espace (par exemple selon les spécificités des bassins de production) rend l'analyse délicate et complexe pour hiérarchiser leur influence et interpréter ce phénomène de stagnation. Ce plafonnement des rendements est doublé d'une plus

grande variabilité absolue de ces derniers (*Hawkins et al., 2013*), avec pour 2016 une récolte de blé d'hiver historiquement désastreuse (*Ben-Ari et al., 2018*). Si l'augmentation de la variabilité climatique au cours de ces dernières années est une piste avancée, mais non consolidée, pour expliquer la plus grande variabilité des rendements, les pertes extrêmes de récolte de 2016 sont clairement attribuées à la conjonction de phénomènes climatiques sans précédent. En effet, des températures minimales et maximales exceptionnellement élevées en fin d'automne 2015 (novembre et décembre) combinées à de fortes pluies en mai et juin 2016 expliquent ces dommages (*Ben-Ari et al., 2018*). Depuis plusieurs années, la sécheresse impacte aussi fortement le rendement des céréales, avec en 2020 par exemple un manque de précipitations en avril et en été ayant mené à une baisse des rendements des céréales d'hiver (*Agreste, 2020*). Le même phénomène a été observé en 2022 où la sécheresse estivale a entraîné une forte diminution des rendements des céréales de printemps (*Agreste, 2022*). Avec un climat qui se réchauffe, la probabilité que ces conditions se reproduisent augmente, signant ainsi une modification du risque agro-climatique.

1.1.2. Les risques agro-climatiques

L'agriculture, outre les risques de marché (volatilité du prix des matières premières, taux de change, ...), est fortement affectée par les risques naturels tels que le climat ou les maladies (*Lidsky et al., 2017*). Dans un contexte de changement climatique global, les risques agro-climatiques sont en constante évolution et ont des impacts croissants sur les rendements agricoles. Le risque de dégât associé à un aléa climatique est le résultat d'un croisement entre les caractéristiques de cet aléa (intensité, spatialisation, durée, ...) et celles de la vulnérabilité de la plante (variété, stade phénologique, exposition, ...) (*Ouvrié, 2020*).

La vulnérabilité traduit la sensibilité de la plante aux facteurs climatiques limitants tels que le manque de précipitation et les contraintes hydriques par exemple. Elle dépend entre autres de l'espèce végétale étudiée, de la variété et de sa sensibilité, et de l'exposition. Les conditions pédoclimatiques influent aussi sur la vulnérabilité des espèces végétales, celles-ci pouvant développer des mécanismes d'adaptation (mécanisme induit) ou d'acclimatation (mécanisme acquis) (*Banik et al., 2016; Basu et al., 2016; Pandey & Shukla, 2015*). Dans les cas les plus simples, l'évaluation du risque peut être réalisée en matérialisant la vulnérabilité par un seuil unique et statique ayant un sens écophysio-logique (par exemple un seuil de stress hydrique). La prise en compte des phénomènes d'adaptation et d'acclimatation nécessite de faire varier dynamiquement ce seuil en réponse aux fluctuations des variables climatiques et aux critères culturaux (e.g. date de semis) et variétaux (e.g. résistance au stress hydrique, vitesse d'acclimatation). Plusieurs modèles de cultures ont été développés pour prendre en compte ces différents critères, comme par exemple STICS (Simulateur multIDisciplinaire pour les Cultures Standard) (*Brisson et al., 2009*). Leur mobilisation est indispensable dans l'objectif de comprendre et d'évaluer des processus écophysio-logiques et afin d'avoir une approche intégrée qui permette d'aller jusqu'au rendement. Mais la lourdeur des paramétrisations, l'imbrication de plusieurs mécanismes et les possibles compensations d'erreurs peuvent empêcher la clarification des effets de la modification de la variabilité climatique sur le stress hydrique. L'utilisation d'un modèle de bilan hydrique simplifié permet de se situer à un niveau de complexité intermédiaire. Ce type de modèle, intégrant les caractéristiques phénologiques de la culture étudiée via une variable d'entrée unique, permet d'évaluer de manière simple et pertinente le lien entre la modification de l'aléa climatique et du risque agro-climatique.

L'aléa climatique se définit quant à lui par la survenance d'un ou plusieurs phénomènes climatiques liés aux températures, aux précipitations, au vent, au rayonnement, etc. Les aléas climatiques, dont les conséquences sur les cultures sont couvertes par les contrats d'assurance récolte MultiRisque Climatique (MRC) subventionnés, sont définis par le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) (*Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023*), et sont résumés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Liste des aléas et des phénomènes climatiques couverts par les contrats d'assurance récolte MultiRisque Climatique (MRC) subventionnés. D'après Ouvrié (2020) et Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (2023).

| Aléas climatiques | |
|-----------------------|---|
| Température | Excès de température, coup de chaleur, températures basses, coup de froid, gel |
| Précipitations | Sécheresse, excès d'eau, pluies violentes, pluies torrentielles, humidité excessive, grêle, poids de la neige ou du givre |
| Vent | Tempête, tourbillon, vent de sable |
| Rayonnement | Coup de soleil, manque de rayonnement solaire |

D'autres aléas peuvent être couverts par les contrats MRC, dans ce cas les contrats ne sont pas subventionnés. Il en est de même pour les contrats qui ne couvrent pas l'ensemble des phénomènes climatiques listés dans le Tableau 1, par exemple les contrats « grêle » ou « grêle/tempête ».

Parmi tous ces aléas climatiques, la grêle, le gel, l'excès d'eau et la sécheresse constituent les aléas principaux identifiés lors des passages des experts sinistres sur les parcelles sinistrées depuis la mise en place des contrats d'assurance MRC, en 2005 (*Lidsky et al., 2017*).

1.1.3. Les dispositifs d'accompagnement des exploitations agricoles à la gestion du risque

En France, la gestion des risques agricoles est historiquement une politique publique. La création du Fonds National de Garanties des Calamités Agricoles (FNGCA) en 1964 constitue la première forme d'accompagnement par l'État des exploitations agricoles confrontées à des aléas naturels (climatiques, sanitaires et environnementaux) (*Boucher et al., 2019*). Le développement de nouvelles assurances devait être favorisé, mais seule l'assurance grêle bénéficiait du soutien de l'État. Au début des années 2000, sous l'impulsion du rapport *Babusiaux (2000)*, les pouvoirs publics ont engagé une modernisation du dispositif par le transfert progressif du soutien à la gestion des risques et des crises du FNGCA vers des assurances individuelles et une plus grande responsabilisation des agriculteurs. Deux dispositifs ont alors été mis en place : l'assurance récolte (MultiRisque Climatique sur récolte, MRC) depuis 2005 d'une part, et le Fonds de Mutualisation Sanitaire et Environnemental (FMSE) depuis 2013 d'autre part (i.e. calamités agricoles), tous deux en partie financés par des fonds européens de la Politique Agricole Commune (PAC). En 2016, un produit d'assurance « socle » est

défini au niveau européen, donnant lieu à un contrat d'assurance MultiRisque Climatique très encadré (Boucher et al., 2019).

Les modalités de mise en œuvre du soutien public à l'assurance récolte sont encore aujourd'hui régulièrement débattues et ajustées. Dans le contexte du changement climatique et de son impact de plus en plus important sur les exploitations agricoles, la politique de gestion des risques sur les récoltes apparaît comme l'un des enjeux majeurs de politique publique. Au bout de 17 ans, le système à deux dispositifs décrit précédemment (assurance MRC subventionnée et calamités agricoles) a montré ses limites. La répétition des sinistres a pesé sur le coût des contrats d'assurance récolte pour les agriculteurs et sur la rentabilité globale du secteur pour les entreprises d'assurance (*Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2022*). La diffusion de l'assurance récolte reste encore insuffisante, contrariant le principe mutualiste de l'assurance (70% des exploitations en grandes cultures et en vignes ne sont pas assurées, plus de 80% des exploitations toutes cultures confondues) (*données internes à l'entreprise*). Le régime des calamités agricoles, fondé sur des procédures collectives de reconnaissance et d'estimation des dommages, est insuffisamment personnalisé et peut générer de l'incompréhension pour ses bénéficiaires. Certaines cultures sont aussi exclues de ce régime (grandes cultures et viticulture notamment), rendant les filières correspondantes très vulnérables en cas d'évènements climatiques majeurs. Ainsi, il apparaissait nécessaire de repenser le dispositif d'accompagnement pour améliorer la résilience de l'agriculture face aux conséquences du changement climatique.

La loi du 2 mars 2022 promulgue ainsi un nouveau régime de l'assurance récolte reposant sur la solidarité nationale et le partage du risque entre l'État, les agriculteurs et les assureurs (*Légifrance, 2022*). Dans cette réforme, mise en place dès la campagne 2023, la couverture des risques est divisée en trois « étages » (Figure 2).

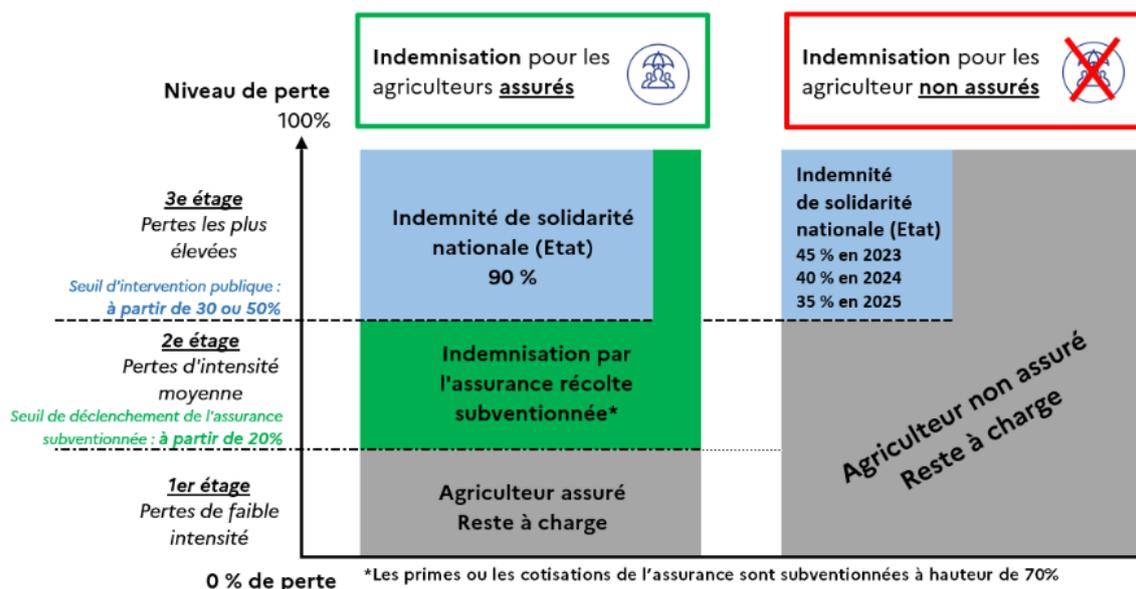


Figure 2 : Schéma d'ensemble du dispositif de l'assurance récolte réformée. Source : *Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (2022)*.

Lorsque l'aléa climatique induit une perte de faible intensité (1^{er} étage, moins de 20% de perte), les coûts du sinistre restent à la charge de l'agriculteur, qu'il soit assuré en MRC ou non (*Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2022*). Lorsque les pertes représentent entre 20 et 50% du rendement historique (pour les grandes cultures et la vigne notamment), les agriculteurs ayant souscrit un contrat d'assurance récolte subventionnable sont indemnisés par l'assureur (2^{ème} étage). Pour les pertes d'ampleur exceptionnelle (supérieures à 50%), l'Indemnisation de Solidarité Nationale (ISN) est mise en place. Elle est prise en charge par l'État, et l'assureur si l'exploitant est assuré, à des taux différents en fonction de la situation de l'agriculteur (Figure 2). Le niveau maximal de subvention permis par la réglementation européenne est aussi appliqué, avec des contrats d'assurance subventionnés à 70%. Tous les types de production pourront bénéficier de cette réforme, via l'assurance et/ou le Fonds de Solidarité Nationale (FSN), des grandes cultures à l'arboriculture en passant par la vigne, les prairies, le maraîchage ou encore l'horticulture ou l'apiculture.

La mise en place de la réforme doit avant tout permettre le développement des contrats MRC en améliorant l'articulation entre le public et le privé (assurance et solidarité nationale) et en facilitant l'accès à l'assurance pour tous les exploitants agricoles. Les assureurs sont mis au cœur du dispositif par l'instauration du système d'interlocuteur unique, qui sera en charge d'évaluer les pertes des agriculteurs, qu'ils soient assurés ou non, et de verser les indemnités (assurance ou ISN). La création d'un pool de coréassurance devrait permettre une meilleure connaissance des risques climatiques, notamment par la mise en commun des portefeuilles des assureurs et des données de sinistres. Cette réforme porte d'importants espoirs pour toute la filière, puisqu'elle intervient dans un contexte de sinistralité importante de l'assurance MRC récolte.

1.1.4. La sinistralité de l'assurance multirisque climatique : un enjeu majeur

1.1.4.1. La situation de l'assurance MRC en France

Depuis sa création en 2005, le ratio du coût des sinistres sur le montant des cotisations (aussi nommées primes) des contrats MRC – ou ratio sinistre à prime, noté S/P – et permettant d'évaluer la performance des contrats d'assurance, a été déficitaire (supérieur à 75%) 15 années sur 18 en France, allant même au-delà de 100% toutes les années depuis 2016 en cumulé (*Fédération Française de l'Assurance, 2023*) (Figure 3).

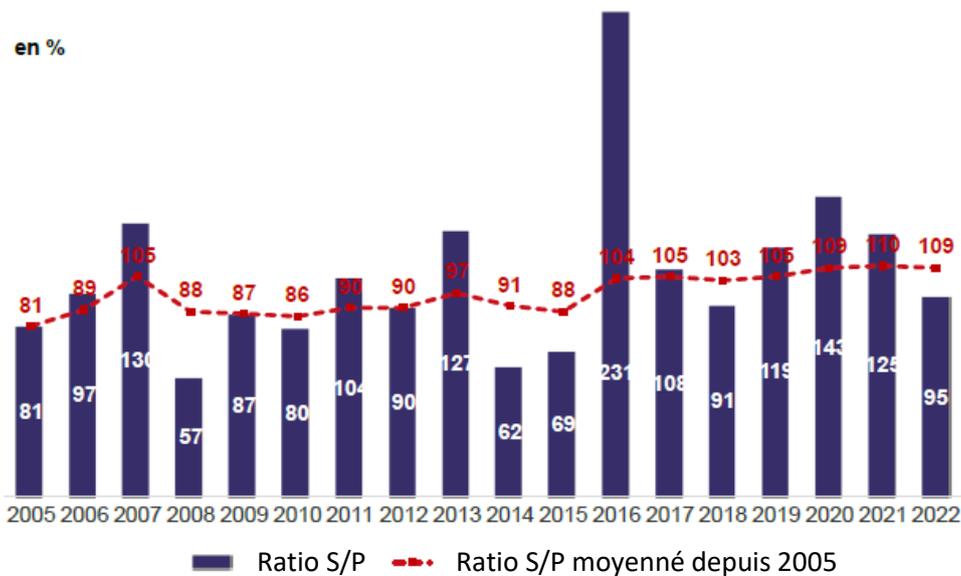


Figure 3 : Evolution annuelle du ratio S/P brut et cumulé depuis 2005 des contrats MRC, en %.
Source : Fédération Française de l'Assurance (2023).

Depuis 2016, on constate que trois aléas climatiques majoritaires sont la cause des pertes constatées dans les contrats MRC : l'excès d'eau, la sécheresse et le gel (Figure 4). La sécheresse a un impact de plus en plus important dans l'évolution des coûts des sinistres sur récoltes, avec des années très déficitaires en précipitations entraînant de fortes contraintes hydriques sur les cultures.

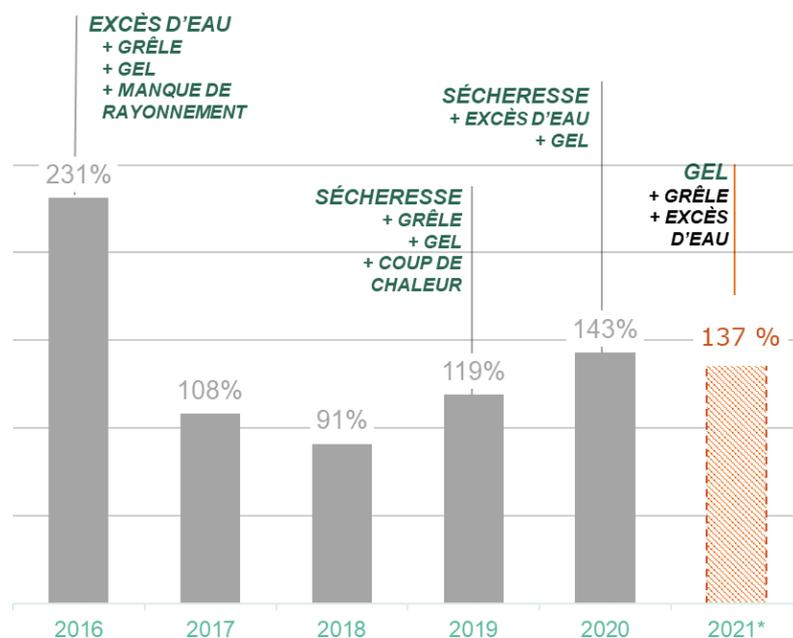


Figure 4 : Évolution annuelle du ratio S/P des contrats MRC et aléas climatiques majoritairement déclarés, par ordre d'importance. * donnée non disponible, estimation Groupama. Données internes à l'entreprise, Fédération Française de l'Assurance (FFA).

Les céréales et fourrages et les vignes, constituant les deux classes de cultures majoritaires dans les parts des capitaux assurés et des cotisations, sont aussi celles qui ont un ratio S/P souvent plus élevé que pour les autres classes de cultures depuis 2013 (*Fédération Française de l'Assurance, 2023*). En moyenne de 2013 à 2022, les ratios S/P des contrats MRC grandes cultures et vignes sont respectivement de 114% et 128%. Ainsi, ces deux types de cultures sont très surveillés par les assureurs, notamment le blé, le maïs et la vigne.

Les problématiques exposées précédemment sont d'importance pour Groupama, assureur majeur des agriculteurs. L'entreprise, partenaire de la CIFRE, connaît, elle aussi, depuis la création des contrats MRC, une forte sinistralité, avec un impact de l'aléa sécheresse de plus en plus important (*données internes à l'entreprise*). Le blé, le maïs et la vigne constituent les principales sources de capitaux assurés et de cotisations pour Groupama, et sont donc des cultures très surveillées.

1.1.4.2. Étude de cas : impact de la sécheresse sur le ratio S/P du maïs de Groupama

Dans le contexte décrit précédemment de forte sinistralité des contrats MRC, et de la place prépondérante du blé, du maïs et de la vigne dans les cultures assurées, il nous a paru intéressant en première approche d'étudier la potentielle corrélation entre le ratio sinistre sur prime du maïs de Groupama et l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI). Le SWI informe sur le taux de remplissage en eau des réservoirs du sol. Lorsque le SWI est égal à 1, les réservoirs en eau du sol sont remplis, inversement lorsque celui-ci est égal à 0 les réservoirs en eau du sol sont vides.

Les montants des coûts des sinistres dus aux exploitants assurés et des cotisations (ou primes) payées par ces derniers à l'échelle départementale pour la culture du blé utilisés dans ce cas d'étude sont issus des bases de données de l'entreprise. L'indice d'humidité du sol est tiré de la base de données Safran-Isba-Modcou (SIM) produite par Météo France, réanalyse de données observées au pas de temps quotidien sur une grille de résolution 8km (*Soubeyroux et al., 2008*), et agrégé à l'échelle départementale. L'agrégation de ces deux variables au pas de temps annuel et pour chaque bassin de production majoritaire des cultures d'intérêt en France nous permet d'étudier conjointement les évolutions annuelles du ratio S/P et de l'indice d'humidité du sol (Figure 5).

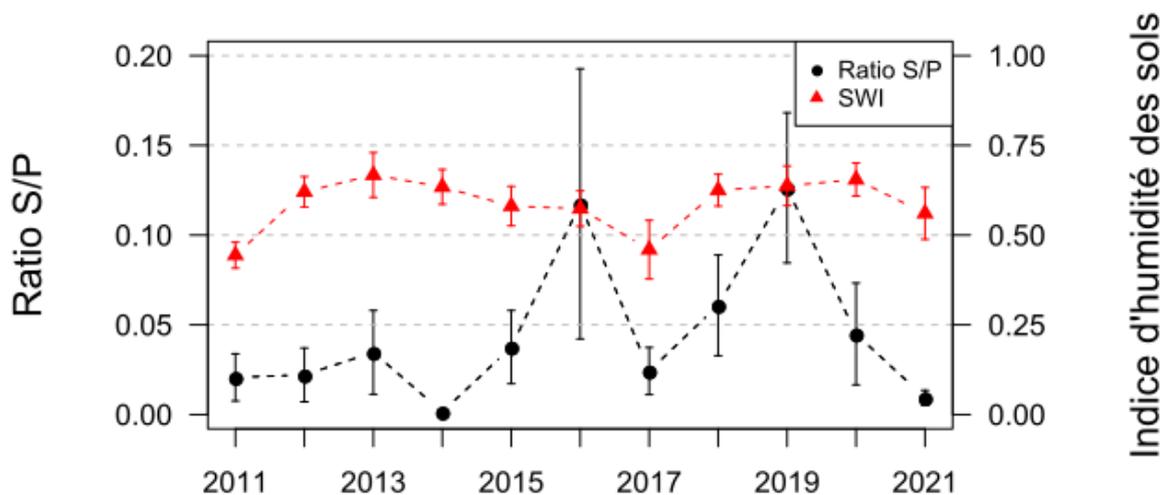


Figure 5 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir) et de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en rouge) sur les départements du bassin de production des Pays de la Loire (Charente-Maritime, Deux-Sèvres et Vendée).

Le ratio S/P très élevé de 2016 confirme le caractère exceptionnel de cette année, marquée par un excès d'eau très important au printemps suivi d'épisodes de gel et de grêle et un manque de rayonnement pendant la saison végétative (Figure 4 et Figure 5). L'année 2019 est également marquée par une forte sinistralité pour le maïs, due là encore à un enchaînement de conditions climatiques défavorables tout au long du cycle. L'objectif ici est de voir si l'aléa sécheresse, représenté par le SWI, peut expliquer les variations de la sinistralité des contrats MRC. En théorie, si c'était le cas, lorsque l'indice d'humidité du sol est en baisse (lorsqu'il y a de moins en moins d'eau dans le sol disponible pour le couvert végétal) le ratio S/P devrait augmenter et aggraver la sinistralité des contrats MRC, et inversement. Le SWI devrait donc être anticorrélé au ratio S/P. Or, sur le bassin de production des Pays de la Loire, le SWI des contrats MRC montre une légère corrélation positive, d'environ 0.23 selon le test de Pearson (Figure 5). Dans cette région, la sinistralité des contrats MRC de l'entreprise n'est donc pas bien expliquée par le déficit d'eau dans le sol tel que défini ici, avec le SWI.

Dans les autres bassins de production ou pour les autres cultures, le lien entre le ratio S/P et l'indice d'humidité du sol est plus ou moins marqué (Annexe 1, Annexe 2, Annexe 3 et Annexe 4). Les bassins de production du maïs de la plaine d'Alsace ou de la vallée du Rhône montrent par exemple des anticorrélations légères à modérées (respectivement -0.23 et -0.41), confirmant que le déficit d'eau dans le sol peut constituer un facteur explicatif de la sinistralité des contrats MRC. La culture du blé tendre d'hiver dévoile également des résultats contrastés. Mais l'étude de la corrélation directe entre l'indice d'humidité du sol et le ratio S/P a des limites. Le ratio S/P étudié dans cette partie comprend tous les sinistres déclarés chaque année pour l'assurance MRC, sans distinction de l'aléa climatique ayant mené à la déclaration du sinistre. De plus, l'indice d'humidité du sol de la base de données Safran est calculé en prenant en compte le couvert végétal complet de chaque point de grille de résolution 8km couvrant la France, il n'est pas spécifique à chaque culture d'intérêt. L'évaluation de l'impact du risque sécheresse sur la sinistralité des contrats MRC nécessite donc une méthodologie plus spécifique, qui reste à développer.

Cette étude de cas renforce la nécessité d'une meilleure connaissance de l'évolution de l'aléa climatique et du risque agro-climatique liés à la sécheresse. Les résultats montrent que le ratio S/P réagit aux variations du SWI. Ainsi, la caractérisation du risque sécheresse pour les 3 cultures majoritaires de l'entreprise (le blé, le maïs et la vigne) et de son évolution est primordiale pour mieux anticiper les impacts sur la sinistralité de l'assurance récolte MRC. D'autant plus que la France, comme le reste du monde, n'est pas épargnée par l'augmentation des températures et l'intensification des phénomènes de précipitations extrêmes (*IPCC, 2021*).

1.2. Le réchauffement climatique en France métropolitaine et les composantes du cycle de l'eau local

1.2.1. La (les) rupture(s) de stationnarité dans les températures

Les dernières décennies en Europe de l'Ouest ont été marquées par une augmentation importante des températures moyennes de l'air, particulièrement au printemps et en été (*Dong et al., 2017; van Oldenborgh et al., 2009*). Ce réchauffement est plus rapide que ce qui était attendu suite à l'augmentation des gaz à effet de serre d'origine anthropique (*Philipona et al., 2009; Ruckstuhl et al., 2008*). Cette tendance à l'augmentation des températures est doublée de plusieurs changements de régimes climatiques dans l'hémisphère Nord, reliés à des modifications de circulations atmosphériques (*Hare & Mantua, 2000; Yasunaka & Hanawa, 2002*). Ces changements de régimes climatiques peuvent moduler le signal climatique à l'échelle régionale. En Europe de l'Ouest, une modification abrupte de régime a été identifiée à la fin des années 1980, avec une forte augmentation des températures de l'air en surface (*de Laat & Crok, 2013; Keevallik, 2011; Reid et al., 2016*).

Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer cette modification abrupte des températures. L'influence de l'océan Atlantique pourrait constituer un facteur clé des changements récents dans le climat de l'Europe de l'Ouest, les tendances des anomalies de température des dernières décennies coïncidant avec le réchauffement substantiel de l'océan Atlantique Nord (*Sutton & Dong, 2012*). Les variations multidécennales dans les températures de surface de l'océan (Sea Surface Temperature en anglais, SST) Atlantique Nord sont connues sous le nom d'Oscillation Multidécennale Atlantique (Atlantic Multidecadal Oscillation en anglais, AMO), un mode de variabilité climatique alternant des phases froides et chaudes sur de larges régions de l'hémisphère Nord (*Knight et al., 2006*). Le réchauffement rapide des SST à la fin du 20^{ème} siècle, donc la phase chaude de l'AMO, succède à une phase positive prolongée de l'Oscillation Atlantique Nord (North Atlantic Oscillation en anglais, NAO), et peut être considérée comme une réponse retardée à cette longue séquence de NAO+ (*J. Robson et al., 2012*). Conjointement à cet effet tardif de la phase positive de la NAO sur le réchauffement rapide de l'océan, de nombreux autres facteurs explicatifs de la variabilité multidécennale climatique de l'Atlantique Nord ont été identifiés (*Terray, 2012*). Une baisse des émissions d'aérosols dans la troposphère et les variations dans les périodes d'activités volcaniques pourraient être deux des principales causes des changements de long terme dans les températures de l'air en surface (*Booth et al., 2012; Evan et al., 2009*). Tous ces facteurs, couplés au changement climatique global, peuvent expliquer l'augmentation abrupte des températures en Europe de l'Ouest à la fin des années 1980.

En France, comme dans le reste de l'Europe de l'Ouest, l'augmentation des températures moyennes est plus importante que celle de la planète entière sur le siècle dernier (*Moisselin et al., 2002*). Ce signal fort de réchauffement est porté par une augmentation significative à la fois des températures minimales et maximales. Depuis les années 1980, la tendance au réchauffement s'intensifie considérablement, en accord avec les simulations des modèles climatiques intégrant les émissions anthropiques (*Terray & Boé, 2013*). Sur le pays, la rupture abrupte est détectée dans les températures moyennes annuelles observées par les stations météorologiques de Météo France au niveau des années 1987/1988 (*Brulebois et al., 2015*) (Figure 6). L'évolution des moyennes postérieures reconstituées avec les statistiques bayésiennes souligne cette hausse abrupte des températures minimales et maximales à la fin des années 1980. L'analyse des probabilités postérieures bayésiennes

– donnant une information sur la probabilité de rupture pour chaque année de la période – montre une forte probabilité de rupture dans la série temporelle des températures moyennes entre les années 1987 et 1988.

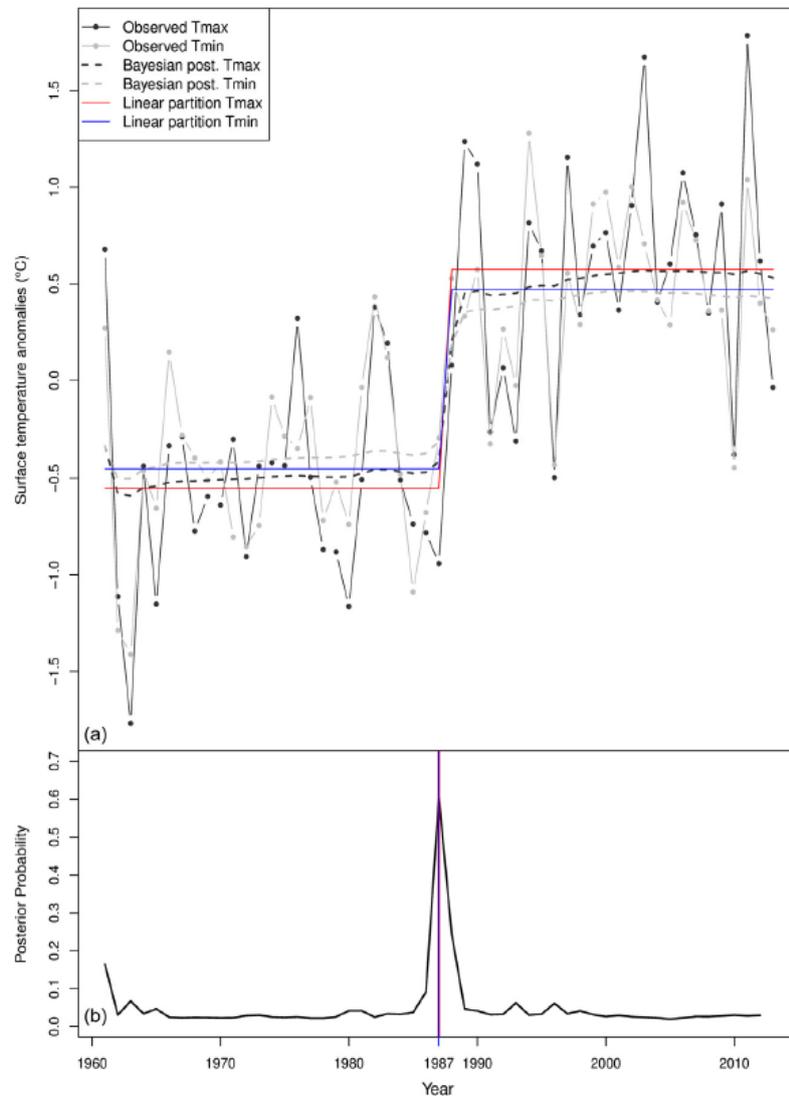


Figure 6 : Analyses par un modèle de régressions linéaires et un modèle bayésien pour la détection de ruptures dans les températures minimales et maximales moyennes annuelles. (a) Températures minimales et maximales observées, moyennes postérieures bayésiennes (en pointillés) et partitions linéaires (en bleu et rouge). (b) Probabilités postérieures bayésiennes et point de rupture structural du modèle de régression linéaire (ligne verticale). Source : Brulebois et al., (2015).

Plus de 75% des stations enregistrent une rupture à cette période sur le territoire, menant à un réchauffement rapide d'environ 1°C à la fois des températures minimales et maximales. Le printemps est très affecté par ce réchauffement, avec +1,13°C et +1,55°C pour respectivement les températures minimales et maximales entre les périodes 1961-1987 et 1988-2013. Après ce réchauffement abrupt, l'évolution des températures montre une tendance légère à la hausse, suivie d'une période de hiatus

liée aux conditions La Nina (*Meehl et al., 2011*). Cela délimite de part et d'autre de 1987/1988 deux régimes climatiques qui diffèrent principalement par leurs températures de l'air en surface moyennes.

Depuis 2014/2015, une nouvelle augmentation abrupte des températures est observée, suggérant une nouvelle étape dans le processus de réchauffement en France. En 2010, une révision de la convention établissant les teneurs en soufre maximales mondiales autorisées pour le combustible à usage maritime est entrée en vigueur. Elle introduit une réduction par paliers de ces teneurs depuis 2010, pour atteindre 0,5% en 2020 (*International Maritime Organization, 2023*). En parallèle d'améliorer la qualité de l'air, la réduction des émissions de soufre atténue ses effets rafraîchissants, contribuant à l'accélération du changement climatique (*Hansen et al., 2023; Kontovas, 2020*). Le classement de la mer Baltique et de la mer du Nord en zones de contrôle des émissions (Emission Control Areas, ECA en anglais) depuis 2015, avec des normes d'émissions de soufre plus sévères, couplée à cette révision des normes mondiales, a pu contribuer à la hausse abrupte des températures détectée en France en 2014/2015.

Le changement climatique est un processus complexe, qui ne peut se résumer à une succession de ruptures dans les températures. Ces réchauffements rapides, conjonction de processus atmosphériques dynamiques (persistance de phases positives de la NAO) et de processus radiatifs (effets des aérosols) (*Booth et al., 2012; Sutton & Dong, 2012*), sont combinés à une tendance continue à l'augmentation des températures, observée dans le monde entier (*IPCC, 2021*). Dans les travaux présentés ci-dessus, l'échelle temporelle et la région étudiées dévoilent – au moyen de tests statistiques robustes – une rupture abrupte dans les températures de l'air à 2m (*Brulebois et al., 2015*). Celle-ci permet, sur le territoire métropolitain français, de délimiter deux régimes climatiques (voire un troisième à partir de 2014/2015) de longueurs temporelles similaires, et ainsi d'étudier l'impact du changement climatique sur les modifications de l'aléa climatique et conséquemment sur le risque agro-climatique lié à la sécheresse.

1.2.2. Variabilité spatio-temporelle des précipitations et des séquences sèches

L'évolution des précipitations est plus contrastée que celle des températures en France, avec une délimitation assez nette entre le sud et le nord du pays, marqués respectivement par une baisse et une hausse des cumuls annuels moyens, toutefois non significatives (*Gibelin et al., 2015*). Concernant les phénomènes pluviométriques extrêmes, il est difficile d'identifier une évolution significative à la hausse des précipitations intenses en France depuis 1950 (*Soubeyroux et al., 2015*). Pour l'extrême inverse, l'absence, ou le déficit, de pluie ne montre pas d'évolutions régionales claires depuis les années 1950 sur l'Europe (*Zolina et al., 2013*). En France, *Vidal et al. (2012)* estiment que toutes les caractéristiques spatio-temporelles des épisodes de sécheresse devraient augmenter de manière importante, notamment les sécheresses agricoles. Les longues et très longues séquences sèches dévoilent des tendances variables selon les saisons et les régions françaises étudiées (*Raymond & Ullmann, 2021*). En été, la majeure partie du territoire est impacté par une augmentation du nombre de jours secs, ainsi qu'une augmentation de la durée moyenne des séquences sèches et du nombre de très longues séquences sèches.

L'évolution des précipitations, notamment de l'absence de précipitations, est l'un des facteurs principaux de l'évolution de la ressource en eau pour les cultures. Conjointement à l'évolution des températures mise en évidence en France depuis les années 1960, la modification des phénomènes

de sécheresse pluviométrique affecte le cycle de l'eau local et, à terme, les rendements agricoles (Raymond et al., 2018). Une étude de l'évolution des longs et très longs épisodes secs en France métropolitaine de 1960 à aujourd'hui, et des impacts possibles sur le bilan hydrique du blé, a été réalisée lors du stage de fin d'études d'ingénieur de Clémence Hamot, que j'ai co-encadré (Hamot, 2023). Elle a notamment montré que la hausse de la fréquence et de la durée des longues séquences sèches (correspondant au percentile 80 des longueurs de séquences sèches) au printemps sur les bassins de production du blé tendre d'hiver a eu un effet retardé sur la hausse du nombre de jours sous le seuil de stress hydrique du blé en été. L'intensification du manque de précipitations au printemps assèche en effet les réservoirs en eau du sol. Couplée à une hausse constante des températures qui impacte la demande évaporative, cette diminution des entrées du cycle de l'eau amène une hausse de la contrainte hydrique sur la culture en été.

1.2.3. Le cycle de l'eau impacté

L'une des problématiques majeures du réchauffement est l'impact sur la disponibilité des ressources en eau pour les écosystèmes naturels ou pour les activités humaines, particulièrement pour l'agriculture (Alcamo et al., 2007; Fitton et al., 2019). Les impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique ont été largement étudiés dans le monde, et sont variés selon les régions (Mandal et al., 2021; Piao et al., 2010; Tolentino et al., 2016). La hausse des températures altère les moyennes et extrêmes des précipitations, de l'évapotranspiration et des débits, compromettant l'hypothèse de stationnarité du cycle de l'eau (Milly et al., 2008). En Europe, beaucoup de régions montrent une baisse des débits des cours d'eau au printemps et en été, malgré des tendances de précipitations positives en juin et juillet (Stahl et al., 2010). De tels constats suggèrent que l'évapotranspiration est l'une des principales causes de variation des débits pendant la période végétative. L'augmentation importante des températures au printemps et en été entraîne la hausse de l'évapotranspiration réelle, réduisant ainsi les débits (van Lanen & Tallaksen, 2004).

Le réchauffement abrupt détecté en Europe de l'Ouest est susceptible d'impacter directement ou indirectement de nombreux écosystèmes naturels (Reid et al., 2016). Diverses conséquences de la rupture climatique à la fin des années 1980 sur les écosystèmes terrestres et aquatiques ont été mises en évidence (Kangur et al., 2020; Woolway et al., 2017). Cependant, d'autres augmentations abruptes de températures sont susceptibles de survenir avec le changement climatique (Desbruyères et al., 2021), accélérant la nécessité d'une meilleure compréhension des impacts possibles sur les écosystèmes biophysiques, et plus spécifiquement sur les éléments du cycle de l'eau.

En France, conjointement à la rupture détectée dans les températures minimales et maximales observées, une baisse significative des débits est mise en évidence de janvier à juillet, avec la variation la plus importante en juin (Brulebois et al., 2015) (Figure 7).

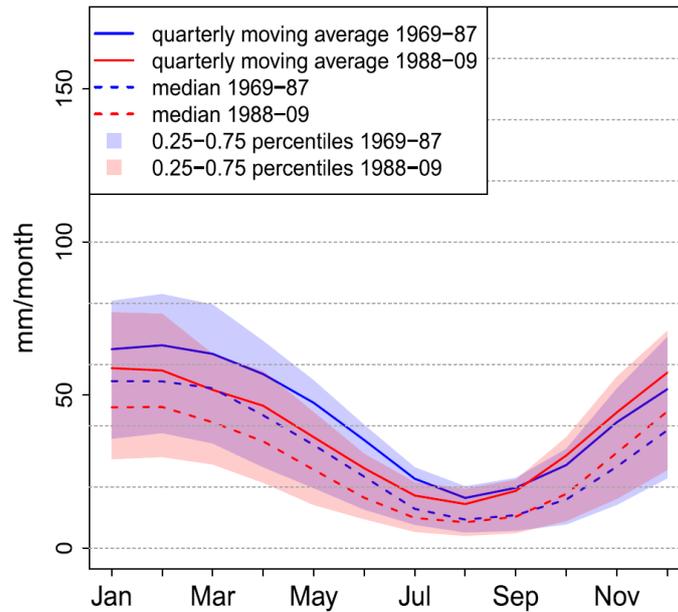


Figure 7 : Moyenne mobile trimestrielle (traits pleins) et médiane (traits pointillés) des débits pour les périodes 1969-1987 (bleu) et 1988-2009 (rouge), et variabilité correspondante avec les percentiles 0,25-0,75 (aires colorées). Source : Brulebois et al., (2015).

La pluie montre également une baisse significative durant cette période, mais dans une moindre mesure que les débits, et en août et septembre, les débits et les précipitations ont des signes opposés. Ces variations des débits suggèrent un « effet mémoire du sol » : les anomalies d'humidité du sol négatives entraînent un assèchement des sols en été, aboutissant à des débits plus bas à la fin de la saison (Boé & Habets, 2014). Dans cette étude, l'évapotranspiration est clairement identifiée comme la cause principale des changements dans le cycle hydrologique. La tendance à l'augmentation des températures sur la France constitue un facteur majeur de l'évolution des ressources en eau (Labrousse et al., 2020). Cependant, les processus en jeu restent flous.

En plus d'impacter les débits des rivières, la hausse de l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP, ou Potential EvapoTranspiration, PET en anglais), aussi appelée demande évaporative (Doorenbos & Pruitt, 1977), modifie le pédoclimat et impacte également le cycle de l'eau « agricole ». L'ÉvapoTranspiration Réelle (ETR, ou Actual EvapoTranspiration, AET en anglais), liée directement au type de couvert végétal, au stade phénologique de ce dernier et au contenu en eau du sol (Allen et al., 1998), est elle aussi modifiée, de manière variée selon les saisons et les régions. Ces modifications du cycle de l'eau local induisent des changements dans le bilan hydrique, impactant directement le développement et la croissance des cultures en augmentant la fréquence et/ou l'intensité des événements de stress hydrique (Li et al., 2009). Le bilan hydrique est un concept clé qui fait le pont entre variabilité climatique, production agricole et risques agro-climatiques associés. L'évolution de ces risques liés à la sécheresse dépend beaucoup de la vulnérabilité des cultures et du seuil de stress hydrique (Parkash & Singh, 2020).

Ce contexte plaide pour mieux appréhender comment le risque agro-climatique (sécheresse, coup de chaud, contraintes hydriques) se modifie avec le changement climatique. L'évaluation statistique du risque, combinée à des seuils admissibles, est à la base des zonages agro-climatiques et des choix

stratégiques opérés depuis plusieurs décennies au niveau des exploitations agricoles (usage des sols, choix des variétés, choix des équipements et/ou techniques culturales) (Guyot, 2013). La « mort » de la stationnarité pour ce qui concerne le cycle de l'eau (Milly et al., 2008), associée, aux échelles de la France (Brulebois et al., 2015) et de l'Europe de l'Ouest (Reid et al., 2016), à une augmentation abrupte des températures de l'air en surface à la fin des années 1980, remet en cause la validité de cette évaluation. Ces modalités de non-linéarité et de non-stationnarité du changement climatique réinterrogent donc les modes de variabilité du climat sous nos latitudes et, mécaniquement, les modifications de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque à l'échelle des territoires/bassins de production. La forte variabilité du ratio S/P constatée pour les contrats MRC – en plus du taux de sinistralité élevé – atteste de cet impact des modifications du climat sur le risque agro-climatique. À la variabilité naturelle du climat se superpose une variabilité forcée d'origine anthropique, dont il est indispensable d'étudier les effets sur l'évolution du risque. La nature non linéaire des processus impliqués dans les modifications de l'aléa climatique et le caractère multifactoriel de la vulnérabilité compliquent cependant l'analyse. Les données manquent et la crédibilité des modèles, aussi complexes soient-ils, est questionnable quant à leur utilité. Il est nécessaire d'interroger les données climatiques et assurantielles à notre disposition, afin d'identifier un possible lien pertinent et robuste permettant d'expliquer comment la variabilité climatique récente impacte le risque agro-climatique, et à terme les rendements des cultures et la sinistralité de l'assurance MRC.

1.3. Objectifs de la thèse

L'évaluation du risque agro-climatique, notamment lié à l'aléa sécheresse, constitue une préoccupation majeure du monde agricole, notamment des organismes proposant des dispositifs de gestion des risques. Dans un contexte de changement climatique global, se traduisant en France par une augmentation abrupte des températures et une modification du cycle de l'eau, la sécheresse devient l'un des aléas climatiques principaux d'altération des rendements, comme les années récentes peuvent en attester. Depuis 2018, la récurrence de fortes sécheresses à une fréquence très élevée (2018, 2019, 2020, 2022, 2023), dont certaines sont équivalentes à l'épisode de 1976, plaide pour mieux documenter l'évolution du risque agro-climatique. Les conséquences de ces risques peuvent en outre mettre les exploitants en grande difficulté financière, et engranger des conflits d'intérêt au sein du monde agricole (*Petit et al., 2023*). Les contrats d'assurance récolte MRC, permettant aux exploitants agricoles de se protéger des aléas climatiques, constituent un levier important d'adaptation aux modifications de cet aléa. Cependant, l'assurance MRC connaît une sinistralité de plus en plus importante, remettant en question son modèle. Les assureurs jouent un rôle majeur dans la prévention et l'adaptation du monde agricole aux enjeux climatiques. Une meilleure compréhension de l'évolution de l'aléa climatique et du risque agro-climatique liés au manque d'eau (sécheresse), sur les bassins de production des cultures majoritaires du pays, leur permettrait de développer des outils d'adaptation et de prévention plus performants à destination de leurs clients. Les travaux réalisés au cours de ce doctorat, sous contrat CIFRE, se situent dans cette perspective et se proposent d'apporter des éléments de réponse à la problématique suivante :

Comment et dans quelles proportions les modifications de l'aléa climatique ont-elles affecté les risques agro-climatiques liés à la sécheresse en France métropolitaine de 1960 à aujourd'hui ?

Dans ce travail, nous nous proposons de traiter cette question à l'échelle nationale mais aussi à des résolutions infra-nationales pertinentes pour les territoires agricoles. L'étude porte majoritairement sur la culture du blé tendre d'hiver, même si des résultats pour le maïs et la vigne sont présentés en discussion de ce manuscrit. Les objectifs de cette thèse chercheront plus particulièrement à :

- Quantifier l'évolution de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau suite au réchauffement abrupt de 1987/1988 ;
- Évaluer les modifications subséquentes des contraintes hydriques sur les cultures cibles en modélisant leur bilan hydrique ;
- Caractériser les modifications du risque agro-climatique lié à la sécheresse en prenant en compte la vulnérabilité des cultures étudiées.

Les travaux permettant de répondre à ces objectifs sont présentés dans ce manuscrit sous la forme de trois chapitres, s'articulant comme suit.

Le chapitre 1 expose les résultats de l'étude de l'impact de la hausse abrupte des températures en France en 1987/1988 sur les variables liées au cycle de l'eau. Les interactions entre les entrées et les sorties du bilan hydrique climatique sont explorées pour chaque régime climatique de part et d'autre de la rupture.

Le chapitre 2 porte plus particulièrement sur l'étude de la modification des contraintes hydriques sur la culture du blé tendre d'hiver suite au réchauffement abrupt. Le bilan hydrique de la culture est

modélisé et étudié pour chaque bassin de production majeur du pays, puis l'évolution de la contrainte hydrique est mise en évidence.

Le chapitre 3 propose une approche novatrice pour essayer de caractériser l'évolution du risque agro-climatique lié à la sécheresse, toujours sur la culture du blé tendre d'hiver. L'occurrence et l'intensité des événements de dépassement du seuil de stress hydrique de la culture (i.e. sa vulnérabilité) sont modélisés statistiquement de part et d'autre des augmentations rapides de température observées.

En discussion, l'évolution des contraintes hydriques sur les deux autres cultures d'intérêt – le maïs et la vigne – suite au réchauffement abrupt de 1987/1988 est présentée. Là encore, l'étude est faite aux échelles nationale et infra-nationale en divisant le territoire métropolitain français en bassins de production principaux pour chaque culture.

Une conclusion termine ce manuscrit, résumant les principaux résultats et identifiant les perspectives envisageables à ces recherches.

Méthodologie générale

Liminaire : stratégie méthodologique déployée dans la thèse

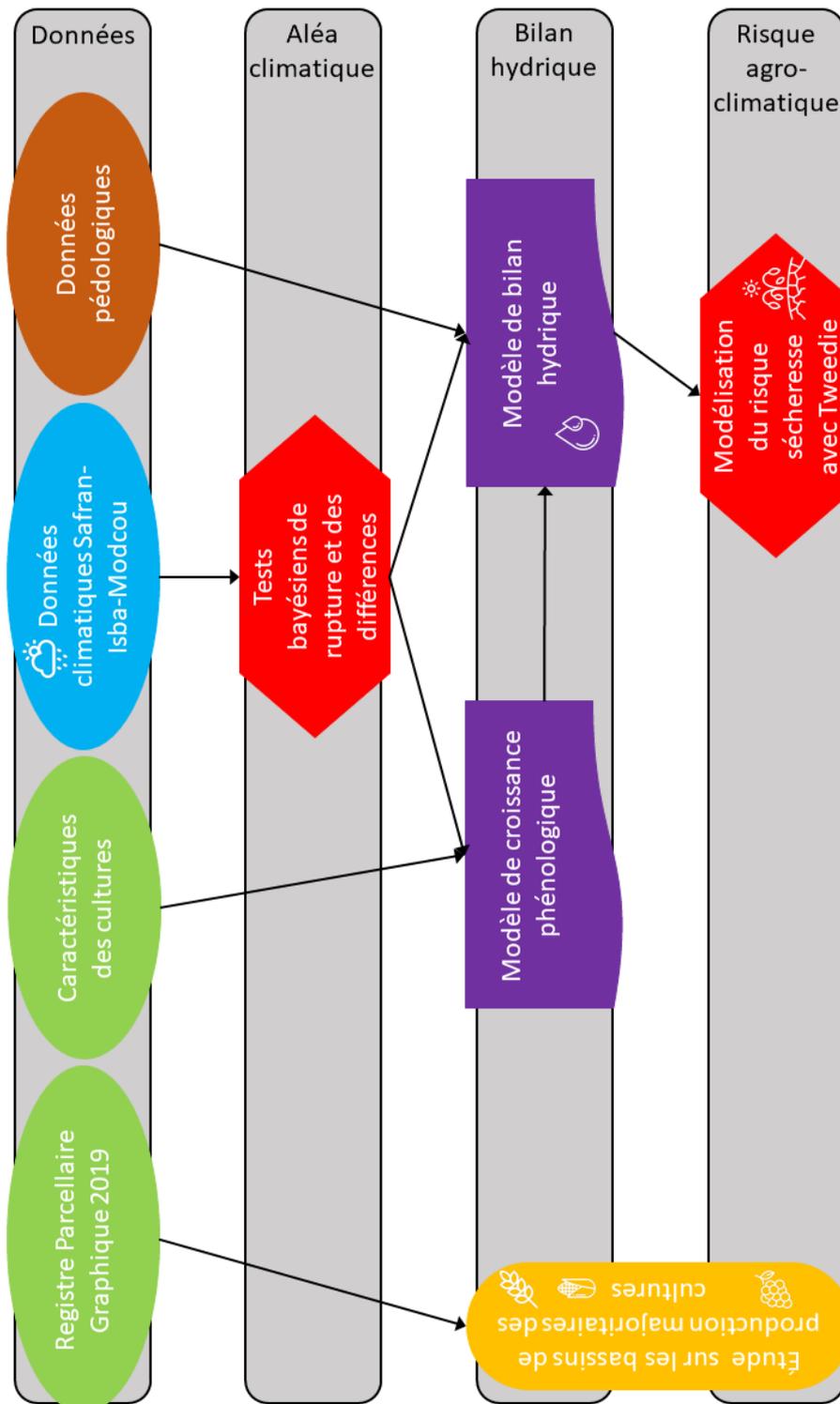


Figure 8 : Diagramme synthétisant la méthodologie de la thèse.

La démarche déployée dans le cadre de la thèse s'inscrit dans une approche progressive décrite à la Figure 8. Les modifications structurelles du risque agro-climatique lié à la sécheresse ont été quantifiées en modélisant statistiquement les distributions d'un indice de stress hydrique développé dans les travaux. Celui-ci est tiré de la modélisation du bilan hydrique couplée à celle de la croissance des cultures d'intérêt de la thèse, ce qui permet de prendre en compte la vulnérabilité des espèces végétales considérées dans l'analyse du risque. Les données climatiques mobilisées dans le cadre de la modélisation sont des données climatiques réanalysées à partir d'observations météorologiques. Elles sont également étudiées statistiquement afin d'évaluer les modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau. La caractérisation des modifications du risque agro-climatique est réalisée sur les bassins de production majoritaires de chaque culture d'intérêt, délimités en utilisant à la fois le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2019 et l'expertise de l'entreprise partenaire de la CIFRE.

2.1. Étude de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau

2.1.1. La base de données Safran-Isba-Modcou (SIM)

2.1.1.1. La chaîne SIM

La base de données climatiques utilisée dans ce travail provient du modèle Safran-Isba-Modcou (SIM) développé par Météo France (*Habets et al., 2008; Soubeyroux et al., 2008*). Ici, on utilise la version SIM2 actualisée du modèle, décrite dans *Le Moigne et al. (2020)*. Cette chaîne de réanalyse d'une résolution de 8km (Figure 9) combine le système d'analyse météorologique Safran (*Durand et al., 1993*), le modèle de surface Isba (*Noilhan & Planton, 1989*) et le modèle hydrogéologique Modcou (*Ledoux et al., 1989*).

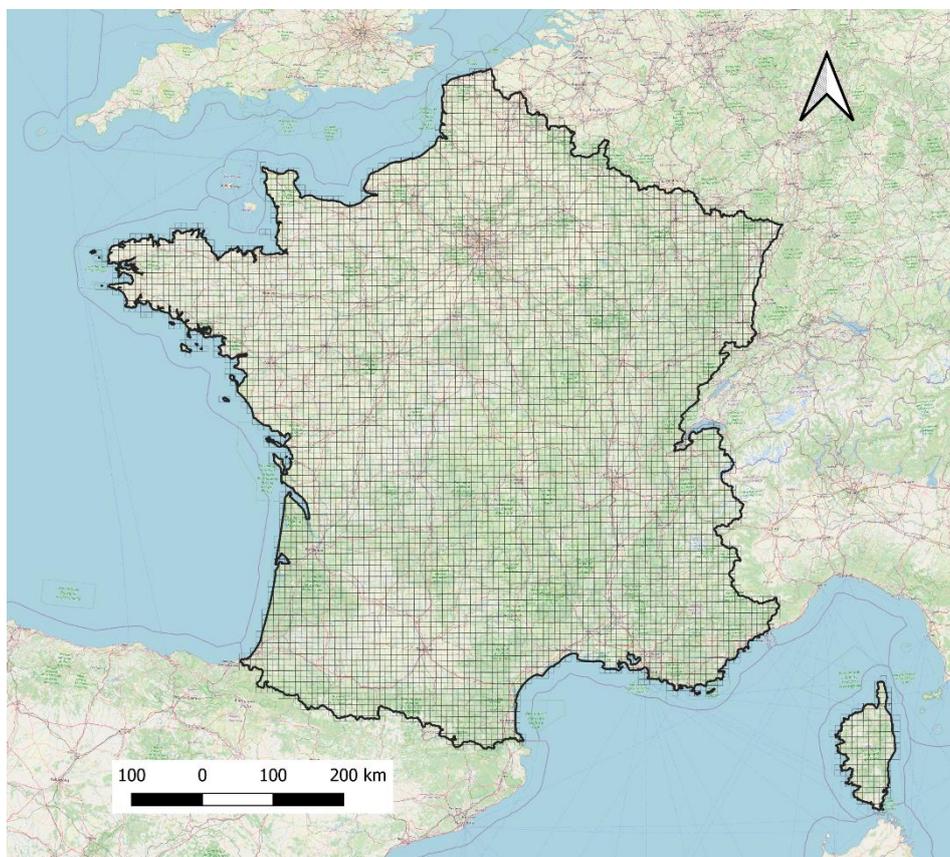


Figure 9 : Carte des points de grille Safran couvrant la France métropolitaine.

Le système d'analyse du forçage atmosphérique Safran est basé sur une méthode d'interpolation verticale robuste des principaux paramètres météorologiques (*Durand et al., 1993*). Le territoire français est divisé en plus de 600 zones climatiquement homogènes, prenant en compte explicitement le paramètre altitudinal. Ce modèle repose à la fois sur le réseau d'observations des stations météorologiques de Météo France et l'analyse de modèles atmosphériques (Arpège ou celui du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme CEPMMT). Les termes de rayonnement solaire infrarouge et visible sont estimés en utilisant un modèle de transfert radiatif. Un total de huit paramètres météorologiques sont analysés au pas de temps horaire sur plus de 9000 points de grille

couvrant le territoire de France métropolitaine (Figure 9) : la vitesse du vent à 10m, la température de l'air à 2m, l'humidité relative à 2m, la nébulosité, le rayonnement solaire infrarouge et visible, les précipitations solides et liquides (Soubeyrou *et al.*, 2008). L'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP) est également calculée à partir des données de Safran pour chaque maille en utilisant la formule de Penmann Monteith (Allen *et al.*, 1998). Cela permet d'obtenir une information spatiale continue et uniforme sur tout le territoire, en temps réel et différé. La validation du module Safran confirme la pertinence de l'analyse météorologique, particulièrement pour les champs de précipitations et températures (Quintana-Seguí *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2010).

Le modèle de surface Isba utilisé dans SIM2 est multicouches (Isba diffusion) et résout explicitement les lois de Fourier et Darcy dans tous le sol (Boone *et al.*, 2000; Decharme *et al.*, 2011). Les paramètres de couvert végétal et de sol proviennent de la base de données Ecoclimap, qui couvre la France à une résolution de 1km (Masson *et al.*, 2003). En ce qui concerne le couvert végétal, Isba intègre un cycle végétatif moyen (celui de l'année 2005) afin de prendre en considération l'impact de l'évolution de la phénologie des plantes sur les échanges hydriques entre le sol, la plante et l'atmosphère (Decharme *et al.*, 2016). Dans le cadre de la chaîne SIM, Isba calcule le bilan d'énergie de surface à une résolution de 8km, tandis que le ruissellement de surface et le drainage de sous-maille sont estimés en utilisant Topmodel (Beven & Kirkby, 1979).

Les transferts hydrologiques sont simulés par le modèle hydrogéologique Modcou en utilisant le ruissellement de surface et l'infiltration d'Isba (Ledoux *et al.*, 1989). Dans la chaîne SIM, le débit est calculé au pas de temps trihoraire, et l'évolution du niveau des nappes phréatiques au pas de temps quotidien. Dans cette étude, les sorties du modèle Modcou ne seront pas utilisées.

La validation de la chaîne SIM montre que le modèle est plutôt robuste dans l'espace et dans le temps, et donne une bonne estimation des flux d'eau (Habets *et al.*, 2008, 1999). La comparaison entre les débits observés et simulés en France présente une erreur de moins de 4% à l'échelle annuelle. Il en est de même pour les flux évaporatifs. Le modèle SIM est capable de représenter convenablement les composantes locales principales du climat impactant le bilan hydrique et la dynamique de ruissellement.

Le jeu de données de la chaîne SIM commence au 1^{er} août 1958 et est mise à jour périodiquement jusqu'à aujourd'hui. Dans ce travail, la période du 1^{er} janvier 1959 au 31 décembre 2021 est sélectionnée. Cela offre une profondeur temporelle d'un peu plus de 60 ans, permettant de distinguer de part et d'autre du réchauffement abrupt des températures de l'air à 2m de 1987/1988 deux sous-périodes d'une trentaine d'années, délimitant deux régimes climatiques. Un troisième régime climatique est également défini dans certaines parties de ce travail après le nouveau réchauffement abrupt de 2014/2015.

2.1.1.2. Les variables climatiques du cycle de l'eau

Dans ce travail, trois variables climatiques tirées du modèle Safran seront étudiées plus particulièrement : les températures minimales et maximales (Tmin et Tmax) à 2m et les précipitations liquides (PRELIQ). Trois variables issues du modèle Isba seront aussi considérées, reliant le climat à la végétation et au cycle de l'eau : l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP), l'ÉvapoTranspiration Réelle (ETR) et l'indice d'humidité des sols (Soil Water Index en anglais, SWI). Les variables au pas de temps quotidien sont agrégées au pas de temps mensuel, saisonnier ou annuel selon les problématiques

étudiées. Elles sont utilisées pour calculer différents types d'indices donnant des informations sur les effets du réchauffement du climat sur les composants du cycle de l'eau local, et pour modéliser le bilan hydrique des cultures d'intérêt.

De toutes les variables reliées au cycle de l'eau, pendant la période végétative, l'évapotranspiration joue un rôle majeur. Les processus d'évaporation du sol et de transpiration des plantes sont complexes car issus de nombreuses interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère. Pour étudier les effets de la hausse des températures sur l'évolution de la demande évaporative, différents indices biophysiques liés à l'évapotranspiration peuvent être calculés. D'abord, l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP) est définie par l'organisation mondiale de l'agriculture et de l'alimentation (Food and Agriculture Organisation en anglais, FAO) comme « la quantité d'évapotranspiration d'une surface extensive couverte de gazon vert de hauteur uniforme de 8 à 15cm, en croissance active, couvrant uniformément le sol et ayant un apport en eau suffisant » (Doorenbos & Pruitt, 1977). Cette variable est considérée comme une mesure climatique représentant la demande évaporative de l'atmosphère, affectée uniquement par les paramètres climatiques (Allen et al., 1998).

Le couvert végétal reproduit des configurations structurelles et fonctionnelles variées qui modulent fortement la quantité d'eau nécessaire pour compenser entièrement celle évapotranspirée. L'ÉvapoTranspiration Maximale (ETM) est définie comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal spécifique sous des conditions environnementales et un remplissage en eau du sol optimaux (Allen et al., 1998).

Pour les plantes cultivées en champ, les pratiques agronomiques et les conditions environnementales peuvent différer des conditions standards, amenant à une ÉvapoTranspiration Réelle (ETR) qui peut varier par rapport à l'ETM. L'ETR est calculée en utilisant un coefficient de stress hydrique K_s et un coefficient cultural K_c (Allen et al., 1998).

Dans la chaîne SIM, l'ETP et l'ETR sont modélisées dans le modèle de surface Isba en utilisant des méthodes et des équations décrites dans Noilhan & Planton (1989) et Noilhan & Mahfouf (1996). Comme décrit précédemment, Isba prend en compte l'usage des sols et les caractéristiques de couvert végétal disponibles dans la base de données Ecoclimap (Masson et al., 2003). Le modèle de surface est forcé par le rayonnement solaire, les précipitations, la pression atmosphérique, la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent de Safran.

En plus de l'ETP et l'ETR, deux indices décrivant l'évolution du cycle de l'eau local sont étudiés. La différence $ETP - ETR$ informe sur la contrainte hydrique exercée sur le couvert végétal. Lorsque cette différence est proche de 0, l'évapotranspiration réelle (i.e. sous des conditions climatiques et environnementales réelles) se rapproche de l'évapotranspiration potentielle (i.e. sous des conditions de remplissage en eau du sol optimales). Le couvert végétal est donc capable de répondre à la demande évaporative et ne souffre pas de manque d'eau. À l'inverse, une hausse de l'indice $ETP - ETR$ suggère une hausse de la contrainte hydrique. La difficulté à répondre à la demande évaporative révèle un manque d'eau dans les réservoirs du sol, impactant la croissance et le développement des plantes et pouvant mener à de sévères conséquences. Le second indice calculé est le ratio ETR/ETP , qui informe sur l'efficacité du processus d'évapotranspiration. Plus ce ratio est proche de 1, meilleur est l'état de remplissage en eau du sol, et plus la plante est capable de répondre à la demande évaporative. L'étude de l'évolution de ces deux indices permet de déterminer l'impact de la hausse des températures sur l'évolution du cycle de l'eau local et sur la contrainte hydrique sur le couvert végétal.

2.1.2. La détection des ruptures avec les statistiques bayésiennes

Le changement climatique en France peut être appréhendé de différentes manières. La non-stationnarité de l'aléa climatique pouvant avoir des impacts inattendus mais sévères sur les écosystèmes, l'évaluation des conséquences de la rupture de stationnarité dans les températures de l'air en 1987/1988 est indispensable. Les effets du réchauffement abrupt sur les composantes du cycle de l'eau peuvent être mesurés en utilisant des méthodes de détection de points de rupture et de comparaison de moyennes tirés des statistiques bayésiennes.

Les séries temporelles des variables d'intérêt, liées au cycle de l'eau, sont agrégées aux pas de temps mensuel, saisonnier (hiver : Décembre, Janvier, Février (DJF) ; printemps : Mars, Avril, Mai (MAM) ; été : Juin, Juillet, Août (JJA) ; automne : Septembre, Octobre, Novembre (SON)) et annuel. Des tests robustes tels que des techniques de détection de points de rupture et de comparaison de distribution sont utilisés pour évaluer les changements dans les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et réelle avec le réchauffement abrupt des températures en France.

Dans un premier temps, une méthode bayésienne de détection de points de rupture avec un calcul de moyennes postérieures est appliquée aux séries temporelles de chaque variable en utilisant un package R dédié (*Barry & Hartigan, 1993; Erdman & Emerson, 2008; R Core Team, 2021*). Cette méthode, pertinente pour l'analyse de séries temporelles climatiques, a été appliquée avec succès à des enregistrements de températures et de précipitations de stations météorologiques (*Brulebois et al., 2015*). Sa capacité à simultanément détecter des points de rupture et calculer les moyennes postérieures est utile pour identifier des événements extrêmes isolés, comme par exemple la sécheresse extrême de 1976, par rapport aux tendances de long terme du changement climatique.

Ensuite, un test bayésien robuste de comparaison des moyennes est appliqué aux séries temporelles de précipitation liquides, d'ETP et d'ETR avec le même package R pour les statistiques bayésiennes, pour comparer les moyennes des périodes avant et après les points de rupture qui auront été détectés à l'étape précédente (*Kruschke, 2013*). Ce test des différences est basé sur la distribution des probabilités postérieures bayésiennes, permettant d'évaluer si la probabilité d'une différence est suffisamment élevée pour être significative. En utilisant les valeurs de l'intervalle de confiance de haute densité à 95% (High Density Interval en anglais, HDI) pour définir un intervalle de confiance, cette méthode bayésienne donne des informations sur la magnitude et la significativité de la différence entre les deux distributions. Ces analyses statistiques de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau sont effectuées sur les plus de 9000 points de grille couvrant le territoire métropolitain français.

2.2. Modélisation et étude du bilan hydrique

2.2.1. Les bassins de production agricoles

Afin d'étudier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau pour les cultures, le territoire métropolitain est délimité en bassins de production majoritaires pour les trois cultures d'intérêt. La couche vectorielle de la grille Safran d'une résolution de 8km (Figure 9) est croisée sur QGIS avec la couche vectorielle du Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2019 (*Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019*). Pour le blé tendre d'hiver et le maïs, on sélectionne les points de grille Safran pour lesquels la surface recouverte par des parcelles de ces cultures est supérieure à 10% de la surface totale du point de grille (Figure 10). Pour la vigne, les points de grille dont la surface est recouverte d'au moins 1% par des parcelles de vigne sont retenus. Ces seuils de pourcentage de couverture de surface permettent de délimiter de manière satisfaisante les principaux bassins de production des trois cultures étudiées sur le pays. Le seuil de 1% a été préféré pour la vigne par rapport au seuil de 10% utilisé pour le blé et le maïs car avec un seuil plus élevé, certains vignobles français emblématiques (Bourgogne, Alsace, Champagne, ...) n'apparaissent pas.

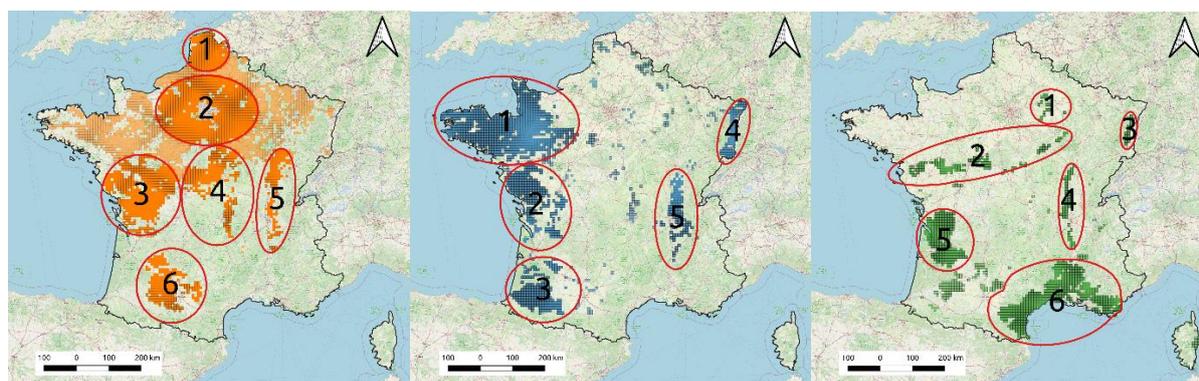


Figure 10 : Cartes des bassins de production majoritaires des cultures d'intérêt. Les points de grille colorés en orange et bleu sont les points de grille pour lesquels la surface est recouverte d'au moins 10% par des parcelles respectivement de blé tendre d'hiver et de maïs, les points de grille colorés en vert sont ceux pour lesquels la surface est recouverte d'au moins 1% par des parcelles de vigne, selon le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2019 (*Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019*). Les contours rouges délimitent les bassins de production majoritaires pour chaque culture.

Cette sélection de points de grille pour chaque culture permet de délimiter les bassins de production majoritaires, correspondant aux bassins de production géographiques français. Les limites de ces bassins de production du blé, du maïs et de la vigne ont été validées par les experts sinistres de Groupama spécialisés dans les sinistres climatiques sur récolte, via l'élaboration et la diffusion d'un questionnaire (Annexe 5). En plus de permettre aux experts sinistres sur récolte de valider le découpage des bassins de production, ce dernier a permis d'obtenir des informations sur l'itinéraire technique moyen de la région (irrigation, précocité des variétés utilisées, pratiques de réduction des intrants, diffusion de l'agriculture biologique, rotations culturales, ...) et sur les évènements

climatiques marquants dans l’historique de la région, notamment les sécheresses agricoles ayant affecté les rendements (Annexe 5).

Pour le blé, les bassins de production retenus sont les suivants : 1. Nord-Pas-de-Calais, 2. Bassin Parisien, 3. Poitou-Charentes, 4. Centre, 5. Bourgogne/Rhône-Alpes, 6. Bassin Aquitain. Pour le maïs, les bassins de production sont ainsi nommés : 1. Bretagne, 2. Pays de la Loire, 3. Bassin Aquitain, 4. Plaine d’Alsace, 5. Vallée du Rhône. Et enfin pour la vigne, les bassins de production délimités sont les suivants : 1. Champagne, 2. Vallée de la Loire, 3. Alsace, 4. Bourgogne, 5. Bordelais, 6. Région méditerranéenne. L’étude de ces différents bassins de production agronomiques permet d’évaluer l’impact d’un gradient de modifications de l’aléa climatique lié au cycle de l’eau sur la ressource en eau des cultures.

2.2.2. Les données agronomiques et pédologiques

En plus des données climatiques liées au cycle de l’eau décrites précédemment, la modélisation du bilan hydrique nécessite des données de réserve utile en eau du sol et des données d’ÉvapoTranspiration Maximale (ETM) prenant en compte la phénologie des cultures étudiées.

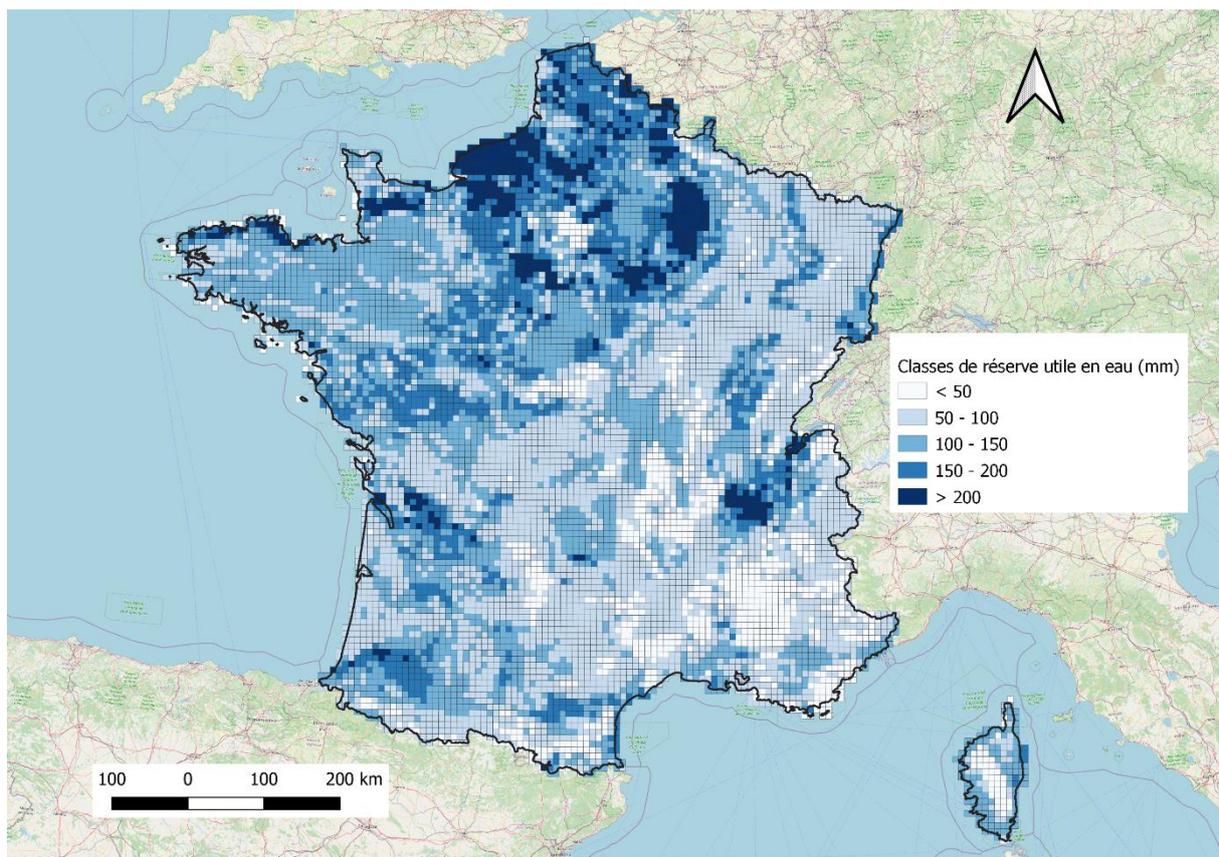


Figure 11 : Carte des classes de réserve utile en eau du sol pondérées et moyennées par point de grille Safran. Les données brutes des classes de réserve utile en eau du sol sont tirées de la base de données de l’initiative GISSol (*Groupement d’intérêt scientifique sur les sols (France), 2011*).

Les données de réserve utile sont récupérées dans la base de données de l'initiative GISSol (*Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011*). Chaque médiane de classe de réserve utile est pondérée par sa surface dans chaque point de grille Safran, puis moyennée avec les autres classes présentes dans le point de grille (Figure 11).

L'ETM, comme expliqué précédemment, correspond à la quantité d'eau en millimètres qu'un couvert végétal spécifique peut évapotranspirer sous des conditions environnementales et un remplissage en eau du sol optimaux (*Allen et al., 1998*). Elle peut être calculée en croisant l'ETP quotidienne avec un coefficient cultural quotidien, noté K_c , dépendant du stade phénologique de la culture.

Afin de déterminer la date de début de chaque stade phénologique pour chaque cycle cultural, la croissance et le développement de chaque culture d'intérêt doivent être modélisés. Dans ce travail de thèse, les principaux résultats présentés concernent la culture du blé tendre d'hiver. Pour cette culture, un modèle de croissance en degrés-jours simple (Growing Degree Days en anglais, GDD) est développé sur le logiciel R, en utilisant les besoins en degrés-jours moyens de la culture pour atteindre chaque stade phénologique (*Gate, 1995*). Ce modèle GDD calcule, pour chaque année et chaque point de la grille Safran, les degrés-jours sur une base de 0°C , c'est-à-dire qu'il somme les valeurs de températures moyennes quotidiennes au-dessus de 0°C jour après jour. La date de semis est fixée au 1^{er} novembre de chaque année, puis à chaque fois que le besoin en degrés-jours pour le stade phénologique suivant est atteint, la date correspondante est retenue, et elle est définie comme la date de début de ce stade. Le coefficient cultural K_c correspondant au stade phénologique identifié est ensuite attribué à chaque jour que dure ce stade phénologique. Lorsque la maturité de la plante est atteinte, la plante est considérée comme récoltée, et le sol reste nu jusqu'au prochain semis ($K_c = 0.2$). Ainsi, pour chaque point de grille Safran, le modèle GDD fournit une série temporelle de K_c de même longueur que celle des variables climatiques liées au cycle de l'eau. Ces séries temporelles de K_c sont croisées avec les séries d'ETP du point de grille correspondant, afin d'obtenir les valeurs d'ÉvapoTranspiration Maximale (ETM) nécessaires à la modélisation du bilan hydrique du blé.

Quelques résultats concernant le maïs sont aussi présentés en discussion de ce manuscrit. Pour cette culture, les dates d'apparition de chaque stade phénologique de la culture sont tirées du modèle STICS (*Brisson et al., 2009; Maury et al., 2023*). Une collaboration avec Renan Le Roux, de l'unité AgroClim de l'INRAE d'Avignon, nous a permis d'obtenir pour chaque point de grille Safran et chaque année entre 1959 et 2020 les dates d'apparition de chaque stade phénologique d'intérêt du maïs, à partir d'une date de semis fixée au 10 avril. 3 variétés de maïs sont étudiées : une variété de cycle court (Meribel), une variété de cycle moyen (Furio), et une variété de cycle long (Cecilia). De même que pour le blé, les coefficients culturaux correspondants à chaque stade phénologique du maïs sont ensuite affectés à chaque date de début du stade phénologique, puis une interpolation linéaire permet d'obtenir des valeurs de K_c quotidiennes sur toute la série. Là encore, une fois la maturité du maïs atteinte, la culture est récoltée et le K_c correspondant au sol nu (0.2) est affecté aux jours restants.

Cette modélisation de la croissance et du développement utilisant le modèle STICS via la collaboration avec l'unité AgroClim a aussi été réalisée pour le blé tendre d'hiver, ce qui nous a permis de modéliser le bilan hydrique pour cette culture avec une deuxième méthodologie. La comparaison entre le bilan hydrique modélisé en utilisant le modèle de croissance GDD et celui modélisé en utilisant STICS pour la culture du blé est présentée dans le troisième chapitre de ce manuscrit.

2.2.3. Modélisation du bilan hydrique du blé et du maïs

Pour les cultures du blé et du maïs, un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs a été utilisé. Ce modèle propose un bon compromis entre une approche trop simpliste, qui serait trop éloignée de la réalité, et trop sophistiquée, pour laquelle la paramétrisation du modèle serait trop lourde à mettre en place au regard des objectifs poursuivis dans cette thèse. Le modèle permet, pour une culture d'intérêt, de calculer le bilan hydrique quotidiennement en utilisant les précipitations liquides, l'ETM, la taille des réservoirs en eau utile du sol superficiel et profond (Jacquart & Choisnel, 1995). Il est codé en langage R. Ce type de modèle de bilan hydrique ne prenant pas en compte la résolution explicite d'équations de bilan énergétique de surface, il accepte, en entrée, l'ETM calculée à partir de l'ETP, comme décrit précédemment. Il montre de bonnes performances en comparaison à un modèle de bilan hydrique couplé de type Earth, un modèle de bilan énergétique de surface et de bilan hydrique (Choisnel, 1985). Le modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs présente une estimation pertinente de la régulation de l'évapotranspiration réelle (ETR), particulièrement pendant l'alternance de séquences sèches et humides.

Le modèle calcule le volume d'eau stocké dans les réservoirs d'eau du sol pour une texture de sol homogène. Ce volume d'eau est noté $R(t)$, il varie avec le temps et est calculé ainsi :

$$R(t) = \begin{cases} RU & \text{if } R(t-1) + dW > RU \\ R(t-1) + dW & \text{else} \end{cases} \quad (1),$$

$$\text{avec } \frac{dW}{dt} = P - ET - D \quad (2)$$

où dW est la variation du contenu en eau du sol entre deux jours successifs dt , résultat d'un équilibre entre les entrées d'eau avec les précipitations P , les sorties d'eau avec l'évapotranspiration ET et le drainage D . La limite inférieure de $R(t)$ est 0, la limite supérieure est la valeur de réserve utile RU . Cette dernière est constante et dépend des caractéristiques pédologiques de chaque zone : dans ce travail, une valeur de RU est attribuée à chaque point de grille (Figure 11).

Le volume d'eau stocké $R(t)$ est géré en décomposant le contenu en eau du sol en deux réservoirs : le réservoir superficiel $R1$ alimenté par les précipitations liquides, et se vidant en cas d'excès dans le réservoir profond $R2$. Cette décomposition permet de séparer deux types de régulation de l'ETR :

- $ETR = ETM$ lorsque l'eau évapotranspirée provient du réservoir superficiel ;
- $ETR < ETM$ et est régulée lorsque l'eau évapotranspirée vient partiellement ou totalement du réservoir profond.

L'utilisation de deux réservoirs séparés offre une représentation précise de la dépendance de l'évapotranspiration par rapport au contenu en eau du sol près de la surface (Mahrt & Pan, 1984), et permet de mieux prendre en compte la succession de séquences sèches et humides et son impact sur la disponibilité en eau, en particulier pendant le printemps et l'été. Dans un modèle de bilan hydrique simplifié, les dimensions du réservoir de surface sont fixées comme une fraction constante de la réserve utile en eau. Le modèle de bilan hydrique précédent, de type Earth, plus complexe, développé par Choisnel (1985) et utilisant des dimensions variables pour le réservoir de surface, a été utilisé comme une référence pour valider la calibration des deux réservoirs du modèle de bilan hydrique simplifié de Jacquart & Choisnel (1995). Dans le modèle Earth, le ratio ETR/ETM chute significativement lorsque le ratio $R(t)/RU$ descend en-dessous de 60% (Choisnel, 1985). Ces résultats amènent à fixer la

partition des réservoirs superficiel $R1$ et profond $R2$ dans le modèle de *Jacquart & Choisnel (1995)* à respectivement 40% et 60% de la réserve utile en eau du sol totale RU .

Les volumes d'eau quotidiens des deux réservoirs sont calculés de manière itérative, en fonction de l'ETR, des précipitations liquides et du contenu en eau du sol à la fin du jour précédent. Les contributions des réservoirs superficiel et profond à l'ETR sont calculées séparément et sont fonction de l'ETM (voir *Jacquart & Choisnel, 1995*) pour plus de détails).

La version du modèle de bilan hydrique à deux réservoirs utilisée dans ce travail pour calculer le bilan hydrique quotidien nécessite pour chaque point de grille Safran les entrées suivantes :

- Les précipitations liquides quotidiennes (PRELIQ) ;
- L'ÉvapoTranspiration Maximale (ETM) quotidienne ;
- La réserve utile en eau du réservoir superficiel ($R1$) ;
- La réserve utile en eau du réservoir profond ($R2$).

Le bilan hydrique quotidien est modélisé de 1959 à 2021 (2020 pour le maïs), la première année étant considérée comme l'initialisation du modèle, i.e. l'équilibrage des réservoirs, et n'étant donc pas prise en compte dans l'analyse des résultats. Notons qu'au 1^{er} janvier 1959, les réservoirs sont considérés pleins.

Le bilan hydrique se définit comme la proportion de la réserve utile en eau du sol remplie avec de l'eau. Les sorties du modèle sont utilisées pour calculer le bilan hydrique comme suit :

$$REW = \frac{R(t)}{RU} \text{ with } R(t) = R1(t) + R2(t) \quad (3)$$

avec REW (Relative Extractible Water en anglais) la fraction d'eau extractible du sol en %, i.e. le bilan hydrique, $R1(t)$ et $R2(t)$ respectivement la quantité d'eau dans les réservoirs superficiel et profond et RU la capacité totale des réservoirs en eau du sol. Ce calcul permet d'accéder au cycle annuel du bilan hydrique sur chaque point de grille, et en continu pour chaque année de 1960 à 2021 (2020 pour le maïs). C'est à partir de ces résultats que l'impact des hausses abruptes de température sur la ressource en eau pour les cultures d'intérêt a été étudié.

2.2.4. Modélisation du bilan hydrique de la vigne

La vigne étant une culture pérenne, l'estimation des échanges hydriques entre les parcelles de vigne et l'atmosphère ne peut se faire avec le modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs décrit précédemment, dont les simulations sont basées sur l'évolution de la demande évaporative de l'atmosphère et un coefficient cultural. Qui plus est, la vigne est une culture spécifique car elle ne couvre pas complètement le sol de la parcelle. D'autres types de modèles, où l'ETR est partitionné en composantes de la plante et du sol, permettent d'estimer la conductance de la couverture végétale et du sol puis la transpiration de la vigne (*Riou et al., 1994*). Mais aucun de ces modèles ne simule les effets de rétroaction de l'assèchement du sol sur la transpiration par le contrôle stomatique, les rendant inadaptés à la modélisation du bilan hydrique de la vigne en situation de stress hydrique.

Lebon et al. (2003) ont proposé une modélisation du bilan hydrique basée sur la simulation de la croissance de la vigne par un modèle de croissance en degrés-jours. Celle-ci intègre en outre les formalismes de modèles permettant de calculer séparément l'évaporation de la plante et la transpiration du sol à partir du rayonnement absorbé par la vigne, car cette dernière constitue un

couvert discontinu (Riou et al., 1994, 1989). Dans ce modèle de bilan hydrique, les variations de l'évaporation du sol après des épisodes de pluie sont pris en compte par l'utilisation d'un autre formalisme qui prend en compte le dessèchement progressif du sol pour limiter l'évaporation (Brisson & Perrier, 1991).

La modélisation du bilan hydrique, via cette approche d'une complexité intermédiaire, montre des résultats satisfaisants pour la vigne. La flexibilité du modèle est suffisante pour être appliquée à des vignobles avec des structures de couvert et des densités de plantation différentes (Lebon et al., 2003). Le modèle présente une bonne estimation de la fraction d'eau du sol transpirable (Fraction of Transpirable Soil Water en anglais, FTSW), malgré une surestimation du volume d'eau dans le sol à la fin de la saison de croissance.

Dans les travaux présentés ici, le modèle de bilan hydrique utilisé est adapté de Lebon et al. (2003) ; il est couplé à un modèle de croissance de la vigne en degrés-jours et à un modèle calculant la proportion du rayonnement solaire incident intercepté par la vigne (Riou et al., 1989). Il est codé en langage R (Bois, 2007). La chaîne de modélisation, les entrées et sorties de chaque modèle sont présentées dans la Figure 12. Les détails sur le fonctionnement de chaque modèle sont présentés dans le rapport de stage de fin d'études d'ingénieur de Maël Aubry, que j'ai co-encadré (Aubry, 2022).

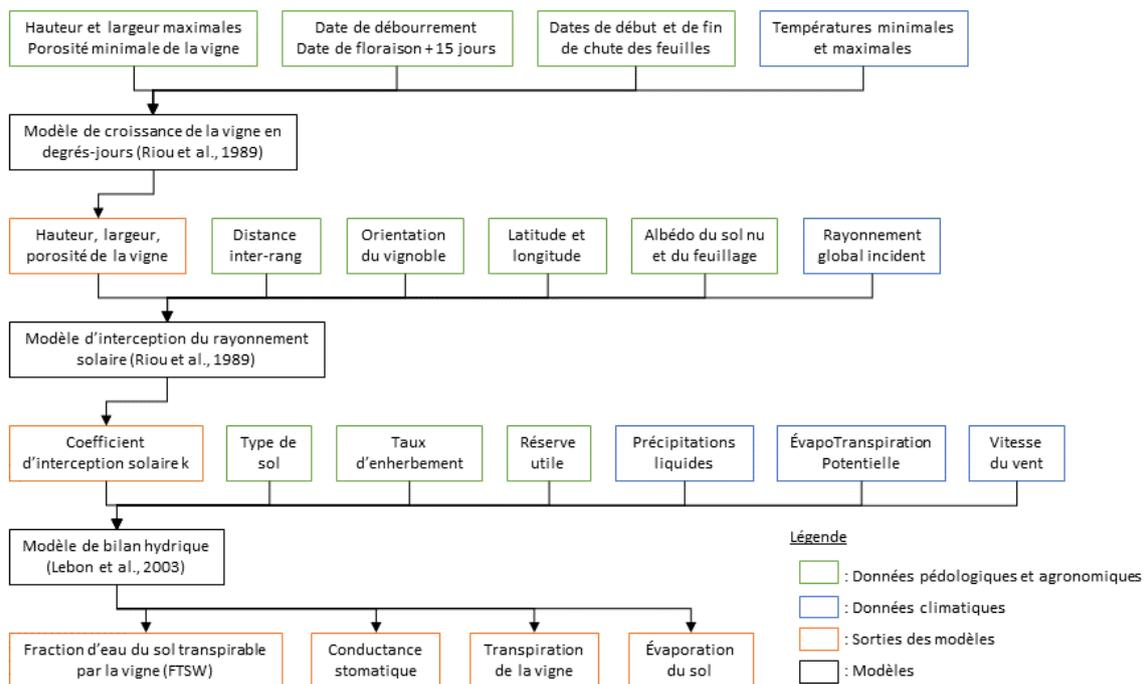


Figure 12 : Schéma de fonctionnement de la chaîne de modélisation du bilan hydrique de la vigne. D'après (Aubry, 2022).

Les données climatiques utilisées en entrée du modèle de bilan hydrique de la vigne dans cette étude sont les mêmes que celles utilisées dans la modélisation du bilan hydrique du blé ou du maïs, provenant de la base de données Safran (Vidal et al., 2010). Les données de réserve utile sont celles

issues de la base de données GISSol (*Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011*). Les autres données pédologiques et les caractéristiques agronomiques sont issues de la littérature et d'entretiens avec les professionnels de la filière (*Aubry, 2022*). Dans ce travail, les paramètres liés aux pratiques culturales sont définis pour la région viticole bourguignonne, les données étant soit disponibles pour le cépage du Pinot Noir soit généralisées pour tous cépages confondus. L'objectif de l'étude étant d'évaluer l'impact d'un réchauffement abrupt des températures sur la contrainte hydrique de la culture d'intérêt, les résultats présentés dans ce manuscrit sont issus d'une modélisation avec la même paramétrisation que celle utilisée dans le stage. Ainsi, la comparaison entre tous les bassins de production viticoles de France pourra se faire toutes choses étant égales par ailleurs, en regardant uniquement l'impact du climat sur la ressource en eau de la vigne.

2.3. Étude du risque de sécheresse et modélisation statistique

2.3.1. Définition de la vulnérabilité des cultures

L'étude du risque agro-climatique lié à la ressource en eau nécessite la définition de la vulnérabilité des cultures étudiées. Comme expliqué en introduction, cette vulnérabilité peut varier avec l'évolution du climat, via des phénomènes d'adaptation ou d'acclimatation des espèces végétales. La prise en compte de cette variabilité de la vulnérabilité peut se faire en utilisant des modèles de cultures élaborés tels que STICS (*Brisson et al., 2009*). Cependant, dans le cadre des travaux présentés ici, un niveau de complexité intermédiaire a été choisi, avec l'utilisation de modèles de bilan hydrique simplifiés et robustes. La prise en compte de la phénologie des cultures et d'un seuil de vulnérabilité au stress hydrique fixe permet de définir la vulnérabilité de la culture, et de développer un indice de stress hydrique similaire à ceux utilisés dans le domaine forestier (*Granier et al., 1999*). Cette méthodologie permet d'évaluer de manière simple et pertinente les modifications du risque agro-climatique en lien avec la ressource en eau suite au réchauffement abrupt des températures en France.

Lorsque le bilan hydrique – appelé fraction d'eau extractible (Relative Extractible Water, REW en anglais) dans le modèle utilisé pour le blé et le maïs ou fraction d'eau du sol transpirable (Fraction of Transpirable Soil Water, FTSW en anglais) dans le modèle utilisé pour la vigne – descend en-dessous d'un certain seuil, la culture est considérée sous contrainte hydrique. Le seuil de REW pour lequel le taux de croissance des feuilles et d'échanges de gaz commence à diverger d'une valeur de référence varie selon plusieurs facteurs, tels que la demande évaporative, la distribution des racines, la texture, ou encore la densité apparente du sol (*Sadras & Milroy, 1996*). Dans leur étude, *Meyer & Green (1980)* ont estimé que lorsque 52 à 57% de la REW est utilisée, la croissance des feuilles du blé tendre d'hiver commence à décliner. Le taux d'évapotranspiration baisse également lorsque 20 à 30% de la REW totale reste dans le sol (*Meyer & Green, 1981*). Une autre expérimentation basée sur un système de distribution de nutriments à base de substrat a estimé que la limite de la fraction d'eau extractible pour le blé est de 39.7% (*Norikane et al., 2003*). Au vu de ces résultats, nous avons choisi de considérer dans ce travail un seuil de stress hydrique fixé à 40% de la RU totale pour le blé, en-dessous duquel la culture est affectée par le stress hydrique (*Jacquart & Choisnel, 1995*). Ce seuil, nommé *REW_c* pour REW critique (critical REW en anglais), est conservé pour l'analyse du bilan hydrique du maïs, qui est comme le blé une culture annuelle.

Pour la vigne, la notion de stress hydrique est plus complexe à aborder. En effet, conjointement à la température, le stress hydrique joue un rôle majeur dans la composition des baies, et donc des vins, au niveau de la teneur en sucres, en acides, en composés phénoliques et anthocyanes (*Celette, 2007*). Les concentrations en acide malique et en anthocyanes respectivement décroissent et croissent avec l'augmentation du déficit hydrique. La teneur en sucre des baies a tendance à croître lorsque le déficit hydrique est léger par rapport à une situation d'absence de déficit hydrique, mais lorsque le déficit hydrique devient important celle-ci diminue (*Ageorges & Terrier, 2014; Leeuwen et al., 2009; Ojeda et al., 2002*). La gestion du déficit hydrique constitue donc un levier important de gestion de la qualité des baies et du vin. De nombreuses études s'accordent pour définir quatre profils de stress hydrique, correspondants chacun à un optimum pour atteindre la composition caractéristique des baies souhaitée (*Lebon et al., 2003; Leeuwen et al., 2009; Ojeda et al., 2002; Ojeda & Saurin, 2014*) (Figure 13). Les valeurs de FTSW correspondant aux différents seuils de stress hydrique sont résumées dans le Tableau 2.

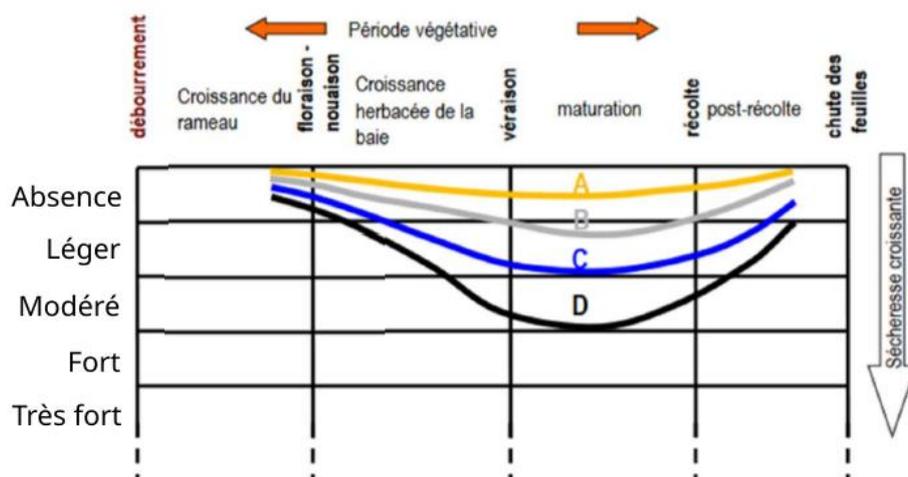


Figure 13 : Différentes stratégies d'irrigation possibles pour contrôler l'état hydrique du vignoble en fonction de la période végétative et du type de produit recherché : (A) moûts concentrés, jus de raisin, vins de table et jeunes vignobles en formation ; (B) vins blancs, vins rouges légers, fruités ; (C) vins jeunes de qualité, équilibrés mais avec prédominance du fruit sur la structure, seuils limites pour les vins blancs et (D) vins de qualité, concentrés, équilibrés et aptes pour le vieillissement. D'après Ojeda & Saurin (2014).

Tableau 2 : Seuils de déficit hydrique en fonction des différentes méthodes d'estimations. D'après Aubry (2022) ; Lebon et al. (2003) ; Leeuwen et al. (2009) ; Ojeda et al. (2002) ; Ojeda & Saurin (2014).

| Déficit hydrique | Potentiel tige (MPa) | Potentiel Feuille (MPa) | Potentiel Base (MPa) | $\delta^{13}\text{C}$ | FTSW (%) |
|------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| Absence | > -0.6 | > -0.9 | > -0.1 | < -26 | > 36 |
| Léger |]-0.9, -0.6] |]-1.1, -0.9] |]-0.3, -0.1] | [-26, -24.5[|]21 – 36] |
| Modéré |]-1.1, -0.9] |]-1.3, -1.1] |]-0.5, -0.3] | [-24.5, -23[|]7 – 21] |
| Fort |]-1.4, -1.1] |]-1.4, -1.3] |]-0.8, -0.5] | [-23, -21.5[|]1 – 7] |
| Très fort | \leq -1.4 | \leq -1.4 | \leq -0.8 | \geq -21.5 | \leq 1% |

Pour chacune des cultures traitées dans ce travail, le croisement des seuils de stress hydrique définis ci-dessus avec les valeurs de bilan hydrique quotidiennes met en évidence l'évolution de la contrainte hydrique sur chaque point de grille et pour chaque année. Pour le blé et le maïs, un état unique de stress hydrique est défini lorsque la fraction d'eau extractible (REW) passe sous 40%. Pour la vigne, différents états de stress hydrique sont définis en fonction de la sévérité de la sécheresse. Dans tous les cas, le dépassement du seuil de stress induit l'apparition d'un évènement de stress hydrique, qui peut impacter la croissance et le développement de la culture.

2.3.2. Caractérisation du risque : le modèle de Tweedie

Le croisement de la vulnérabilité des cultures – définie par le seuil de stress hydrique – et du bilan hydrique modélisé permet d'évaluer le risque agro-climatique lié à la sécheresse. Dans cette étude, l'évolution des caractéristiques des évènements de stress – i.e. fréquence et intensité – est explorée au regard des augmentations abruptes de température mises en évidence en France.

Les évènements de stress hydrique sont qualifiés par le dépassement des seuils de stress REW_c définis précédemment, pour les trois cultures d'intérêt. Pour chaque point de grille, les séries temporelles du bilan hydrique REW sont donc utilisées pour calculer le déficit en eau du sol quotidien (Soil Water Deficit en anglais, SWD) comme suit :

$$SWD(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } REW(t) \geq REW_c \\ 0.4 * RU - R(t) & \text{if } REW(t) < REW_c \end{cases} \quad (4)$$

Afin de pouvoir comparer l'évolution du risque agro-climatique sur les différents bassins de production, un indice, basé sur ces différences quotidiennes (en mm), est nécessaire pour quantifier le stress hydrique subi par une culture sur une période donnée. L'indice doit résumer à la fois la durée et l'intensité du stress. En suivant *Granier et al. (1999)*, un indice de stress hydrique Is (en mm) est proposé, cumulant le déficit en eau du sol quotidien SWD à l'échelle annuelle. Cet indice est calculé ainsi :

$$Is = \sum_{t=January1}^{t=December31} SWD(t) \quad (5)$$

Pour chacune des trois périodes étudiées (1960-1987, 1988-2014, 2015-2021) et chaque bassin de production des cultures d'intérêt, les histogrammes de ces indices de stress hydrique annuel cumulé (en mm) sont tracés.

Les valeurs d'indice de stress hydrique annuel cumulé sont continues, avec des zéros exacts lorsqu'aucun évènement de stress n'est enregistré sur un point de grille sur une année ($Is = 0$). Ainsi, elles déploient une combinaison de distributions discrète et continue. Les histogrammes des indices de stress hydrique annuel cumulé révèlent une inflation de zéros et des queues de distributions plus ou moins épaisses. Ce type de distributions peut être modélisé en utilisant des distributions de la famille de Tweedie (*Dunn, 2004*). Ces dernières ont été utilisées pour modéliser avec succès la quantité de précipitations aux pas de temps quotidien ou mensuel, incluant des observations dans lesquelles l'absence totale de précipitation est enregistrée (*Dunn, 2004*). Ce sont des distributions mixtes de type Poisson-Gamma, avec le nombre d'évènements de précipitation modélisé en utilisant une distribution de Poisson et la quantité de précipitation modélisée en utilisant une distribution Gamma (*Jørgensen, 1987; Tweedie, 1984*).

L'utilisation des distributions de Tweedie pour modéliser les indices de stress hydrique annuel cumulé fournit une décomposition des évènements de sécheresse en deux paramètres : leur occurrence et leur intensité. Cette modélisation permet d'évaluer l'évolution de ces deux paramètres et, en conséquence, de la structure du risque sécheresse suite aux réchauffements abrupts, et ce sur les bassins de production français majoritaires des trois cultures étudiées.

Chapitre 1 : Impacts d'un changement
abrupt des températures sur les
composantes climatiques principales du
cycle de l'eau local en France.

3.1. Partie 1 : Avant-propos

Sur les dernières décennies, l'Europe de l'Ouest a été marquée par une augmentation importante des températures moyennes de l'air en surface – particulièrement au printemps et en automne –, plus rapide que ce qui était attendu suite à la hausse des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (*Philipona et al., 2009; van Oldenborgh et al., 2009*). Ce réchauffement se traduit depuis les années 1960 par un changement rapide de régime climatique, détecté à la fin des années 1980 et impactant de nombreuses composantes des écosystèmes naturels (*Reid et al., 2016; Woolway et al., 2017*). La stationnarité du cycle de l'eau est remise en cause, avec notamment une modification des extrêmes de précipitation, d'évapotranspiration et des débits (*Milly et al., 2008*). En France, la hausse rapide des températures en 1987/1988 impacte également le cycle de l'eau, avec une baisse des débits de janvier à juillet (*Brulebois et al., 2015*). En parallèle, depuis les années 1960, les cumuls annuels de précipitation montrent peu d'évolution, suggérant un rôle prépondérant de l'évapotranspiration dans la modification du cycle de l'eau. Ces changements dans les composantes du cycle de l'eau suite à la hausse des températures peuvent impacter la ressource en eau, et mener à des situations de sécheresse (*Teuling et al., 2013*).

L'objectif principal de la thèse étant d'évaluer les modifications du risque agro-climatique sécheresse, l'impact de ce réchauffement abrupt des températures sur le cycle de l'eau local constitue une problématique cruciale, qu'il est nécessaire d'approfondir. Jusqu'alors, les études sur le sujet ont analysé les changements dans le cycle hydrologique (i.e. débits, précipitations). Dans le cadre de l'étude du risque agro-climatique – croisement entre l'aléa climatique et la vulnérabilité des cultures – il est nécessaire d'investiguer plus particulièrement l'évolution de l'aléa climatique lié au bilan hydrique (i.e. précipitations, évapotranspiration). Ce premier chapitre propose donc de quantifier l'évolution de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau en France suite au réchauffement abrupt des températures en 1987/1988, et plus particulièrement les composantes climatiques du bilan hydrique.

Localement, la variabilité des composantes principales du cycle de l'eau – les précipitations et l'évapotranspiration – dépend conjointement du climat, des caractéristiques du sol et de la couverture végétale. Leurs modifications spatio-temporelles sont prises en compte dans l'étude en utilisant une base de données climatiques réanalysées couvrant le territoire français métropolitain avec une grille de résolution 8km, appelée Safran-Isba-Modcou (SIM) (*Habets et al., 2008; Soubeyroux et al., 2008*). Les séries temporelles de précipitations liquides, d'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP) et d'ÉvapoTranspiration Réelle (ETR) sont extraites sur la période 1959-2019. Celles-ci offrent deux périodes de profondeur temporelle similaire et pertinente de part et d'autre du réchauffement abrupt de 1987/1988 pour étudier l'impact du changement de régime climatique sur le cycle de l'eau local. Différents indices agro-climatiques sont également calculés, afin de caractériser l'évolution de la contrainte hydrique suite au réchauffement. L'effet de la hausse rapide des températures sur les composantes climatiques du cycle de l'eau est quantifié en utilisant des tests statistiques bayésiens. Ces derniers permettent de détecter de manière robuste la probabilité d'une rupture dans les séries temporelles, et de calculer l'ampleur et la significativité des changements entre les moyennes de chaque période avant et après rupture, pour chacune des variables et chacun des indices étudiés.

Les résultats montrent que la hausse rapide des températures en France en 1987/1988 a impacté le cycle de l'eau local et le bilan hydrique climatique. À partir des années 1990, la demande évaporative – représentée par l'ETP – augmente de manière importante. Le printemps dévoile la hausse la plus forte de la demande évaporative, provoquant une hausse de la quantité d'eau réellement

évapotranspirée par le couvert végétal (ETR) et menant à un assèchement progressif des réservoirs en eau du sol. En été, la demande évaporative continue à augmenter, mais il n'y a plus assez d'eau dans les réservoirs en eau du sol pour que le couvert végétal y réponde. Le cumul annuel des précipitations évolue peu sur la période étudiée, ne permettant pas un remplissage des réservoirs. La contrainte hydrique sur le couvert végétal augmente en conséquence, en été et jusqu'au début de l'automne. L'étude dévoile des disparités spatiales dans l'évolution de la contrainte hydrique après 1987/1988. A l'échelle annuelle, tout le territoire français métropolitain – sauf les régions de moyenne et haute montagne – est impacté par une hausse de la contrainte hydrique. Le sud-ouest et l'extrême nord-est du pays, la Picardie, la vallée du Rhône et la Côte d'Azur montrent les hausses les plus importantes, principalement portées par la hausse de la demande évaporative. Les résultats montrent aussi une nouvelle hausse rapide de la contrainte hydrique aux échelles annuelle, estivale et automnale aux alentours des années 2014/2015. Celle-ci est probablement due à une combinaison des effets de l'évolution des températures et des précipitations, suite au réchauffement abrupt des températures qui se dessine à cette période (*Hansen et al., 2023; Kontovas, 2020*).

Les modifications du cycle de l'eau local suite au réchauffement abrupt des températures provoquent une augmentation de la contrainte hydrique sur le couvert végétal. La diminution des ressources en eau du sol peuvent mener à des situations de stress hydrique pour la végétation, notamment pour les cultures (*Yang et al., 2021; Zhou et al., 2020*). L'extension de la période avec de fortes contraintes hydriques du printemps au début de l'automne mise en évidence dans ce travail couvre la saison végétative d'une majorité d'espèces végétales du pays, dont les cultures. La hausse abrupte des températures pourrait donc modifier les événements de stress hydrique sur les parcelles agricoles, et affecter leur production. Au regard de l'intensification future du réchauffement climatique, ces impacts pourraient devenir plus sévères d'ici la fin du siècle, accélérant le besoin d'une meilleure connaissance de ceux-ci, et d'une adaptation territoriale pertinente (*Boé et al., 2009; Quevauviller, 2011*).

Le changement climatique s'exprime de différentes manières sur les écosystèmes naturels. En France, ces travaux montrent que le réchauffement affecte la contrainte hydrique du couvert végétal, principalement de manière indirecte en augmentant la demande évaporative. Les mécanismes d'évolution de la ressource en eau suite à une hausse de la demande évaporative sont multifactoriels, et dépendent notamment du type de couvert végétal considéré, et de son stade de développement. Afin d'évaluer de manière plus détaillée les effets des modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau sur l'évolution du risque agro-climatique pour les cultures d'intérêt de cette thèse, il est nécessaire de prendre en considération les caractéristiques de ces dernières. Ainsi, l'évolution du risque pourra être analysée de manière régionalisée, spécifiquement pour chaque espèce végétale considérée.

Article :



Laurent, L., Ullmann, A., & Castel, T., under review. How abrupt changes in surface temperature impact the main climatic components of the local water cycle over France? *Journal of Hydrology*.

3.2. Partie 2 : How abrupt changes in surface temperature impact the main climatic components of the local water cycle over France?

Léa Laurent^{1,2}, Albin Ullmann¹, Thierry Castel¹

¹Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

²Domaine Assurance Récolte, Groupama Rhône-Alpes Auvergne, 24 rue Charles Durand, 18020 Bourges Cedex, France

*Corresponding author: Léa Laurent, Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France. Email: lea_laurent02@etu.u-bourgogne.fr

Abstract

The significant increase in 2m air temperature experienced by Western Europe over the last few decades has resulted in an abrupt warming in France, around 1987/1988 years. This climatic shift impacted hydrological cycle, particularly by reducing runoff in spring and summer. In this study, we try to assess the consequences of this rapid warming on climatic components of local water cycle (evapotranspiration, precipitation). After the abrupt rise in air temperature, water demand increased significantly on almost the entire French territory in spring, summer and autumn. Our results show that, from March to May, the vegetation cover has been able to respond to this increase by drawing from the soil water reservoirs. But in summer, most of the territory is facing a significant rise in water constraint (i.e. difference between potential and actual evapotranspiration), extending on the last decade over autumn. In spring and summer, the increase in potential evapotranspiration is the main driver of the intensification of water constraint. In the beginning of autumn, longer dry spells also play a major role in the lengthening of periods of water constraint. As the observed changes in climate hazard linked to water cycle affect growth cycle of the majority of the vegetation covers and crops, this could lead to a worsening of hydric stress events. The impacts of such an abrupt warming on the local water cycle represent a major issue for natural ecosystems as well as for agriculture.

Keywords

Local water cycle, abrupt warming, climate hazard, water constraint, water demand

Introduction

Over the last few decades, Western Europe has seen an important increase in mean air surface temperature, especially in spring and summer (*Dong et al., 2017; van Oldenborgh et al., 2009*). This rapid warming is faster than expected from anthropogenic greenhouse gases increase (*Philipona et al., 2009; Ruckstuhl et al., 2008*). In addition to the warming trend, numerous natural regime shifts have been detected over the Northern Hemisphere, related to changes in atmospheric circulation (*Hare & Mantua, 2000; Yasunaka & Hanawa, 2002*). It is expected that these natural regime shifts may modulate climate change signal at regional scale. A major abrupt shift has been identified in the late 1980s over western part of Europe, along with a sharp increase of surface temperature (*Reid et al., 2016*). This abrupt warming is likely to impact directly or indirectly several biophysical ecosystems (*Reid et al., 2001; Woolway et al., 2017*).

One of the main issue about global warming is the availability of water resources for natural or low anthropized ecosystems and for human activities, especially for agriculture (*Alcamo et al., 2007; Fitton et al., 2019*). The impact of climate change on hydrological cycle has been widely studied all over the world, and has various consequences depending on the region (*Mandal et al., 2021; Middelkoop et al., 2001; Piao et al., 2010; Tolentino et al., 2016*). Global warming is altering means and extremes of precipitation, evapotranspiration and runoff, compromising the assumption of stationarity of the water cycle (*Milly et al., 2008*). Over Europe, widespread areas show a decreasing trend in runoff in spring and summer months, despite positive precipitation patterns in June and July (*Stahl et al., 2010*). Such observations suggest that during vegetative period evapotranspiration is one of the main drivers of runoff. The important increase of temperature in spring and summer results to higher potential evapotranspiration, leading to higher actual evapotranspiration, which reduces streamflow (*van Lanen & Tallaksen, 2004*).

In France – as in the rest of Western Europe –, mean temperature shows higher increase than over the entire planet during the period 1901-2000 (*Moisselin et al., 2002*). A strong warming signal is detected, driven by a significant increase in both minimum and maximum temperature on every homogenized series used in the study. Since 1980s, the warming trend intensifies strongly, consistent with climate simulations including the anthropogenic forcing (*Terray & Boé, 2013*). Several hypotheses have been put forward to explain this late increase in temperature over France. Atlantic Ocean influence is suggested as one of the key drivers of these changes in climate in recent decades: the recent pattern of anomalies in European climate coincided with substantial warming of the North Atlantic Ocean (*Sutton & Dong, 2012*). Those multidecadal variations in North Atlantic sea surface temperatures (SST) are known as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), a mode of observed climate variability alternating warm and cool phases over large parts of Northern Hemisphere (*Knight et al., 2006*). This rapid warming in SST – warm phase of AMO – over North Atlantic Ocean followed a prolonged positive phase of the North Atlantic Oscillation (NAO) and can be inferred to a delayed response to this long NAO+ sequence (*J. Robson et al., 2012*). Along with the late impact of NAO positive phase on the rapid ocean warming, multiple other drivers of North Atlantic Multidecadal variability have been identified (*Terray, 2012*). Aerosol emissions and periods of volcanic activity are particularly pointed out to be one of the main cause of long term changes in sea surface temperature (*Evan et al., 2009*). Thus, anthropogenic factors are very likely responsible for long term trends in Atlantic Ocean warming (*Booth et al., 2012; Mann & Emanuel, 2006*).

As a result of this warming tendency, an abrupt shift in meteorological regimes is observed over Western Europe at the end of 1980s (*de Laat & Crok, 2013; Keevallik, 2011*). The causes of the delay between North Atlantic Ocean SST warming and this abrupt shift over Western Europe are still poorly documented, as well as the sources of such a rapid and strong warming. Several consequences to the 1980s climate regime shift on aquatic and terrestrial ecosystems have been still highlighted (*Kangur et al., 2020*). As such pattern of rapid air temperature increase is likely to replicate in the context of climate change (*Desbruyères et al., 2021; J. I. Robson et al., 2012*), the issue of its possible impacts on biophysical ecosystems and more especially on water balance elements is of primary concern.

Over France, this abrupt shift is detected in both maximum and minimum air temperature recorded by Météo-France weather stations, between 1969-1987 and 1988-2009 periods (*Brulebois et al., 2015*). Along with this abrupt warming, the latest study reveals a significant decrease in observed runoff from January to July, with the most important variation occurring in June. Rainfall shows significant decrease during this period, but to a lesser extent than for runoff, and in August and September, runoff and rainfall have opposite trends. Variations in runoff response suggest a "soil memory effect": negative soil moisture anomalies in spring lead to drier soils in summer, inducing lower runoff at the end of summer (*Boé & Habets, 2014*). Here, evapotranspiration is clearly identified as the primary cause of the hydrological cycle modification, but the process remains unclear. In Southern France, warming trend is also identified as one of the main drivers of the evolution of surface water resources (*Labrousse et al., 2020*).

1987/1988 shift offers a strong opportunity to study how abrupt warming affects amplitude as well as spatial and temporal main climatic components of the local water cycle. This groundbreaking research work focus on climatic water balance elements which are key points for all natural ecosystem and for crops. What is the amplitude of Potential EvapoTranspiration (PET) changes after 1987/1988 shift? How does soil moisture follow to this change? What are the spatial and seasonal patterns of changes in climatic water balance components?

Local water cycle is the result of a subtle dynamic balance between incoming precipitation and outgoing evaporation, runoff and percolation. Local day-to-day variability of the two main water cycle components – precipitation and evapotranspiration – is jointly climate, soil and land-use/land-cover dependent. Due to the forcing of climate warming, the assessment of its evolution is needed. This is of primary importance to quantify impacts, design adaptation strategies and implement actions. However, there is an ongoing question on how the abrupt surface temperature shift detected over France did or did not simultaneously impact precipitation and/or evapotranspiration. The large precipitation inter-annual variability with more or less pronounced geographical patterns hinders the ability to assess how and where the local balance is affected.

To this aim we use an up-to-date daily re-analysis surface climate data covering the entire French territory with an 8km-resolution. Starting in the end of the 1950s, the dataset offers two periods of similar and relevant time depth both sides of 1987/1988. In addition to climate data, it includes actual evapotranspiration, offering the opportunity to study green water (*Falkenmark & Rockström, 2006*), which is a key component of water resources availability reflecting the trade-offs among various usages (crops, human and natural ecosystems).

Material and methods

Study area and data

The initial dataset used for this study comes from the Safran-Isba-Modcou model developed by Meteo France (*Habets et al., 2008; Soubeyrou et al., 2008*). This 8km-resolution reanalysis chain combines the Safran meteorological analysis system (*Durand et al., 2009*), the Isba land surface model (*Noilhan & Planton, 1989*) and the Modcou hydrogeological model (*Ledoux et al., 1989*).

The analysis system of the atmospheric forcing, Safran, is based on a robust vertical interpolation method for the main meteorological parameters (*Durand et al., 1993*). The French territory is divided in more than 600 climatically homogeneous zones, taking explicitly into account the elevation parameter. The model relies on both the observation network and the analysis of the atmospheric models (Arpège or CEPMMT), and solar radiation terms (visible and infrared) are estimated using a radiative transfer model. A total of 8 meteorological parameters are analyzed at an hourly time scale (10m wind speed, air temperature, 2m relative humidity, cloudiness, visible and infrared solar radiation, solid and liquid precipitation) on more than 9000 grid points (*Soubeyrou et al., 2008*). This allows to have a continuous and uniform spatial information covering the entire French territory, in real time and in delayed time. A validation of Safran module confirmed the relevance of the meteorological analysis, especially for the precipitation fields and the air temperature (*Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010*).

The land surface model Isba consists of 3 layers (superficial, root and deep layers) (*Boone et al., 1999*), and includes surface runoff and drainage schemes (*Habets et al., 1999*). Soil and vegetation parameters comes from the Ecoclimap database at a resolution of 1-km over France (*Masson et al., 2003*). In the framework of the SIM chain, Isba computes 8-km resolution surface energy balances while sub-mesh surface runoff and drainage are computed using Topmodel (*Beven & Kirkby, 1979*).

Hydrological transfers are simulated by the hydrogeological model Modcou, using surface runoff and infiltration data from Isba (*Ledoux et al., 1989*). In the SIM chain, runoff is computed with a 3 hours' time step, and the evolution of groundwater tables level at a daily time step. The results of this part of the SIM chain are not used in this study.

A validation of the whole SIM chain shows that the model is quite robust both in space and time, and gives a good estimation of the water fluxes (*Habets et al., 2008*). The comparison between the observed and simulated river flows over France, associated with some hypotheses, depicts an error of less than 4% at the annual scale. The same error is identified for the evaporation fluxes. SIM system is able to represent well the main local climate components driving water balance and runoff dynamic.

The SIM chain dataset starts from the 1st of august 1958 and is updated periodically until present time. In this work, 1959-2019 period is selected. This offers a 60-years' time depth, allowing us to distinguish two climates based on 1987/1988 shift in surface temperature warming. As a first approximation, the different variables of interest for the two ~30-years climate periods before and after the shift can be considered as independently stationary.

Agro-climatic indices

Three climate variables among all SIM outputs – maximal temperature (Tmax), liquid precipitation (PRELIQ) and potential evapotranspiration (PET) – are considered here, along with actual evapotranspiration (AET) linking climate, water and vegetation characteristics. These daily variables are aggregated to monthly, seasonal and annual scale and are used to compute several types of indices providing information on how climate warming affects regime and cycle of the local water cycle components.

Of all the variables related to the water cycle, during the vegetative period, evapotranspiration plays a significant role. The process of soil evaporation and plant transpiration is complex to understand because of various interactions between soil, biosphere and atmosphere. To study the effects of temperature rise on the evolution of vegetation water demand, several biophysical indices linked to evapotranspiration can be computed. First, potential evapotranspiration (PET) is defined by the Food and Agriculture Organisation (FAO) as “the rate of evapotranspiration from an extensive surface of 8 to 15 cm tall, green grass cover of uniform height, actively growing, completely shading the ground and not short of water” (Doorenbos & Pruitt, 1977). This variable is considered as a climatic measurement, introduced to study the evaporative demand of the atmosphere only affected by climatic parameters (Allen *et al.*, 1998). Vegetation cover shows various structural and functional configurations that strongly modulate the amount of water required to fully compensate the evapotranspiration loss. Maximal evapotranspiration (MET) is defined as the evapotranspiration from a specific vegetation, under optimal water resources and environmental conditions (Allen *et al.*, 1998). For cultivated crops in fields, the agronomic management and environmental conditions can differ from standard conditions, leading to an actual evapotranspiration (AET) that may vary from MET. AET is computed by using a water stress coefficient K_s in addition to the crop coefficient K_c (Allen *et al.*, 1998). In the SIM chain, PET and AET are computed by the Isba land surface model using methods and equations described in Noilhan & Planton (1989) and in Noilhan & Mahfouf (1996). Isba accounts for the land use and land cover characteristics that are implemented by the Ecoclimap database. The land surface model is also driven by Safran incoming radiation, precipitation, atmospheric pressure, air temperature and humidity, and wind speed at a reference level.

Along with PET and AET, two indices depicting the evolution of the local water cycle are computed. The difference between PET and AET informs on the hydric constraint on vegetation. When $PET - AET$ is close to 0, evapotranspiration under actual environmental and climatic conditions is getting close to potential evapotranspiration under optimal soil water content. The vegetation is able to respond to climatic water demand, and do not suffer from water shortage. On the contrary, the increase of $PET - AET$ suggests a hydric constraint increase. The difficulty to reach the amount of potential evapotranspiration reveals a lack of water in soil reservoirs which impacts vegetation growth and may lead to severe consequences up to its death. The second index computed is the AET/PET ratio, which depicts the efficiency of the evapotranspiration process. The more this ratio is close to 1, the more the water status of the soil is good, and the plant is able to respond to the climatic evaporative demand. The study of the evolution of those two indices allows to assess the impact of climate warming on the evolution of local water cycle and vegetation cover water constraint.

Statistical analysis

Climate change over France can be apprehended in many ways. The assessment of a stationarity break in surface air temperature in 1987/1988 is particularly interesting, as the non-stationarity of climate warming can have unexpected and severe impacts on ecosystems. Trying to estimate the consequences of the 1987/1988 abrupt warming on climatic components of local water cycle by using change point detection and mean comparison techniques occurs to be necessary.

The four daily series of the variables of interest are aggregated to monthly, seasonal (winter: December-January-February (DJF); spring: March-April-May (MAM); summer: June-July-August (JJA); autumn: September-October-November (SON)) and annual time scale. Robust statistical tests such as change point detection and distribution comparison techniques are used to assess the evolution in precipitation, PET and AET due to temperature warming.

A Bayesian method allowing both the detection of change points – i.e. shifts (*Barry & Hartigan, 1993*) – and the computation of the posterior mean (*Erdman & Emerson, 2008*) is applied to the climate time series variables. This method is relevant for climate data series (*Ruggieri, 2013*) and has been successfully applied to weather station records of temperature and rainfall (*Brulebois et al., 2015*). The ability to jointly detect change points and compute posterior mean is useful to identify isolated extreme events, as for instance 1976 severe drought conditions, from long term climate change trends.

Finally, to address differences in mean values for liquid precipitation, PET and AET before and after 1987/1988 temperature shift, a robust Bayesian test is used (*Kruschke, 2013*). This estimation is based on the Bayesian posterior probability distribution, evaluating whether the probability of a difference is high enough to matter. By using the values of the 95% Highest Density Interval (HDI) to define the confidence interval, the Bayesian method provides information about the magnitude and significance of the difference between two distributions. Statistical analysis is conducted over the 9892 grid cells covering the entire French metropolitan territory.

Results

Detection of shift in temporal evolution of variables linked to the local water cycle

Temporal analysis of inter-annual evapotranspiration depicts a significant shift in annual PET amount at the end of the 1980s, following the evolution of the annual mean of maximal temperature (Figure 14a). The mean of the PET amount on the 1988-2019 period is around +100mm higher than the mean of the PET amount on the 1959-1987 period. The Safran analysis system computes PET using the Penman-Monteith equation as defined by the FAO (*Allen et al., 1998*). PET is thus influenced by several climatological variables, such as solar radiation, wind speed, vapor pressure and mostly air temperature. Consequently to the abrupt increase in maximum air temperature in 1987/1988 over France, the evaporative demand increases. AET also increases, but to a lesser extent than PET (+50mm in average between the two periods). As a result, the difference between PET and AET is increasing sharply at the end of the 1980s, from an average of 210mm before the shift up to an average of 260mm after the shift. Such an evolution reveals that the vegetation cover and the soil are not able to respond to the increase of the evaporative demand at the annual scale, suggesting the larger deficit of soil water content over the second period. As precipitation remains quite stable during the studied period, the results suggest that temperature increase is the main driver of the local evolution of climatic water

cycle elements. The lower soil water content expected on the 1988-2019 period consequently increases hydric constraints.

The evolution of the local water cycle elements shows contrasted seasonal changes. In spring, AET follows the evolution pattern of PET, both increasing in a similar way by approximately 30mm in average between the two periods surrounding the shift at the end of the 1980s (Figure 14b). This indicates that between March and May, soil water content is still sufficient for the soil and vegetation cover to respond to the evaporative demand. From June to August, PET increases strongly after 1990, from 320mm in average during the first period up to 360mm during the second period (Figure 14c). This evaporative demand is yet not satisfied with AET remaining quite stable between 1959 and 2019. As a result, PET - AET index is rising strongly after 1987/1988, from 110mm to 140mm. In summer over the 1988-2019 period, the increase of this index reveals that soil water content becomes insufficient to supply vegetation water requirements. In autumn (Figure 14d) and in winter (Supplementary Figure 1), no abrupt changes are detected in PET or AET at the end of the 1980s, water balance remains stable during the studied period. Interestingly, recent decade in summer and autumn depicts an important rise of the PET - AET indice. Water constraint increases even more significantly since 2014/2015 in those seasons, autumn being also impacted by soil water deficit caused by the important warming of air temperature and increase of water demand.

Taken together, these results suggest that the major shift in air temperature in 1987/1988 had a strong influence on the evolution of the local water cycle variables. The increasing gap between PET and AET since the 1987/1988 suggests that water balance decreases on the second half of the studied period, along with the increase of water demand and soil drying. Consequently, water constraint is increasing rapidly at the end of the 1990s, both annual scale and seasonal scale, especially in summer and more recently in autumn. Seasonal analysis also highlights the link between spring, summer and autumn evolution of local water cycle. Even if the soil water content is still sufficient in spring for the vegetation cover to follow to the evaporative demand, the latter experienced a rapid significant increase. Vegetation cover drew more heavily in soil water reservoirs, accelerating the summer increase in water constraint. On the last decade, summer water constraint increase extends over autumn with the continuous rise of water demand. This is consistent with recent events of prolonged drought and dry spells in September and October over France that had several impacts on natural ecosystems (*Schuldt et al., 2020; Valo, 2022*).

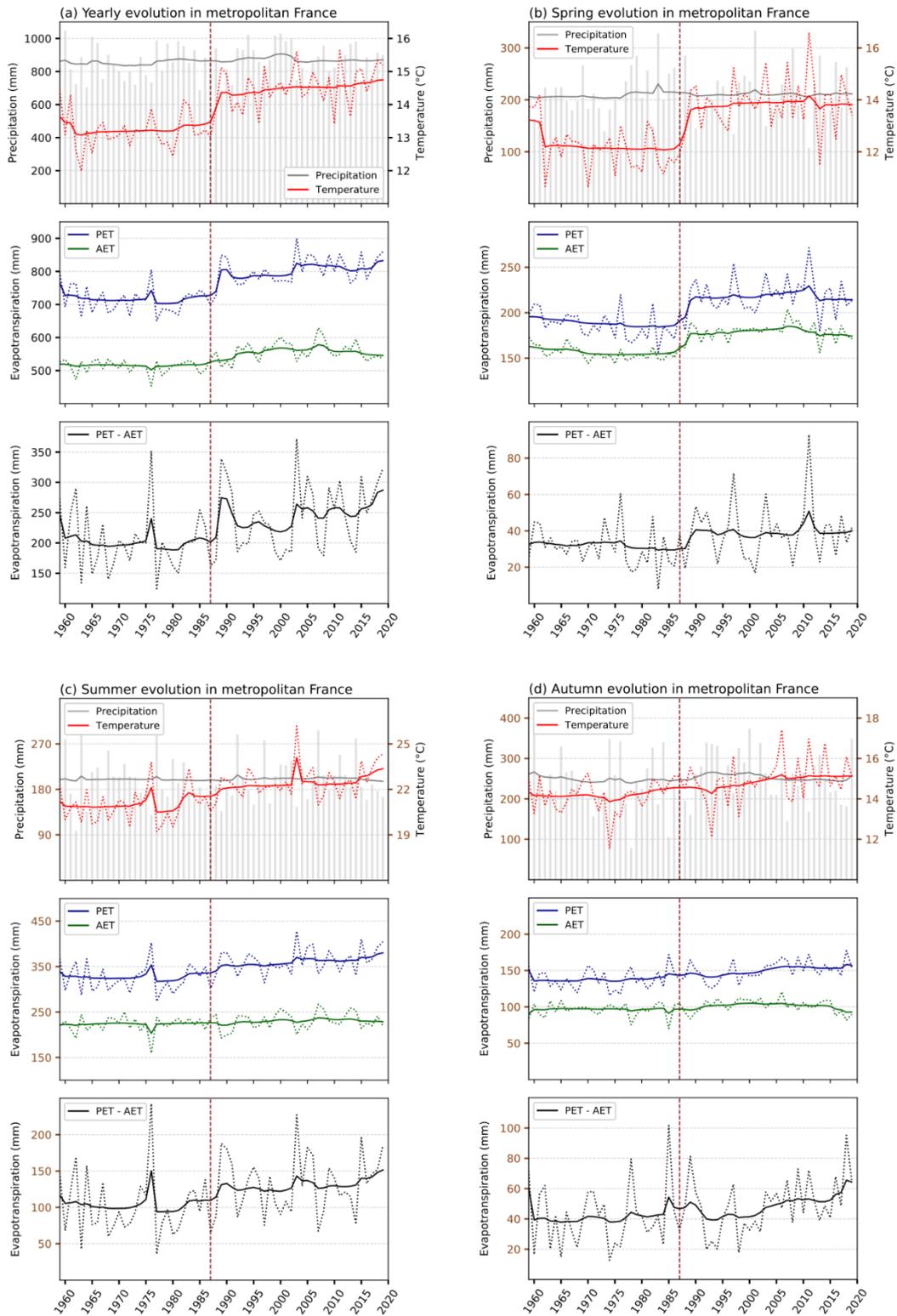


Figure 14: (a) Yearly and (b, c, d) seasonal evolution of variables linked to water cycle between 1959 and 2019. PET: Potential EvapoTranspiration; AET: Actual EvapoTranspiration. Gray bars: SIM chains values; gray solid curves: Bayesian posterior mean values. Solid colored curves: Bayesian posterior mean values; dashed colored curves: SIM chains values. Vertical dashed line indicate 1987.

1987/1988 shift: a turning point

Regarding the previous results, it is interesting to investigate the evolution of the local water cycle variables before and after the 1987/1988 air temperature shift. Table 3, Table 4, Table 5 and Supplementary Table 1 summarize the number of Safran grid points recording a significant shift in 1987/1988 (according to Bayesian differences test) and the anomalies between the means of 1959-1987 and 1988-2019 periods for each of the variables of interest linked to water cycle. Although there are no abrupt changes in time series, PET and AET means both increased significantly on the second period 1988-2019 compared to the first period 1959-1987, yearly and seasonally (Table 3 and Table 4). At the annual scale, 98% of Safran grid points registered a shift in PET in 1987/1988, against only 76% of grid points for AET. The shift in PET impacts a larger proportion of the French territory than the shift in AET at the annual scale, highlighting the increase in evaporative demand and in hydric constraints after 1987/1988.

Table 3: Percentage of grid points recording a significant shift in 1987/1988, anomalies (Δ PET, mm) and 95% confidence interval of the difference in the mean (95% HDI) over the entire french metropolitan territory at annual and seasonal scales, for potential evapotranspiration (PET, mm). * means significant difference according to Bayesian difference test.

| Period | Potential EvapoTranspiration (PET) | | |
|-------------|------------------------------------|-------------------|-------------|
| | % of stations | Δ PET (mm) | 95% HDI |
| Year | 98 | +90.3* | 89.8 – 90.9 |
| DJF | 53 | +5.73* | 5.64 – 5.81 |
| MAM | 98 | +32.5* | 32.4 – 32.7 |
| JJA | 95 | +38.5* | 38.2 – 38.8 |
| SON | 74 | +13.6* | 13.5 – 13.8 |

Table 4: Same as in Table 3 but for actual evapotranspiration (AET, mm).

| Period | Actual EvapoTranspiration (AET) | | |
|-------------|---------------------------------|-------------------|-------------|
| | % of stations | Δ AET (mm) | 95% HDI |
| Year | 76 | +45.7* | 45.4 – 46.1 |
| DJF | 73 | +8.29* | 8.19 – 8.40 |
| MAM | 95 | +23.2* | 23.0 – 23.3 |
| JJA | 19 | +7.69* | 7.43 – 7.96 |
| SON | 29 | +5.35* | 5.25 – 5.46 |

Table 5: Same as in Table 3 but for liquid precipitation (PRELIQ, mm).

| Period | Liquid precipitation (PRELIQ) | | |
|-------------|-------------------------------|----------------------|---------------|
| | % of stations | Δ PRELIQ (mm) | 95% HDI |
| Year | 9 | +23.2* | 22.0 – 24.3 |
| DJF | 17 | -3.07* | -3.60 – -2.56 |
| MAM | 0 | +0.28 | -0.12 – 0.69 |
| JJA | 2 | +3.53* | 3.08 – 3.99 |
| SON | 3 | +10.4* | 9.90 – 10.9 |

PET and AET evolutions show a strong seasonality. Spring shows the highest percentage of stations recording a significant shift in 1987/1988 for PET and AET, with respectively 98% and 95% of Safran grid points (Table 3 and Table 4). This season also records the strongest and most brutal increase in air temperature, directly impacting the evolution of PET and AET (*Brulebois et al., 2015*). Summer displays the larger gap between PET and AET anomalies, rising from respectively 39mm and only 8mm (Table 3 and Table 4). However, precipitation slightly increase yearly and in summer and autumn on the second period, but always to a lesser extent than PET (Table 5). Consequently, after the important rise of evaporative demand in spring, soil water content drops quickly. Evaporative demand still rises in summer, resulting in an aggravation of hydric constraints between June and August, extending into autumn. Note that the general evolution of precipitation described in this table can hide important geographical disparities.

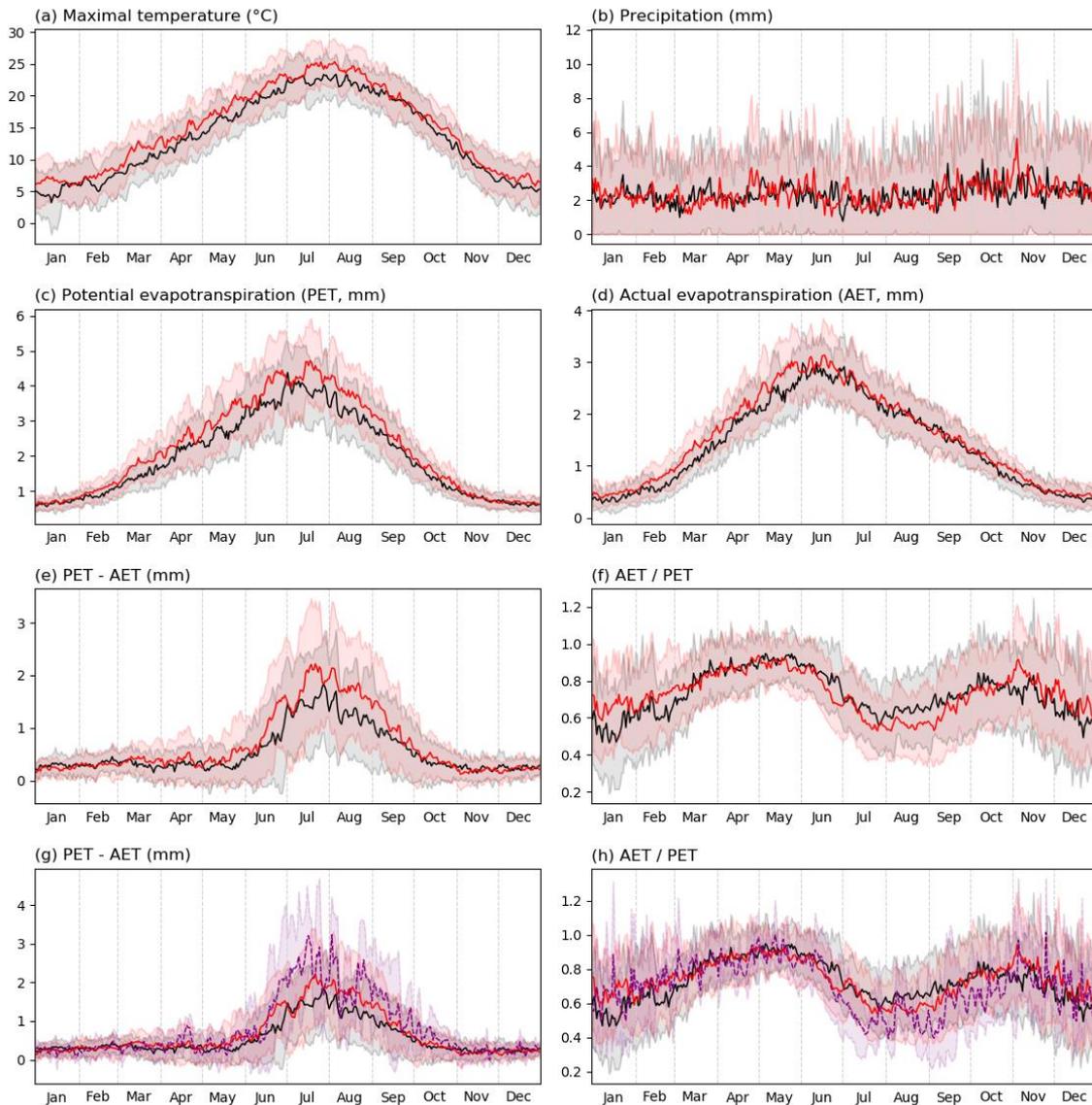


Figure 15: Daily mean cycles of variables linked to the water cycle. (a, b, c, d, e, f) Black solid curves: mean cycle of SIM values from 1959 to 1987; red solid curves: mean cycle of SIM values from 1988 to 2019. (g, h) Black solid curves: mean cycle of SIM values from 1959 to 1987; red solid curves: mean cycle of SIM values from 1988 to 2014; purple solid curves: mean cycle of SIM values from 2015 to 2019. The solid curve shows the ensemble mean, the color shading extends to ± 1 standard deviation to show interannual variability.

Detailed annual cycles for both periods pre- and post-shift confirm the evolution of the variables linked to the local water cycle (Figure 15). Mean annual cycle of maximal temperatures is always higher after the shift of 1987/1988 than before, especially from March to August (Figure 15a). In contrast, mean annual cycle of precipitation remains stable between the two periods (Figure 15b). Mean annual cycle of PET is higher for the second period from February to October, in line with the evolution of maximal temperature cycle (Figure 15c). The largest differences are observed from March to August, following the most important increase in air temperature. From March to June, AET mean annual cycle is also

higher for the second period, confirming the ability of soil water content to respond to the rise of evaporative demand at this time of the year (Figure 15d). Conversely, for summer months, AET remains stable between the two periods and does not follow the evolution of PET, suggesting clearly the lack of soil water content to meet the evaporative demand. The evolution of mean annual cycle of both indices PET - AET and AET/PET confirms the modification of the local water cycle from June to September after the 1987/1988 shift (Figure 15e and Figure 15f). At this time of the year during the second period, PET - AET is more important than during the first period, while AET/PET is lower, indicating more severe water constraints.

The increase between the end of June and mid-October of the mean PET - AET for the 2015-2019 period compared to the mean for the 1988-2014 period confirms the accentuation of water constraints for the last decade (Figure 15g and Figure 15h). At the same time of the year, AET/PET mean is lower for the 2015-2019 period than for the 1988-2014 period, the vegetation cover struggles to respond to the important evaporative demand, soil water content declines faster in the last decade. These results also corroborate the lengthening of the increase in water constraint in autumn on the last decade, PET - AET being higher over the 2015-2019 period than over the 1988-2014 period and AET/PET being lower over the 2015-2019 period than over the 1988-2014 period.

As for precipitation, the evolution of the variables linked to the local water cycle outlined in these results may hide geographical disparities.

Geographical response of local water cycle variables to temperature shift

Anomalies between the means of the two periods pre- and post-shift compared to the mean of the first period depict spatial diversities in their evolution, for all the studied variables (Figure 16 and Supplementary Figure 2). PET is rising everywhere after the shift in air temperature, confirming the strong influence of the abrupt warming on the evolution of water demand (Supplementary Figure 2a). Northeast of France (Vosges, Jura, Morvan mountains), Rhône valley, west of the Côte d'Azur, center and southwest of France experienced the strongest increase in evaporative demand after the 1987/1988 shift, the mean of the 1988-2019 period being around 30% above the mean of the 1959-1987 period. AET increases with the same order of magnitude in the Vosges, the Jura, the Morvan and the Massif Central (Supplementary Figure 2b). Liquid precipitation displays more contrasted evolutions, south of 44/45°N depicting a downward trend in rainfall while north of this line showing a rising trend (Figure 16a). Some specific territorial features yet appear: north of France and Finistère depict a significant rise of almost 20% whereas some grid points in the south-central and southwestern regions of the territory show a significant precipitation decrease of almost 20% for the second period.

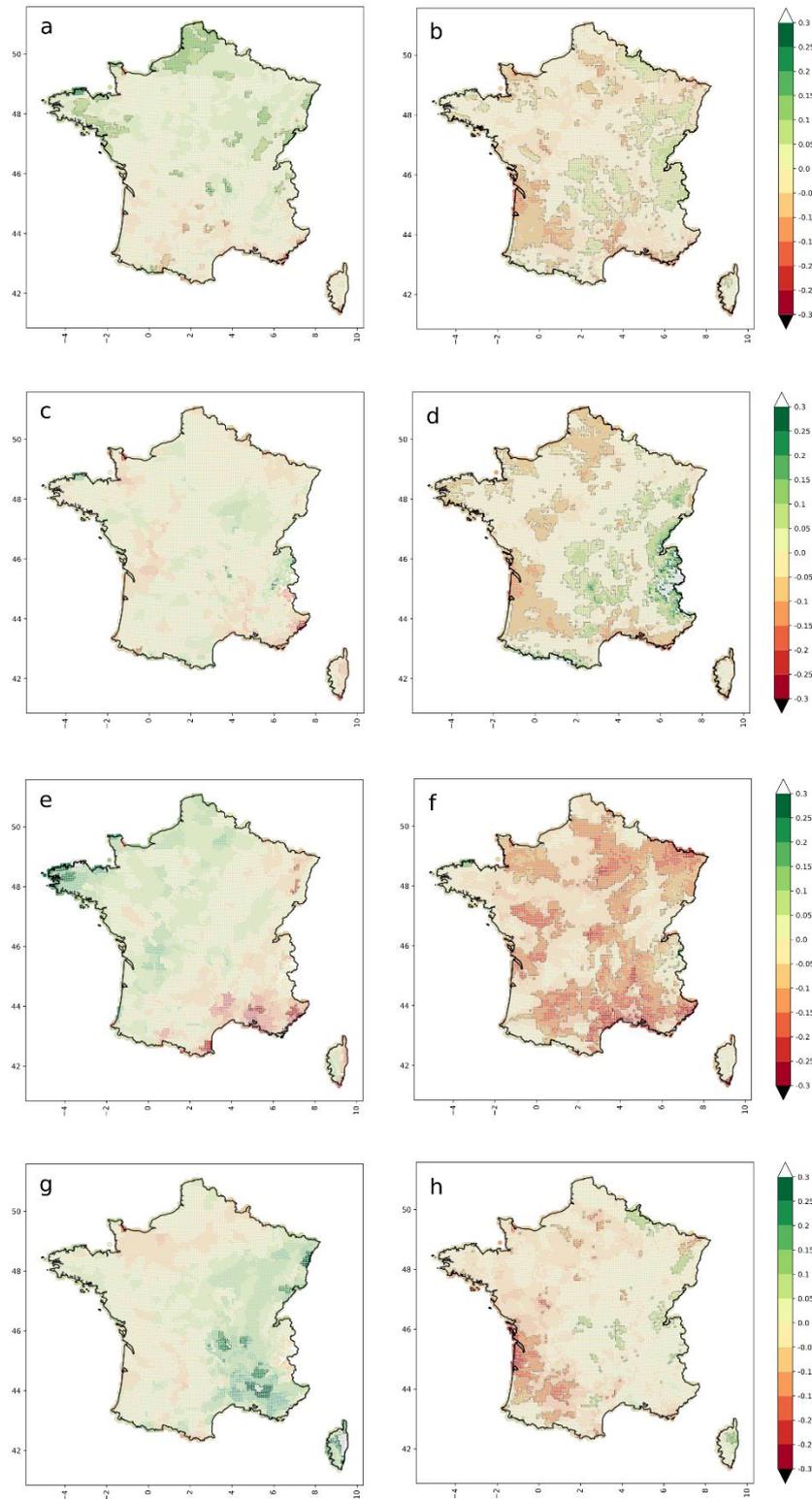


Figure 16: Map of the anomalies of period 1988-2019 compared to period 1959-1987 for (a, c, e, g) liquid precipitation (mm) and (b, d, f, h) ratio AET/PET. (a, b) Year, (c, d) Spring, (e, f) Summer, (g, h) Autumn.

Consequently, means of the AET/PET index present contrasted territorial evolutions (Figure 16b). On the southwest of France, the Cévennes, in Picardie and in Basse-Normandie, and along the Mediterranean coast, evaporative demand PET experienced a more important increase than AET, leading to a decrease in AET/PET about 10% to 20% on the second period compared to the 1959-1987 period. On those regions, evaporative demand increases considerably after the shift in air temperature and soil dries up, intensifying vegetation water constraint.

Seasonal evolutions of PET and AET depict various geographical changes, affecting the evolution of the local water cycle in different ways throughout the seasons (Figure 16 and Supplementary Figure 2). In spring, southwest of France and Côte d'Azur start to experience high water constraints (Figure 16d), affected by an increase in evaporative demand that vegetation could not keep up (Supplementary Figure 2c and 2d) and no increase in precipitation (Figure 16c). Water constraint extends on almost all French territory in summer, particularly affecting north of Lorraine, Bassin Parisien, Normandie, Poitou-Charentes, southwest of France, Rhone valley and Côte d'Azur (Figure 16f). AET/PET drops from 15 to 30% on those areas, following the increase of evaporative demand and the lack of soil water due to temperature warming (Supplementary Figure 2e and 2f). In autumn, a large part of France is still under higher water constraints on the second period, southwest revealing the most important decrease in AET/PET (Figure 16h).

Most of the regions experiencing an increase in water constraint after the 1987/1988 shift in air temperature are large agricultural production areas. The abrupt warming, affecting the water cycle over the entire French territory in various geographical and temporal ways, may have important negative impacts on agriculture and other ecosystems.

Discussion and conclusion

Air temperature rise is one of the main drivers of hydrological response across the world (Dobler *et al.*, 2010; Gebre & Ludwig, 2015; Khanal *et al.*, 2021). It affects ice and snow cover in mountainous regions (Huss *et al.*, 2017; Marty *et al.*, 2017), biodiversity (Malcolm *et al.*, 2006) and runoff (Gu *et al.*, 2020) all over the world. At global scale, runoff has been shown to increase with the increase of temperature (Labat *et al.*, 2004). This assumption hides seasonal and geographical disparities, as for example in France where runoff is expected to decrease significantly from January to July (Brulebois *et al.*, 2015). The present study aimed at depicting the evolution of climate components of the local water cycle (precipitation, evapotranspiration) over metropolitan French territory in the context of an abrupt warming.

Precipitation and evapotranspiration, commonly referred to as the water cycle, is enhanced by temperature increase (Held & Soden, 2006). Evapotranspiration is a key factor of runoff and drought evolutions, contributing to soil drying, water constraints and hydric stress (Rossi *et al.*, 2016; Teuling *et al.*, 2013). Our results allow to better understand the role of evapotranspiration evolution, driven by the abrupt increase in air temperature in 1987/1988, on the water cycle modification at local scale in France. 1987/1988 temperature shift strongly affected local water cycle and soil water balance. From the 1990s, water demand rises rapidly, contributing to the drying of soils. Spring depicts the most widespread shift in evaporative demand, leading to a discharge of soil water reservoirs. Water demand increases further in summer up to the end of September, enhancing and extending the drying of soils.

Consequently, hydric constraint on vegetation increases both annually and seasonally after 1988, summer and more recently autumn being particularly impacted.

Temporal evolution of the water cycle is associated with strong spatial disparities. Water constraint increases annually over almost all the French territory except mountainous regions (Alps, Massif Central, Jura, Morvan, Vosges and Ardennes). Southwest and extreme northeast of France, Picardie, Rhône valley and Côte d'Azur depict the most important increase in water constraint. In those areas, the abrupt shift in air temperature impacts water availability for vegetation, and may impact crop cycle and, by extension, yields (Zhou *et al.*, 2020).

The increase in water demand in spring is expected to worsen in the future, with temperature warming. This is consistent with other findings on more limited areas in France (Chaouche *et al.*, 2010). This could lead to a faster draining of soil water reservoirs, leading to situations of hydric constraint on vegetation earlier in the year. Our results also point out the lengthening of the period of water constraint towards autumn, driven mainly by September. Along with the increase in water demand, longer dry spells during this month could play a major role in the drying of soils (Raymond & Ullmann, 2021). Taken together, this study reveals a lengthening of the period where climatic hazard linked to water cycle could lead to hydric stress on ecosystems after the rapid warming of 1987/1988. This intensification and lengthening of periods of water constraint is mainly driven by the increase in air temperature and water demand, but also by a decrease in precipitation in late summer and beginning of autumn.

As for other parts of the world, modifications of climate components of the local water cycle after the important shift in air temperature over France could cause major damages on ecosystems (Creed *et al.*, 2015; Higgins & Vellinga, 2004). Changes in water availability and water cycle induced by air temperature warming may directly and indirectly impact natural ecosystems and human activities, especially agriculture (Yang *et al.*, 2021). The extension of the period with high hydric constraint from spring to the beginning of autumn pointed out in this work is covering the growing season of the majority of vegetation covers and crops. Thus, the abrupt increase in air temperature is expected to modify crop water stress events, such as winter bread wheat for example (Laurent *et al.*, 2023). Along with the intensification of global warming in the future, these impacts are expected to be more severe by the end of the century, accelerating the need for adaptation of natural and anthropized ecosystems (Boé *et al.*, 2009; Quevauviller, 2011).

This study also depicts a new rapid increase in water constraint over France around the 2014/2015 years. This may be due to combined effects of temperature and precipitation evolutions. In fact, the entire French territory experienced a new rapid increase in air temperature during this period. The stagnation, or slight decrease in some regions, of precipitation – probably linked to the natural climate variability – exacerbates the effects of climate warming. The causes and consequences of this new abrupt warming still need to be explored, as such event may happen again in the future.

Acknowledgements

This study is part of a CIFRE PhD project, funded by Groupama Rhône-Alpes Auvergne French insurance company. We would like to thank Claude Perrot, company's head of crop insurance, for facilitating our research work. We are also grateful to Xavier Aubouy, data scientist in the actuarial department of

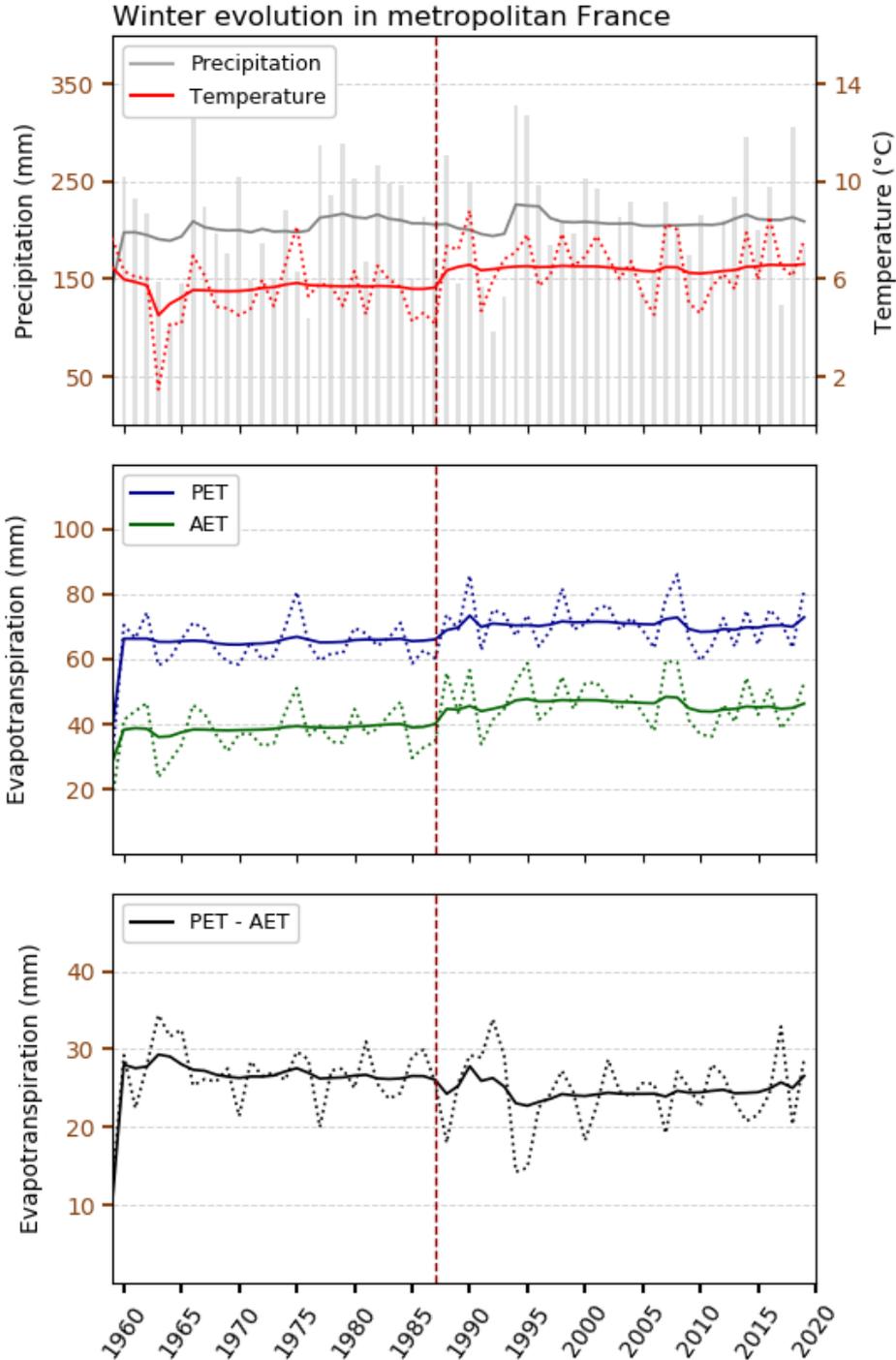
Groupama Mutuelle d'Assurance (the national subsidiary of the company) and studying French crop insurance portfolio, for his advice. Both have been involved in the whole process of research work and made constructive feedback on the results and their interpretation. We would also like to thank Agnès Tamburini (Météo France) for giving us access to SIM dataset.

Conflict of interest statement

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability statement

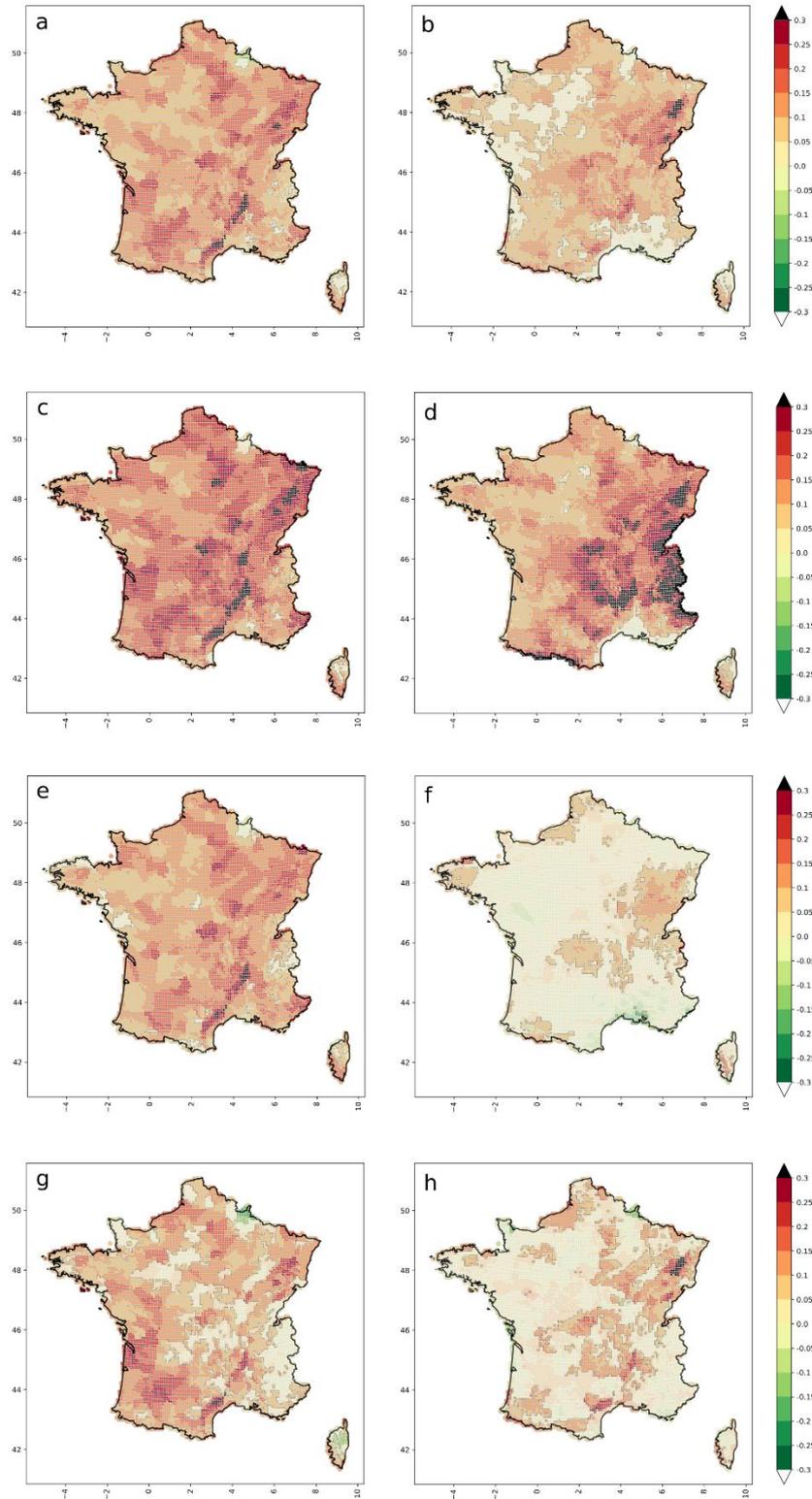
The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.



Supplementary Figure 1: Winter evolution of variables linked to hydrological cycle between 1959 and 2019. PET: Potential EvapoTranspiration; AET: Actual EvapoTranspiration. Gray bars: SIM chains values; gray solid curves: Bayesian posterior mean values. Solid colored curves: Bayesian posterior mean values; dashed colored curves: SIM chains values. Vertical dashed line indicate 1987.

Supplementary Table 1: Percentage of grid points recording a significant shift in 1987/1988, anomalies (Δ AET/PET, mm) and 95% confidence interval of the difference in the mean (95% HDI) over the entire French metropolitan territory at annual and seasonal scales, for the ratio AET/PET. * means significant difference according to Bayesian difference test.

| Period | Ratio AET/PET | | |
|-------------|---------------|------------------|-----------------|
| | % of stations | Δ AET/PET | 95% HDI |
| Year | 39 | +0.666* | 0.603 – 0.728 |
| DJF | 64 | +8.98* | 8.85 – 9.10 |
| MAM | 39 | -1.06* | -1.12 – -0.996 |
| JJA | 42 | -5.48* | -5.58 – -5.38 |
| SON | 12 | -0.592* | -0.676 – -0.506 |



Supplementary Figure 2: Map of the anomalies of period 1988-2019 compared to period 1959-1987 for (a, c, e, g) PET (mm) and (b, d, f, h) AET (mm). (a, b) Year, (c, d) Spring, (e, f) Summer, (g, h) Autumn.

Chapitre 2 : Impacts d'un changement abrupt des températures sur le cycle de l'eau en France. Cas du blé tendre d'hiver.

4.1. Partie 1 : Avant-propos

La hausse abrupte des températures en France en 1987/1988 a entraîné une modification du cycle de l'eau local. Les entrées (précipitations liquides) et sorties (ÉvapoTranspiration Réelle, ETR) réagissent à la hausse de la demande évaporative, de manière variée selon les saisons et les territoires. La contrainte hydrique sur le couvert végétal augmente en conséquence, principalement en été et au début de l'automne. Mais les effets de l'évolution de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau sur la ressource en eau dépendent du type de couvert végétal considéré, de son stade de développement et du taux de remplissage en eau du sol (*Allen et al., 1998*). Selon la saison pendant laquelle la contrainte hydrique va se développer, les impacts sur la croissance et le développement des plantes vont également varier (*Teuling et al., 2013*). L'évolution du risque agro-climatique sécheresse dépend fortement de la vulnérabilité de la culture considérée (*Parkash & Singh, 2020*). Plusieurs études décortiquent les effets de différents scénarios du changement climatique sur le bilan hydrique des cultures (*Li et al., 2009; Wang et al., 2009*). Mais ces impacts sont également variables selon la région considérée.

Le premier chapitre de ce manuscrit nous a montré comment l'aléa climatique lié au cycle de l'eau a été modifié suite à la hausse rapide des températures de 1987/1988. Afin d'étudier les modifications du risque agro-climatique subséquentes, il est nécessaire de croiser ces évolutions de l'aléa climatique à la vulnérabilité des cultures d'intérêt. Ces dernières, choisies conjointement entre l'entreprise partenaire de la CIFRE et le laboratoire de recherche, sont le blé, le maïs et la vigne. Le blé, constituant la production la plus importante du pays, et dont les caractéristiques sont très bien documentées dans la littérature scientifique, a été choisi dans ce travail pour étudier l'évolution du risque agro-climatique sécheresse. Ce chapitre propose donc d'évaluer les modifications de la contrainte hydrique à l'échelle régionale, sur les principaux bassins de production du blé tendre d'hiver français, suite au réchauffement rapide de 1987/1988.

Le bilan hydrique est modélisé dans cette étude en utilisant un modèle simplifié à deux réservoirs, permettant un bon compromis entre complexité du modèle et robustesse des résultats (*Jacquart & Choissnel, 1995*). Le calcul du bilan hydrique nécessite en entrée du modèle, pour chaque point de grille de France métropolitaine, les précipitations liquides quotidiennes, récupérées dans la base de données SIM, et la capacité totale du réservoir en eau du sol, aussi appelée Réserve Utile (RU), calculée à partir des valeurs de la base de données de l'initiative GISSol (*Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011*). La phénologie de la culture étudiée est prise en compte via l'utilisation, en entrée du modèle de bilan hydrique, de la variable d'ÉvapoTranspiration Maximale (ETM). Cette dernière est calculée en croisant l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP) avec un coefficient cultural, nommé K_c , dépendant de la culture étudiée et de son stade phénologique. Dans ce travail, la croissance et le développement du blé tendre d'hiver sont modélisés en utilisant un modèle de croissance en degrés-jours simple. La fraction d'eau extractible (Relative Extractible Water en anglais, REW), exprimée en pourcentage de 0 à 1, est ensuite calculée avec les sorties du modèle de bilan hydrique. L'évolution du cycle annuel moyen du bilan hydrique suite à la rupture est analysé pour déterminer l'impact des modifications de l'aléa climatique sur la ressource en eau de la culture. Une première estimation des changements dans le risque agro-climatique sécheresse est réalisée en appliquant un seuil de stress hydrique fixe – représentant la vulnérabilité de la culture –, afin de déterminer l'évolution du nombre de jours sous le seuil de stress hydrique suite au réchauffement abrupt. Ces analyses sont réalisées sur

chaque bassin de production majoritaire du blé, définis selon la proportion de la surface du point de grille couverte par la culture, et validés par les experts sinistre de l'entreprise.

Les résultats montrent un assèchement des réservoirs en eau du sol sur les parcelles de blé après la hausse rapide des températures de 1987/1988. Le cycle annuel moyen du bilan hydrique est en baisse sur la période 1988-2021 par rapport à la période 1960-1987 sur quasiment tous les bassins de production français. Le seuil de stress hydrique est dépassé soit plus longtemps soit plus intensément selon la saison et la région étudiées. Le Nord-Pas-de-Calais et le Bassin Parisien sont particulièrement impactés par une hausse importante du nombre de jours sous le seuil de stress hydrique à l'échelle annuelle, principalement portée par l'été. À cette saison, la hausse de la demande évaporative sur la période 1988-2021 sur des sols déjà asséchés au printemps y fait apparaître des situations de stress hydrique. Sur les bassins de production de Poitou-Charentes, du Centre, de Bourgogne/Rhône-Alpes et Aquitain, le nombre de jours sous seuil de stress hydrique augmente de manière importante au printemps, mettant en évidence l'allongement des périodes de stress hydrique pour le blé, avec une apparition des premiers événements de stress hydrique plus tôt dans l'année. Sur ces zones, l'été était déjà impacté par des événements de stress hydrique avant la rupture, mais la hausse de la demande évaporative non contrebalancée par une augmentation des cumuls de précipitation au printemps induit une contrainte hydrique encore plus forte après 1987/1988, contribuant à un assèchement du sol et un dépassement du seuil de stress hydrique de la culture plus prononcé.

Les modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau entraînent des changements dans le bilan hydrique du blé tendre d'hiver. Après le réchauffement abrupt des températures de 1987/1988 en France, la fréquence et l'intensité des dépassements du seuil de stress hydrique évoluent, de manière variée selon les territoires considérés. Les modifications des sorties (i.e. évapotranspiration) et des entrées (i.e. précipitations, notamment l'absence de précipitations) du bilan hydrique expliquent en grande partie les évolutions du risque agro-climatique lié à la sécheresse (*Raymond & Ullmann, 2021*). L'allongement et/ou l'intensification des événements de stress hydrique peuvent affecter de nouveaux stades de développement de la culture ou aggraver la contrainte sur d'autres, impactant négativement le rendement (*Araus et al., 2002; Boyer, 1982*). L'apparition d'un stress hydrique pendant l'élongation de la tige ou le remplissage des grains par exemple est identifiée comme un facteur important de stagnation des rendements du blé (*Le Gouis et al., 2020*).

L'assurance climatique sur récolte, dont les performances sont directement liées aux sinistres dus à des aléas climatiques, est particulièrement sensible à l'évolution du risque sécheresse (*Fusco et al., 2018*). Avec la hausse future des températures, les épisodes de sécheresse agricole devraient s'étendre et s'intensifier (*Dayon et al., 2018; Vidal et al., 2012*). La caractérisation des modifications de la structure du risque agro-climatique avec le changement climatique constitue donc un enjeu majeur pour les assureurs. Celle-ci est complexe et dépend notamment de la région étudiée et de la culture considérée (*Ewert et al., 2015*). Dans le cadre de cette thèse CIFRE en collaboration avec Groupama, l'évolution de la structure du risque doit être étudiée plus spécifiquement pour les cultures d'intérêt et les bassins de production délimités. Les changements dans l'occurrence et l'intensité du risque agro-climatique sécheresse doivent être quantifiés, afin de mieux comprendre leurs impacts sur la sinistralité des contrats assurantiels.

Article :



Laurent, L., Ullmann, A., & Castel, T., 2023. How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area. Total Environment Research Themes 8, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100079>

4.2. Partie 2 : How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area.

Total Environment Research Themes 8 (2023) 100079



Contents lists available at ScienceDirect

Total Environment Research Themes

journal homepage: www.elsevier.com/locate/totert



How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area.



Léa Laurent^{a,b,*}, Albin Ullmann^a, Thierry Castel^a

^a Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

^b Domaine Assurance Récolte, Groupama Rhône-Alpes Auvergne, 24 rue Charles Durand, 18020 Bourges Cedex, France

Abstract

Since 1980s over western Europe, warming trend intensifies strongly, consistent with climate simulations including anthropogenic forcing. As a result of this warming tendency, a shift is detected in France in maximum and minimum air temperature, delimiting two different climatic periods: 1959–1987 and 1988–2021. Along with this abrupt warming, a trend towards stagnation of crop yields is observed since the 1990s. Bread wheat yields are particularly affected. The impact of climate hazard and agro-climatic risk on the evolution of bread wheat yields is a major issue for agricultural sector, including insurance companies. This work aims at analyzing how surface warming shift impacted water balance over main French bread wheat production basins. The SIM (Safran-Isba-Modcou) dataset with an 8km spatial resolution grid of reanalyzed surface meteorological observations at daily time step from 1959 to 2021 offers the opportunity to address the complexity of processes leading to changes in local water cycle. Water balance is computed on main bread wheat production basins using a two-reservoirs model, SIM climate data and crop agronomic parameters as inputs. Our results suggest that the abrupt shift in air temperature in France in 1987/1988 had a strong influence on the water cycle variables evolution. Along with the increase of water demand and soil drying, water balance is modified on the post-shift period, with various spatial patterns between main production basins. Harsher hydric stress events alter the crop growth cycle. The evolution of climate hazard linked to water balance leads to changes in agro-climatic risk, identified as one of the main factors affecting the evolution of bread wheat yields. Such conclusions suggest that, with both mean and variability changes in water balance state, probability to overcome risk threshold increases. This is of major concern for our partners and may lead to adaptation processes from managers.

Keywords

Abrupt warming, water balance, hydric stress, agro-climatic risk, winter bread wheat

* Corresponding author.

E-mail address: lea_laurent02@etu.u-bourgogne.fr (L. Laurent).

<https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100079>

Received 14 December 2022; Received in revised form 21 June 2023; Accepted 28 August 2023

Available online 29 August 2023

2772-8099/© 2023 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Introduction

Over the recent years, France has experienced severe yield losses due to adverse weather events (*Beillouin et al., 2020; Ciais et al., 2005*). Farmers, states and insurance companies were highly impacted by the resulting economic losses (*Douvill e, 2019; Gambarini, 2022*). Along with the increase in frequency of extremes weather events, yields stagnation of several crops has been observed over western Europe since 1990s (*Brisson et al., 2010; Finger, 2010; Schaubberger et al., 2018*). The turning point is often identified in the beginning of the 1990s (*Peltonen-Sainio et al., 2009*). Several driving factors are identified such as lack of genetic improvement, changes in crop management, legislative limitations on fertilizer use, and climate hazard (*Hawkins et al., 2013; Lin & Huybers, 2012; Michel & Makowski, 2013*).

Bread wheat is particularly impacted by yields stagnation in France (*Grassini et al., 2013*), the year of inflection being observed in the middle of the 1990s (*Brisson et al., 2010*). This leveling-off of bread wheat harvest questions food security, as the country is the first producer of the European Union (EU) in 2020, exporting half of its production to the other countries of the EU and the rest of the world (*Agreste, 2021*). Confronted to the increasing world food requirements and limited potential new farmland, this statement represents a major societal issue (*Spiertz & Ewert, 2009*).

Among all the causes identified, climate constitutes a non-negligible factor of variation of wheat yield trends (*Wheeler et al., 2000*). The impact of climate variability on yields trends and variability has been widely studied, and differs according to the region and the crop studied (*Lobell et al., 2012, 2008; Osborne & Wheeler, 2013*). In some parts of Europe, the increase in temperature may have benefic impacts, allowing for example an extension in the arable area in northern latitudes (*Holmer, 2008*). In more temperate parts of Europe, such as France, climate change is unfavorable to cereals yields, warming intensifying heat stress and drought (*Brisson et al., 2010*).

Western Europe experienced a rapid increase in air temperature over the last few decades, exceeding the evolution simulated by models (*van Oldenborgh et al., 2009*). Both minimal and maximal temperatures showed an abrupt increase around 1987/1988 over France (*Brulebois et al., 2015*) and Europe (*de Laat & Crok, 2013; Reid et al., 2016*). Spring and summer seasons are particularly impacted, mean air temperature of the 1988–2013 period being 1.55°C higher than the mean of the 1961–1987 period (*Brulebois et al., 2015*). A substantial warming of North Atlantic Ocean through North Atlantic Oscillation (NAO) variations and a decrease in the use of aerosols coupled with global warming are the main identified factors leading to this regional abrupt warming (*Evan et al., 2009; J. Robson et al., 2012; Sutton & Dong, 2012; Terray, 2012*). After this 1987/1988 warming shift, temperatures show a little positive trend up to 2000, followed by a so-called 10 years hiatus period linked to La Nina conditions (*Meehl et al., 2011*). This offers on both sides of 1987/1988 shift roughly two stationary periods that mainly differ from their average surface temperature. Note that since 2012/ 2014, a strong surface temperature increase is observed, suggesting a new step in climate warming process over France.

After 1987/1988, *Brulebois et al. (2015)* show modifications of the hydrological cycle, significant decrease in runoff from January to July occurred in 1987/1988 for 40 French watershed, while no changes in the annual amount of rainfall were detected. Such findings highlight the role of evapotranspiration as a major cause of the modification of the hydrological cycle (*Bo e & Habets, 2014*).

The increase in potential evapotranspiration (PET) – or climatic water demand (*Doorenbos & Pruitt, 1977*) – after the rise in air temperature also impacts the agronomic water cycle. During spring and

summer season for example, the increase in evapotranspiration reduces soil water availability, leading to drought situations (Teuling *et al.*, 2013). Actual evapotranspiration (AET), directly linked to vegetation cover type, phenological development stage and soil water content (Allen *et al.*, 1998), is impacted in various ways regarding the seasons and the territories. Those modifications of local water cycle under temperature increase highlight changes in soil water balance, directly impacting crop development and growth by increased frequency or intensity of water stress events (Li *et al.*, 2009). Evolution of agro-climatic risks linked to drought highly depends on crop vulnerability and water stress threshold (Parkash & Singh, 2020). Some studies tried to understand the impact of climate change on water balance of wheat fields under different future emissions scenarios over the world (He *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2009).

The rapid increase in air temperature in France in 1987/1988 had specific effects on the hydrological cycle and evapotranspiration evolution. This offers a new opportunity to focus on water balance response to warming, especially for winter wheat crop, as the latter constitutes one of the most important production in the country (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022). The 1987/ 1988 abrupt change in observed minimum and maximum temperatures delimits along 1959–2021 two periods of 29 and 34 years respectively. This partition is first statistical, based on Bayesian breakpoints and differences tests (Brulebois *et al.*, 2015). But it is also physical, as the abrupt warming might be a result of the combination between dynamic atmospheric processes (positive NAO phase persistence) and radiative processes (aerosols-cloud microphysical effects) (Booth *et al.*, 2012; Sutton & Dong, 2012). The temporal depth of the two delimited periods offers the opportunity to assess robustly how climate change signal trend – i.e. structural change – affected winter wheat water balance.

This innovative work aims at depicting the trend evolution of water balance on winter bread wheat fields in metropolitan France both sides of the abrupt warming of 1987/1988. Spatial and temporal modifications of the agro-climatic risk linked to water stress are analyzed for the main production basins of the country. Water balance results of hydric interactions between soil, vegetation cover and atmosphere. Day-to-day variability of the different components – precipitation, evapotranspiration, runoff – is jointly soil, land-use/land-cover and climate dependent. To study its evolution, we used a simplified two-reservoirs water balance model forced with a daily re-analysis of surface climate data covering the entire French territory with an 8 km-resolution and winter bread wheat characteristics. Starting in the end of the 1950s, the climatic dataset offers two periods of similar and relevant time depth both sides of 1987/1988.

Material and methods

Study area and datasets

The initial dataset used for this study comes from the Safran-Isba- Modcou (SIM) model developed by Meteo France (Habets *et al.*, 2008; Soubeyroux *et al.*, 2008). This 8km-resolution reanalysis chain combines the Safran meteorological analysis system (Durand *et al.*, 2009), the Isba land surface model (Noilhan & Planton, 1989) and the Modcou hydrogeological model (Ledoux *et al.*, 1989).

The analysis system of the atmospheric forcing, Safran, is based on a robust vertical interpolation method for the main meteorological parameters (Durand *et al.*, 1993). The French territory is divided

in more than 600 climatically homogeneous zones, taking explicitly into account the elevation parameter. The model relies on both the observation network and the analysis of the atmospheric models (Arpège or ECMWF), and solar radiation terms (visible and infrared) are estimated using a radiative transfer model. A total of 8 meteorological parameters are analysed at an hourly time scale on more than 9000 grid points (Soubeyrou *et al.*, 2008), including liquid precipitation needed to compute water balance. This allows to have a continuous and uniform spatial information covering the entire French territory, in real time and in delayed time. A validation of Safran module confirmed the relevance of the meteorological analysis, especially for the precipitation fields and the air temperature (Quintana-Seguí *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2010). Safran also computes Potential EvapoTranspiration (PET) using Penman-Monteith equation (Allen *et al.*, 1998).

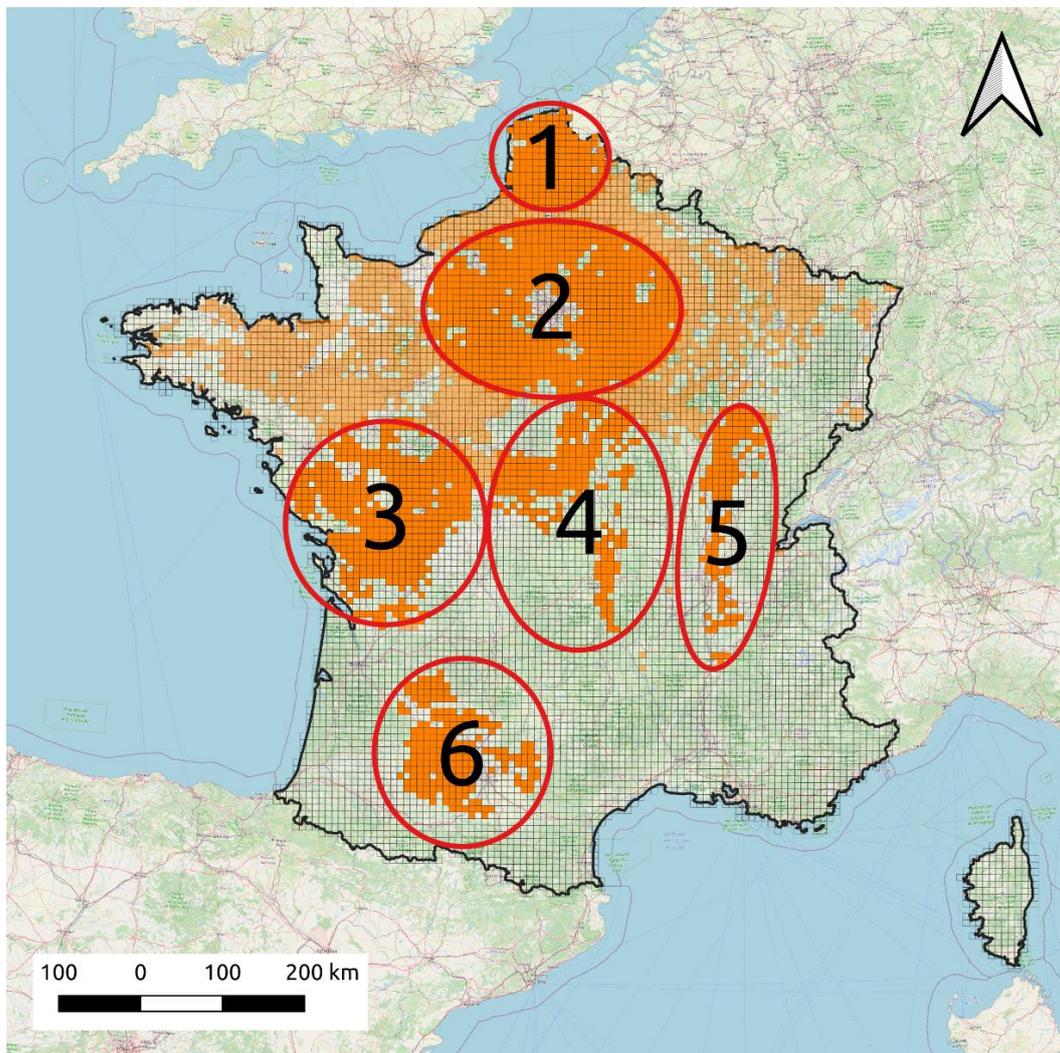


Figure 17: Map of the main winter bread wheat production basins in metropolitan France. Transparent grid is the Safran-Isba-Modcou climate data grid (Météo France), orange points are the points on which at least 10% of the surface is covered by winter bread wheat fields according to the 2019 Registre Parcellaire Graphique (Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019). Red contours represent main winter bread wheat production basins: 1. Nord-Pas-de-Calais, 2. Parisian Basin, 3. Poitou-Charentes, 4. Centre, 5. Bourgogne/Rhône-Alpes, 6. Aquitain Basin. The background map comes from OpenStreet Map database.

The SIM chain dataset starts from the 1st of august 1958 and is updated periodically until present time. In this work, 1959–2021 period is selected. This offers a 60-years’ time depth, allowing us to distinguish two climates based on 1987/1988 shift in surface temperature warming. Water balance is modeled for each grid point on the metropolitan territory using winter bread wheat characteristics.

Along with climatic variables, capacities of surface and deep soil water reservoirs are required for water balance modeling. Each class of useful water reserve from GISSol database is weighted by its surface for each SIM grid point and averaged with the other classes of the grid point (*Groupement d’intérêt scientifique sur les sols (France), 2011; Le Bas, 2018*).

The evolution of water balance indicators is assessed for each winter bread wheat main production basins (Figure 17). Each SIM grid point containing at least 10% of their surface covered by winter bread wheat fields using the 2019 Registre Parcellaire Graphique from the National French Geographical survey is selected. Main production basins are designed and approved by field insurance experts. The impact of the abrupt warming is assessed for Nord-Pas-de-Calais, Parisian Basin, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain Basin regions.

Phenological modeling and maximal evapotranspiration

Along with climatic variables and soil water content characteristics, daily maximal evapotranspiration (MET) must be computed to model water balance. The latter corresponds to the amount of water in mm that a given crop can evapotranspire under optimal soil water content and actual climatic conditions (*Allen et al., 1998*). It corresponds to potential evapotranspiration (PET) crossed with a daily crop coefficient (Kc) depending on the phenological stage of the crop (Figure 18).

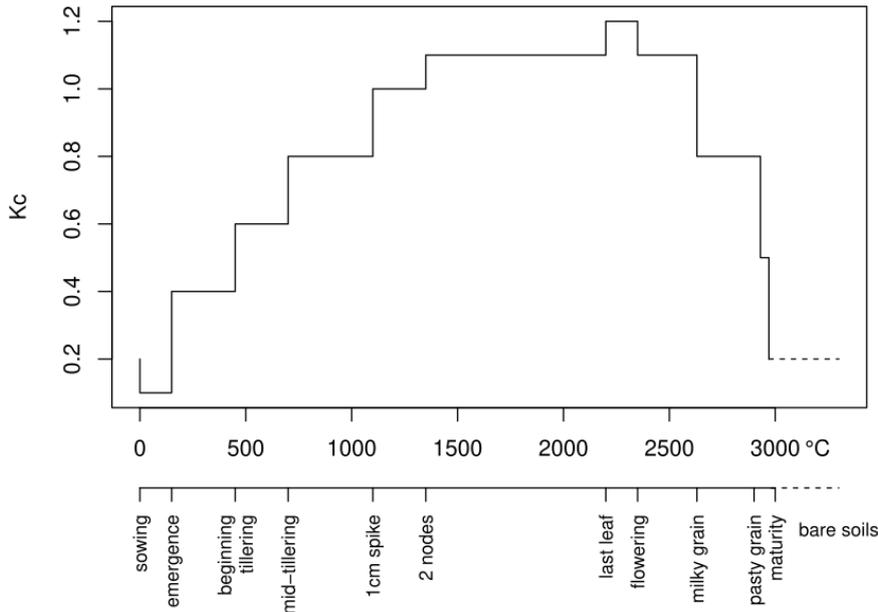


Figure 18: Crop coefficient (Kc) function of cumulative degree-days needs for winter bread wheat.

To determine the start date of each phenological stage, growth and development of crop of interest must be modeled. A simple growing degree-days (GDD) model is developed on R, using growing degree-days needs to reach one phenological stage from *Gate (1995)* (Figure 18). This GDD model compute, for each year, growing degree-days on a 0°C basis, starting at a sowing date on the 1st of November. Each time a growing degree-days need is achieved, the crop reaches the following phenological stage. Once maturity is reached, the crop is harvested and we consider soils remain bare up to the next sowing date.

Dates of phenological stages for each crop cycle are modeled from 1959 to 2021, then the corresponding crop coefficient is assessed to each day. Kc series crossed with PET values for each grid point provide maximal evapotranspiration series, needed as input for water balance modeling.

Water balance modeling

Jacquart & Choisnel (1995) developed a simplified two-reservoirs water balance model, computing daily water balance on a given crop cover using liquid precipitation, maximal evapotranspiration (MET) and size of soil surface and deep-water reservoirs as inputs. Simplified water balance model does not involve an explicit resolution of surface energy balance equation, and thus accepts maximal evapotranspiration computed from potential evapotranspiration as input. This model displays good performance when compared to the coupled model Earth, a surface energy balance and water balance model (*Choisnel, 1985*). It gives an accurate estimation of the regulation of the actual evapotranspiration (AET), especially during an alternation of dry and wet sequences.

The model computes a possible water storage by the soil water reservoir on a homogeneous soil texture, called $R(t)$ and varying with time. The inferior limit of $R(t)$ is 0, the superior limit is the useful water reserve (RU). The latter is constant and depends on soil characteristics: in this work one RU value is computed for each grid point (see *Study area and dataset*).

$R(t)$ water storage is managed by decomposing soil water content in two reservoirs: the surface reservoir supplied by liquid precipitation and emptying in case of excess in the deep reservoir. This allows to separate two different regulations of actual evapotranspiration (AET):

- $AET = MET$ when the water is coming from the surface reservoir;
- $AET < MET$ and is regulated when the water is coming partly or totally from the deep reservoir.

The use of two separate reservoirs gives an accurate representation of the dependence of evaporation on soil water content near surface (*Mahrt & Pan, 1984*), and allows to better account for dry and wet sequences succession and their impact on water availability in particular during the spring and summer seasons. In a simplified water balance model, surface reservoir dimension is fixed as a constant fraction of the total useful water reserve. The previous and more complex water balance model Earth, developed by *Choisnel (1985)* and using a variable dimension for the surface reservoir, was used as a reference to validate the simplified two-reservoirs water balance model. In the Earth model, the AET/MET ratio drops significantly when the $R(t)/RU$ ratio is going under 60% (*Choisnel, 1985*). Through those findings, in the *Jacquart & Choisnel (1995)* water balance model, the partition of the top (RU1) and deep water reservoirs (RU2) corresponds respectively to 40% and 60% of the total useful water reserve (RU).

Daily soil water content in both reservoirs is computed iteratively in function of actual evapotranspiration, liquid precipitation amount and soil water content at the end of the last day. Contributions to actual evapotranspiration (AET) from surface and deep reservoirs are computed separately as function of maximal evapotranspiration (MET) (see *Jacquart & Choisnel, 1995* for more details).

The version of the model used in this study to compute daily water balance needs as inputs for each SIM grid point:

- daily liquid precipitation (PRELIQ);
- daily maximal evapotranspiration (MET);
- surface useful water reserve (RU1);
- deep useful water reserve (RU2).

Daily water balance is modeled from 1959 to 2021, the first year is considered as a spin-up of the model and is removed from statistical analysis.

Water balance results analysis

Water balance is defined as the proportion of the capacity of soil water reserve filled with water. *Jacquart & Choisnel (1995)* model outputs are used to compute daily water balance as follow:

$$REW_j = \frac{R1j + R2j}{RU}$$

with *REW* the Relative Extractable Water (REW in %), *R1j* and *R2j* respectively the *j* day amount of water in the surface and deep reservoirs and *RU* the total capacity of soil water reserve.

The daily REW mean cycle is then computed for each period before and after the abrupt increase in air temperature (1960–1987 and 1988–2021), for each grid point. Spatial aggregation for each winter bread wheat main production basins (Figure 17) reveals the evolution of mean REW daily mean cycle with climate.

When REW is decreasing under a threshold, vegetation cover is considered being under hydric constraint. The REW threshold for which the rate of leaf expansion and gas exchanges starts to diverge from a reference value varies according to several factors, such as evaporative demand, root distribution, soil texture and soil bulk density (*Sadras & Milroy, 1996*). *Meyer & Green (1980)* for example estimated that when 52 to 57% of the REW is used, the winter wheat leaf growth starts to decrease. The rate of evapotranspiration is also declining when 20 or 30% of the total REW remains in the soil profile of the experiment in *Meyer & Green (1981)*, and the extension growth of winter wheat is decreasing when REW is 33 to 34%. Another experiment on a substrate-based nutrient delivery system designed for spaceflight applications estimated that the limit of extractable water for wheat is 39.7% (*Norikane et al., 2003*). According to those findings, we consider in this work a fixed hydric stress threshold at 40% of the total REW, under which winter wheat growth is affected by hydric stress (*Jacquart & Choisnel, 1995*).

Crossing daily water balance evolution with the hydric stress threshold highlights the evolution of water stress. For each SIM grid points, we computed the mean annual number of days for which water balance goes under 40%, for both 1960–1987 and 1988–2021 periods. The difference between the

mean number of days under hydric stress after 1987/1988 compared to before 1987/1988 is represented on France map for each grid point on which at least 10% of the area is covered by winter bread wheat fields. This allows to study spatial evolution of hydric stress with warming.

Results

Water balance daily mean cycle modification

The pattern of REW shows as expected values close to 1 (i.e. field capacity) for the fall and winter seasons, while in spring and summer values are decreasing. Note that a REW equal to 0 indicates a soil water content at permanent wilting point.

The analysis of REW daily mean cycle points out spatial disparities in the pattern of evolution after the abrupt warming (Figure 19).

North of France production basins (zones 1 and 2) are strongly impacted by a decrease in REW during the 1988–2021 period compared to the 1960–1987 period, especially between March and August. In the Nord-Pas-de-Calais production basin for example, minimum water filling of soils reservoirs occurs in August (40%) in the 1960–1987 period. After the abrupt increase in air temperature, the rise in evapotranspiration results in an important decrease in water balance, minimum water filling of soils reservoirs occurring in the end of July with approximately 30%. After 1987/1988, REW daily mean cycle crosses stress threshold, revealing the apparition of water stress in July and August. In Nord-Pas-de-Calais region and Parisian Basin, water stress events are thus longer and more intense on winter bread wheat fields after 1987/1988 abrupt warming.

Poitou-Charentes, Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes regions (respectively zones 3, 4 and 5) display same pattern of water balance evolution. During the 1960–1987 period, REW daily mean cycle already crosses stress threshold from June to August up to 20%, 20% and 30% of soil water reservoir filled at the minimum for respectively zone 3, zone 4 and zone 5. This intensity of water stress remains the same on the second period for all the production basins. But for those three regions, REW daily mean cycle goes under stress threshold earlier during the 1988–2021 period compared to the 1960–1987 period. Water stress events start around 15 days earlier on the three regions. For Poitou-Charentes, Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes regions, water stress events do not intensify after 1987/1988, but get longer, especially start earlier.

Aquitain Basin (zone 6) shows another pattern of REW daily mean cycle evolution. 1988–2021 cycle is offset compared to 1960–1987 period cycle, water balance going under and then upper stress threshold earlier during the year on the 1988–2021 period. Mean hydric stress event on this production basin keeps its length and intensity during the 1988–2021 period (minimum REW at 20%), but is shifting by about 15 days compared to the 1960–1987 period. Such changes in the evolution of REW can be due to modifications of the phenological cycle of winter bread wheat crop. Degree-days needs are reached faster in this zone with the increase in air temperature. Water requirements increase more quickly, leading to water stress events starting earlier in the 1988–2021 period. Crop maturity is also reached earlier, inducing earlier harvests and leading to water stress events ending earlier after 1987/1988.

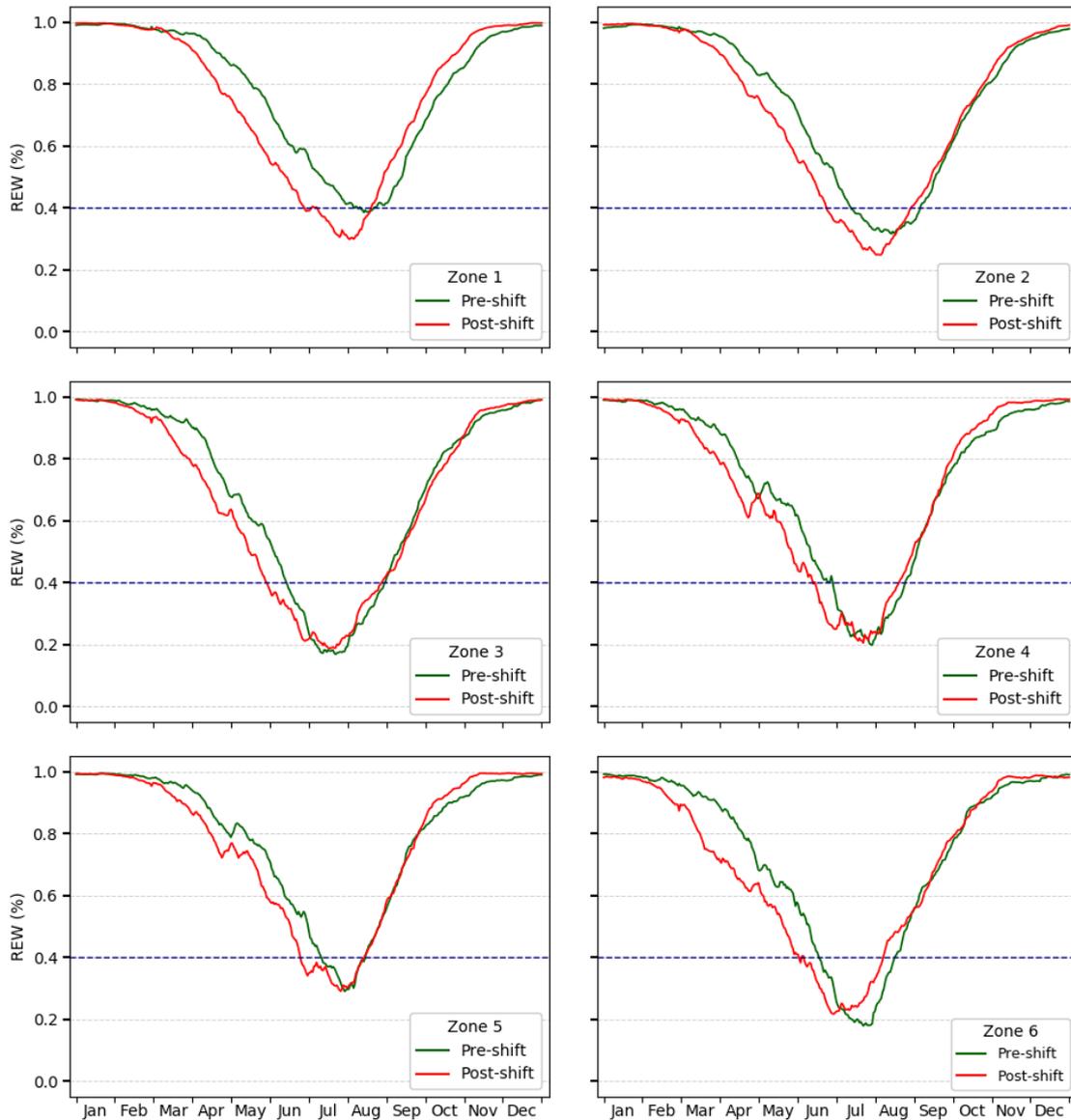


Figure 19: Water balance daily mean cycle for each winter bread wheat main production zone. Green: daily mean for 1960–1987 period; red: daily mean for 1988–2021 period. Blue line: stress threshold.

The rapid increase in air temperature in 1987/1988 over France impacted winter bread wheat water balance cycle through the increase in evapotranspiration combined with quite stable liquid precipitation. Spatial disparities are highlighted in the evolution of hydric stress events. Further investigations are needed to understand how the 1987/ 1988 abrupt warming modified hydric constraint on winter bread wheat fields over metropolitan French territory. Spatial analysis offers the opportunity to study on a finer scale the evolution of water stress.

Spatial disparities in the evolution of hydric stress

At the annual scale, almost the entire French territory is impacted by an increase in the number of days under hydric stress threshold (Figure 20). North and Northeast of France experience the most important increase in number of days during which wheat water balance is going under stress threshold after the 1987/1988 abrupt warming, with between 20 and 40 more days under hydric stress per year. This confirms that Nord-Pas-de-Calais and Parisian Basin regions display more hydric stress events on the 1988–2021 period that were very few along the 1960–1987 period.

Seasonal scale analysis details this trend. In spring, southern production basins reveal the most important increase in number of days under hydric stress. As previously pointed out, Poitou-Charentes, Centre and Aquitaine Basin regions experience a shift in water stress events after 1987/1988, first day of hydric constraint occurring earlier in the year. This leads to a rise in the number of days under hydric stress during spring season, between 10 and 20 days more under stress threshold.

In summer, considerable increase in number of days under hydric stress occurs in North and Northeast parts of France. Nord-Pas-de-Calais and Parisian Basin production basins encounter hydric stress events on the 1988–2021 period that they did not have to deal with on the 1960–1987 period or only slightly. Poitou-Charentes and Aquitaine Basin regions show a slight decrease in the number of days under hydric stress in summer, which confirms the advancement of crop maturity and the earlier harvest, lowering vegetation cover water requirements and hydric constraint earlier in the year.

Main winter bread wheat production basins are differently impacted by the abrupt warming in air temperature, temporally and spatially. Number of days under hydric stress increases on almost the entire French territory at the annual scale, revealing the increase in intensity and/or length of hydric stress on the 1988–2021 period compared to the 1960–1987 period.

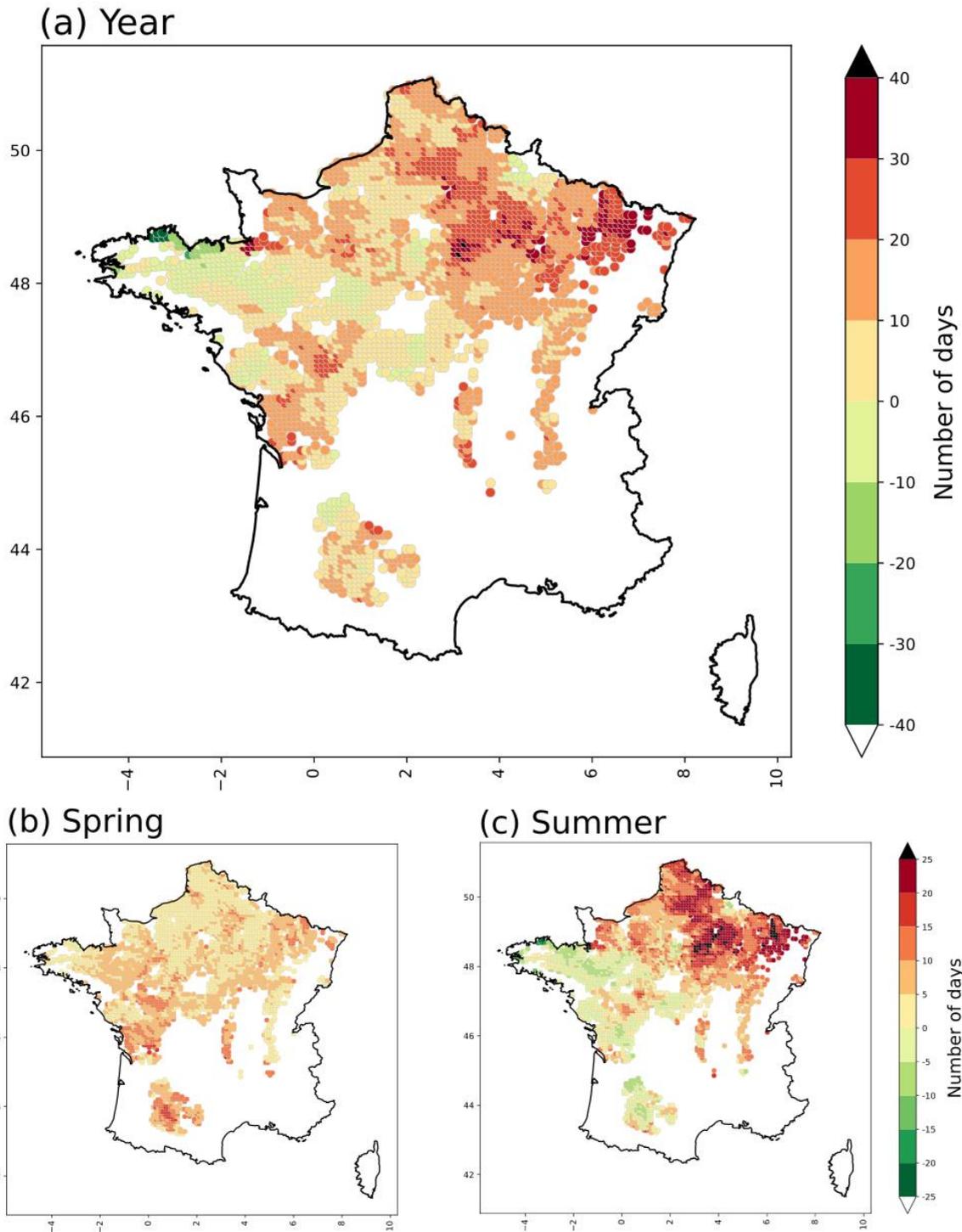


Figure 20: Difference in the number of days under hydric stress threshold (40%) (1988–2021 period – 1960–1987 period) for each SIM grid point containing at least 10% of its area covered with winter bread wheat fields. (a) Annual scale, (b) spring March-April-May (MAM), (c) summer June-July-August (JJA).

Evolution of climatic variables linked to water cycle

To better understand the evolution of water cycle over France between the two studied periods, it is interesting to study the evolution of climatic variables linked to water cycle after 1987/1988. Table 6 and Table 7 depicts the differences between the mean of 1988–2019 period compared to the mean of 1959–1987 period on each main production basin for liquid precipitation and potential evapotranspiration.

Table 6: Difference of 1988–2019 period compared to 1959–1987 period for potential evapotranspiration (PET) at the annual and seasonal scale. * indicates that the difference is significant according to Bayesian differences test (95% HDI).

| Production basin | Year | Winter (DJF) | Spring (MAM) | Summer (JJA) | Autumn (SON) |
|------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Zone 1 | 92.5* | 5.7* | 33.3* | 40.4* | 12.5* |
| Zone 2 | 93.7* | 3.0* | 29.8* | 44.4* | 14.9* |
| Zone 3 | 97.0* | 4.1* | 33.0* | 39.0* | 20.6* |
| Zone 4 | 87.1* | 3.2* | 30.5* | 42.1* | 10.3* |
| Zone 5 | 101.0* | 7.4* | 36.8* | 46.8* | 11.7* |
| Zone 6 | 138.2* | 13.2* | 42.3* | 53.9* | 28.7* |

Table 7: Same as Table 6 but for liquid precipitation (PRELIQ).

| Production basin | Year | Winter (DJF) | Spring (MAM) | Summer (JJA) | Autumn (SON) |
|------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Zone 1 | 80.4* | 42.8* | 1.5 | 18.6* | 3.8* |
| Zone 2 | 29.1* | 17.2* | -0.3 | 9.1* | -4.4* |
| Zone 3 | 2.8 | -8.7* | -7.3* | 6.6* | -2.1 |
| Zone 4 | 33.9* | -0.1 | 2.0 | 9.1* | 14.5* |
| Zone 5 | 49.9* | -2.3 | 11.0* | 7.0* | 29.0* |
| Zone 6 | -25.7* | -33.1* | -1.1 | -4.4* | -0.4 |

Potential evapotranspiration is increasing significantly in all zones and on all time scales studied after 1987/1988. Spring and summer, as expected, experience the most important difference between the two studied periods, following the evolution of temperature. In spring, most important increases in water demand are observed in Nord-Pas-de-Calais, Aquitaine Basin and Bourgogne/Rhône-Alpes production basins. Potential evapotranspiration summer increase is also very important in Parisian Basin, Aquitaine Basin and Bourgogne/Rhône-Alpes. North and Southwest of France endure the most

important rise in water balance outputs with the abrupt 1987/1988 warming, explaining the intensification and/or precocity of water stress events on those zones.

Cumulative liquid precipitation displays more contrasted changes spatially and seasonally. In spring, only Poitou-Charentes and Bourgogne/Rhône-Alpes regions show significant changes, respectively downward and upward. Relative stability of water balance inputs, especially on northern production basins, exacerbates water stress events precocity in spring. Summer changes are significantly positive on every production basin except in Aquitaine Basin, but less important than the changes in evapotranspiration. The rise in water balance inputs cannot counteract the increase in water balance outputs during this season. In autumn, cumulative liquid precipitation significantly increases in Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes regions, on a more important way than evapotranspiration, contributing to the soil water reservoirs filling. On northern production basins (zones 1 and 2), cumulative liquid precipitation changes cannot counteract the rise in evapotranspiration, lengthening water stress events in autumn.

Discussion

In this innovative study, we try to assess robustly the impact of temperature warming driven by climate change (long term signal) over France on winter wheat water balance and hydric stress. The abrupt warming in 1987/1988 provides two mean climatic states subperiods of sufficient temporal depth to statistically determine the structural modifications of hydric stress and drought.

The abrupt increase in minimal and maximal air temperature over France in 1987/1988 caused significant increase in evapotranspiration. Along with stable annual liquid precipitation amount, this led to soil water content decrease. These regional impacts of warming on climatic water balance evolution are consistent with studies at other scales (*Chaouche et al., 2010*). As the evolution of evapotranspiration depends on the vegetation cover water requirements, it is necessary to address specifically the evolution of our crop of interest water balance. In this study, we show that after the abrupt warming of 1987/1988, winter bread wheat crop experiences a drying of soil water content on almost all the main production basins. This induces an increase of the frequency and/or the intensity of days where soil reservoirs water content goes under stress threshold of 40%. Thus, the abrupt warming modifies hydric stress events distributions, in various ways depending on the season and the geographical zone. Over almost all production basins studied, hydric stress events after 1987/1988 are starting earlier in the year, lengthening up to mid-August. From June to August, the winter wheat grain filling stage is highly sensitive to drought (*Hlaváčová et al., 2018*). Thus, the drought risk exposure is increasing on those production basins. South West of France (zone 6) is the only production basin experiencing an offset of hydric stress event, starting and finishing earlier in the year after 1987/1988. This is probably due to anticipated phenological stages and harvest. As spring temperatures show the most important increase after the abrupt warming (*Brulebois et al., 2015*), the anticipated phenological stages could face similar evapotranspiration requirements as before 1987/1988. Risk exposure might then be similar on both subperiods on this production basin. The offset in the crop cycle also induces crop management constraints and vulnerability to other climatic hazards such as late cold spell or late frost.

Precipitation and evapotranspiration – i.e. inputs and outputs of water balance – evolutions are identified as drivers of water cycle modifications. We reveal that seasonal and spatial disparities in

differences between 1988 and 2019 and 1959–1987 period partly explain the evolution of REW and water stress events. *Raymond & Ullmann (2021)* also investigate intra-seasonal precipitation evolution on the 1950–2019 period through dry spells episodes. Northeast, center and Southwest of France experience an increase in the number of dry days (liquid precipitation < 1 mm). Precipitation distributions evolve since 1950 in North and Northeast of France, long and very long dry spells being more frequent from spring to September. Summer atmospheric drought extends into beginning of autumn. Those findings are key factors to clarify precocity and worsening of water stress on Nord-Pas-de-Calais and Parisian Basin zones. Winter season is less subject to dry spells, the number of dry days mainly remains constant or decreases on the French territory. The more important amount of precipitation counteracts losses due to spring, summer and autumn water stress events.

Drought events and heat-waves are linked by land–atmosphere feedback processes, intensifying and propagating each other (*Hartick et al., 2022; Miralles et al., 2019; Zhou et al., 2019*). The aggravation of drought conditions on the 1988–2021 period may have participated to the increase in frequency of heat-waves over Europe (*Poumadère et al., 2005; Schär et al., 2004; Teuling, 2018*). Heat-waves and drought events have various effects on wheat yields anomalies in France depending on the region (*Zampieri et al., 2017*). Higher temperatures lead to an increase in the atmospheric demand for water and reduce crop water-use efficiency. Extreme high temperatures, i.e. heat stress, induce direct plant damages by provoking perturbations in cellular structures and metabolic processes (*Nakamoto & Hiyama, 1999*). In this original work, we demonstrate that the structural changes in water cycle following the abrupt warming over France in 1987/1988 affect drought over winter wheat production basins. This would be interesting to study how extreme heat-waves, through negative land–atmosphere feedbacks, participated to those changes.

As hydric stress events are longer or more intense after 1987/1988, new phenological stages of the crop could be affected. On northern production basins, hydric stress appears in summer on the 1988–2021 period, altering grain forming and ripening, development stages that were rarely impacted on the 1960–1987 period (*Arvalis Institut du Végétal, 2022*). Production basins of the southern half of the country already encounter hydric stress events on the 1960–1987 period, but these last start earlier in the year on the 1988–2021 period. On those production basins, the number of days under hydric stress increase in spring after 1987/1988, and may affect bolting development stages (*Arvalis Institut du Végétal, 2022*).

Many studies showed the impact of water deficit on crop growth and development (*Chaves & Oliveira, 2004; Verslues et al., 2006*). Drought is the main abiotic constraint on cereal crops, ultimately affecting crop productivity (*Araus et al., 2002; Boyer, 1982*). This work reveals the impact of 1987/1988 abrupt warming on the increase in drought risk over winter bread wheat fields in France, which is identified as one of the causes of crop stagnation observed in the 1990s. This is confirmed in *Le Gouis et al. (2020)*, pointing out drought during stem elongation and grain filling phenological stages as drivers of wheat yields stagnation. As wheat is the main cultivated crop in France, covering almost 50% of surfaces cultivated in cereals in 2020, those findings raise concerns about the country's food security (*Agreste, 2021*).

The mean temperature is expected to rise by 2100, between 4 and 5°C at the global scale and more than 5°C in France under the most pessimistic scenario (*IPCC, 2021*). This warming is likely to result in further increases in evaporation and an intensification of the hydrological cycle (*Huntington, 2006*). *Douville et al. (2013)* demonstrated that anthropogenic radiative forcing impact latitudinal and decadal

differentiation of recent evapotranspiration variations. At the European continental scale, climate change could lead to the amplification of seasonal soil water index, even if precipitation simulations are still uncertain (*Planton et al., 2005*). Over France, evapotranspiration is expected to decrease in summer due to an important increase in meteorological and agricultural drought (*Dayon et al., 2018*). By 2100, intensity and spatial coverage of drought events are foreseen to increase dramatically, with stronger changes for agricultural droughts (*Vidal et al., 2012*).

Observed modifications of drought risk due to the abrupt warming in 1987/1988 in France and their impacts on crop growth and development combined with future expected evolution of drought risk are of major concern for the agricultural sector. Economic losses due to drought episodes are increasingly important and accelerate the need for better knowledge to limit damages and adapt strategies (*Charpentier et al., 2022; Hagenlocher et al., 2019*). Agricultural insurance industry, particularly vulnerable to adverse climatic events, is strongly affected by this crucial issue. Many studies tried to investigate the link between agro-climatic risk evolution and the agricultural insurance loss ratio (*Fusco et al., 2018*). Assessment of agro-climatic risk for food production is complex and depends on the geographical region studied, the crop characteristics and its growth and development modeling (*Ewert et al., 2015*). In France, the link between agro-climatic risk evolution and agricultural insurance loss ratio is already studied by insurance companies, but needs to be detailed by crop of interest and production basin.

Conclusion

This work aims at exploring the impact of the abrupt increase in air temperature in 1987/1988 in France on the evolution of water balance of winter bread wheat fields. On the 1988–2021 period, winter bread wheat main production basins all experience a decrease in water balance daily mean cycle compared to 1960–1987 period. The latter exceeds stress threshold in various ways depending on the season and the geographical area. Nord-Pas-de-Calais and Parisian production basins experience more longer and more intense hydric stress events after 1987/1988, particularly in summer. On Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitaine production basin, the number of days under hydric stress increases substantially in spring, lengthening hydric stress episodes. Modifications in hydric stress events distributions after 1987/1988 abrupt warming are expected to impact winter bread wheat growth and development, and affect yields. The evolution of climatic hazard after 1987/1988 abrupt warming and associated agro-climatic risk link to drought highlighted in this study are of major concern for the agricultural sector, including insurance industry. Drought risk modifications regarding 1987/1988 climatic shift are multifactorial, driven by both potential evapotranspiration and precipitation evolution. The magnitude of changes in these elements may be exacerbated by natural climate variability. Along with the mechanical increase in potential evapotranspiration, dry spells evolution could have foster drought conditions over the country. Further investigations are needed to support this. Since the 2014/2015 years a new abrupt warming seems to appear over France. As a consequence, four of the five last years have experienced severe drought conditions. Such rapid warming may happen again in the future, accelerating the need for disentangling the effects of radiative forcing and natural variability to better understand their causes and impacts.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This work is part of a CIFRE PhD supported by Groupama Rhône-Alpes Auvergne insurance company. In this context, we would like to acknowledge Claude Perrot – head of Domaine Assurance Récolte of the company and scientific manager of the CIFRE PhD student – and Xavier Aubouy – data scientist in the Pricing and Analysis Department of Groupama Mutuelle d'Assurance company and administrative manager of the CIFRE PhD student – for their help in the methodology development and data collection, and their listening and advices.

Chapitre 3 : Le réchauffement
climatique à l'échelle régionale
augmente l'occurrence et l'intensité du
risque sécheresse pour le blé tendre
d'hiver.

5.1. Partie 1 : Avant-propos

Les aléas climatiques sont l'une des causes principales de la variation des rendements des cultures en France, notamment ceux du blé et du maïs (Ceglar *et al.*, 2020). Le changement climatique modifie le risque agro-climatique, pouvant mener à une baisse de la production alimentaire (Gaupp *et al.*, 2020). Le cycle de l'eau est particulièrement impacté par la hausse des températures, via des modifications de l'évapotranspiration et des précipitations (Yao *et al.*, 2020). En France, la hausse abrupte des températures détectée en 1987/1988 a également impacté les composantes du cycle de l'eau local (Brulebois *et al.*, 2015), avec une hausse importante de la contrainte hydrique en été et au début de l'automne, mise en évidence dans les travaux présentés dans le premier chapitre de cette thèse. Le deuxième chapitre montre que ces variations de l'aléa climatique affectent le bilan hydrique du blé tendre d'hiver. La culture subit des épisodes de stress hydrique plus longs et/ou plus intenses selon le bassin de production considéré et la saison étudiée. Le risque agro-climatique lié à la sécheresse sur le blé est donc modifié suite à la hausse rapide des températures. La France étant le premier producteur de blé de l'Union Européenne depuis plusieurs années, l'évaluation du risque agro-climatique pesant sur ses rendements est un enjeu clé (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022). Celle-ci est également cruciale pour les assureurs proposant des contrats MultiRisque Climatique (MRC), dont la performance et la pérennité dépendent de l'impact du climat sur la production agricole. Dans la continuité des travaux précédents présentés dans ce manuscrit, l'objectif de cette section est donc de caractériser les modifications structurales du risque agro-climatique lié à la sécheresse sur les cultures d'intérêt de cette thèse. Là encore, les résultats présentés dans l'article se focalisent sur le blé tendre d'hiver.

La hausse rapide des températures de 1987/1988 en France délimite entre 1960 et 2014 deux périodes de respectivement 28 et 27 ans, permettant d'évaluer de manière robuste l'impact de ce changement structurel de l'aléa climatique sur le risque agro-climatique. Une nouvelle hausse rapide des températures est mise en évidence sur le pays en 2014/2015. Même si la dernière période délimitée est plus courte (7 ans entre 2015 et 2021), les deux réchauffements rapides révélés sur le pays donnent l'opportunité d'investiguer (i) les changements dans la structure du risque agro-climatique lié à la sécheresse et (ii) si ces changements sont similaires ou non dans l'espace et dans le temps. La prise en compte de la vulnérabilité des cultures étudiées dans la modélisation du bilan hydrique, via la modélisation de la croissance de la culture, permet une détermination précise de l'évolution des paramètres du risque agro-climatique lié à la sécheresse pour la culture d'intérêt, ici le blé tendre d'hiver.

Dans cet article, le risque sécheresse est évalué en utilisant conjointement la modélisation au pas de temps quotidien du bilan hydrique du blé tendre d'hiver – basée sur une chaîne de modélisation comprenant un modèle de croissance en degrés-jours et un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs (Jacquart & Choisnel, 1995) – et l'application d'un seuil de vulnérabilité en-dessous duquel la culture est considérée en situation de stress hydrique. Cela permet de développer un indice de stress hydrique cumulé annuel, calculé pour chaque année entre 1960 et 2021 et chaque point de grille de résolution 8km de la base de données climatiques réanalysées Safran-Isba-Modcou (SIM) (Soubeyrou *et al.*, 2008). La profondeur de la série temporelle disponible confère une robustesse statistique pour analyser de manière pertinente les changements structuraux du risque sécheresse de part et d'autre de chacune des hausses abruptes de températures en France détectées en 1987/1988 et 2014/2015. Les distributions des indices de stress hydrique annuel cumulé montrent des caractéristiques similaires

à celles des distributions de la famille de Tweedie : une combinaison d'évènements discrets (stress ou pas stress) et continus (intensité du stress), avec une inflation de zéros, une forte asymétrie et des queues de distributions plus ou moins épaisses (*Tweedie, 1984*). Les indices de stress hydrique cumulé annuel sont donc modélisés pour chaque bassin de production majoritaire du blé tendre d'hiver en utilisant les distributions de Tweedie, ce qui permet d'investiguer les changements dans l'occurrence et l'intensité des évènements de sécheresse de manière régionalisée (*Dunn, 2004*).

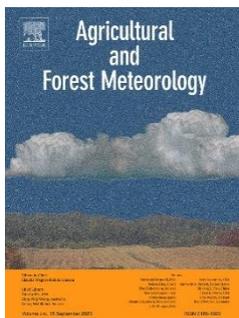
Les résultats montrent que les modifications de l'aléa climatique ont affecté de manière importante les distributions du stress hydrique sur tous les bassins de production du blé. La modélisation avec Tweedie révèle des changements variables dans l'intensité et l'occurrence des évènements de stress hydrique, selon les périodes et les bassins de production étudiés. Après 1987/1988 par exemple, le bassin de production Parisien expérimente une hausse conjointe de l'occurrence et de l'intensité des évènements de stress hydrique. Les bassins de production du Nord-Pas-de-Calais, du Centre, de Bourgogne/Rhône-Alpes et Aquitain montrent quant à eux une augmentation de l'occurrence mais une baisse de l'intensité des évènements de stress hydrique, l'inverse est constaté sur le bassin de production du Poitou-Charentes. Ces variations peuvent être reliées aux évolutions de la demande évaporative et de la contrainte hydrique mises en évidence dans les chapitres précédents, notamment à la hausse importante de la demande évaporative au printemps et l'extension de la contrainte hydrique en début d'automne après 1987/1988, qui induisent un allongement des périodes pendant lesquelles le sol s'assèche et où la culture peut subir un stress hydrique. En définitive, l'indice de stress hydrique moyen augmente après chaque hausse abrupte de température sur tous les bassins de production français. En moyenne sur tous les points de grille de tous les bassins de production rassemblés, la période 1988-2014 connaît une hausse du nombre d'évènements de stress hydrique par rapport à la période 1960-1987, et la période 2015-2021 connaît une intensification des évènements de stress hydrique par rapport à la période 1988-2014. Les évènements de stress hydrique extrêmes sont aussi impactés par l'augmentation des températures. La proportion d'années où l'indice de stress hydrique excède le 90^{ème} percentile des indices de stress hydrique de tous les bassins de production de la période 1960-1987 augmente de manière importante à chaque période étudiée, particulièrement sur les bassins de production du Nord-Pas-de-Calais, Parisien et du Poitou-Charentes, qui sont les bassins de production principaux. Sur certains points de grille, après les réchauffements de 1987/1988 et 2014/2015, 40% des années dévoilent un indice de stress hydrique extrême. La hausse de la demande évaporative et l'allongement des séquences sèches au printemps et en été sur ces zones peuvent expliquer ces modifications des évènements de sécheresse extrêmes (*Raymond & Ullmann, 2021*).

L'élaboration d'un indice de stress hydrique et sa probabilisation ont permis de caractériser les modifications structurelles et régionalisées du risque agro-climatique lié à la sécheresse sur la culture du blé tendre d'hiver en France. L'étude met en évidence des spécificités géographiques marquées, notamment après 2014/2015 où les épisodes de stress hydrique extrêmes s'étendent vers de plus hautes latitudes. Les résultats sont en accord avec d'autres études qui montrent une évolution de l'occurrence et de l'intensité des sécheresses avec le réchauffement climatique, ainsi qu'une intensification des évènements extrêmes (*Grillakis, 2019; Spinoni et al., 2018*). De telles modifications du risque sécheresse peuvent être reliées à des pertes de rendement, notamment pour les cultures telles que le blé et le maïs (*Daryanto et al., 2016; Hendrawan et al., 2022*). Les changements dans les composantes du cycle de l'eau et ses indices associés – par exemple l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index en anglais,

SPEI), ou encore les longues séquences sèches – peuvent être directement reliés aux variations de rendement de ces cultures (Mohammed et al., 2022; Raymond et al., 2018; Zampieri et al., 2017). L'indice de stress hydrique développé dans cette thèse constitue un indicateur encore plus fin de l'évolution du risque agro-climatique sécheresse, puisqu'il prend en compte dans son élaboration les caractéristiques phénologiques des cultures d'intérêt. Dans un contexte de changement climatique global, où les sécheresses agricoles en France devraient devenir plus intenses et s'étendre spatialement (Vidal et al., 2012), il devient urgent de mieux comprendre le lien entre la production agricole et le risque agro-climatique lié au stress hydrique. D'autant plus que l'impact du stress hydrique sur le rendement des cultures dépend de la culture étudiée et de son stade de croissance (Jamieson et al., 1995; Le Gouis et al., 2020). Dans le cadre de la collaboration avec Groupama, l'étude du lien entre l'indice de stress hydrique développé dans ces travaux – propre à chaque culture étudiée – et le ratio sinistre à prime (S/P) des contrats d'assurance MultiRisque Climatique (MRC), pour chaque culture d'intérêt, pourrait permettre d'évaluer la pertinence de l'utilisation de cet indice plutôt qu'un autre indicateur de la sécheresse qui ne serait pas spécifique à une culture donnée. Si la corrélation entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique spécifique à la culture d'intérêt est améliorée par rapport à l'utilisation d'un autre indicateur, alors la modélisation de l'indice de stress hydrique sur la période future pourrait permettre de mieux prévoir l'évolution structurelle du risque, et ainsi de tester la performance des contrats MRC dans leur capacité à couvrir ce risque futur. Les assureurs pourraient ainsi proposer des mesures de prévention et d'adaptation à leurs clients exploitants, pour chaque type de culture, afin de limiter l'impact du changement climatique sur les rendements.

L'approche utilisée dans ces travaux, permettant d'évaluer l'impact d'une hausse rapide des températures sur le risque sécheresse, est d'importance pour réfléchir ces stratégies d'adaptation, au regard du réchauffement climatique futur, qui pourrait se traduire en France par de nouvelles augmentations abruptes des températures. L'étude régionalisée du risque agro-climatique et sa prise en compte dans le développement de stratégies d'adaptation permettraient de préserver l'équilibre nécessaire à une approche assurantielle mutualiste et contribueraient à maintenir une production alimentaire suffisante dans le pays.

Article :



Laurent, L., Ullmann, A., & Castel, T., in preparation. Regional climate warming increase occurrence and intensity of winter wheat drought risk. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*.

5.2. Regional climate warming increase occurrence and intensity of winter wheat drought risk.

Laurent Léa^{a, b, *}, Albin Ullmann^a, Thierry Castel^a

^aBiogéosciences, UMR 6282 CNRS, université Bourgogne Franche-Comté, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

^bDomaine Assurance Récolte, Groupama Rhône-Alpes Auvergne, 24 rue Charles Durand, 18020 Bourges Cedex, France

*Corresponding author. Email address: lea.laurent@u-bourgogne.fr

Abstract

Over the 1960-2021 period, France experienced two rapid increases in 2m air temperature, in 1987/1988 and 2014/2015. Between 1960-1987 and 1988-2014 periods, this induced significant differences in the mean state of climatic components of the local water cycle. Evolving climate hazard linked to water cycle led to water balance modifications, especially in winter bread wheat fields. This work aims at analyzing resulting changes in agro-climatic risk linked to drought after each abrupt warming. For each grid point of the Safran-Isba-Modcou (SIM) dataset and each year, daily values of Relative Extractible Water (REW) under wheat stress threshold of 40% are cumulated, to give a water stress index. The modeling of water stress index distributions using Tweedie family distributions allows to disentangle modifications in frequency and intensity of drought events. These display various changes depending on the wheat production basin and the period studied. Overall, the mean water stress index is rising on every production basin, Nord-Pas-de-Calais and Parisian production basins being particularly impacted by the 1987/1988 abrupt warming. Our results highlight that modifications of climate hazard lead to harsher hydric stress events over main French wheat production basins. The probability of extreme drought events is rising strongly in several production basins. Changes in agro-climatic risk linked to drought are one of the main factors affecting crop growth cycle and development. As the probability to overcome risk threshold increases, yields may be significantly reduced, and economic losses could rise. This is of major concern for the agricultural sector, including crop insurers, and enhance the need for adaptation and prevention measures.

Keywords

Agro-climatic risk, drought, winter wheat, abrupt warming, water balance

Introduction

After a constant increase in cereal yields during the second half of the 20th century thanks to genetic advances and the use of inputs (*Gervois et al., 2008*), Europe experience a decline in this growth trend (*Calderini & Slafer, 1998*). Several crops encounter a stagnation or even a decreasing trend in their potential yields in some areas of the continent (*Grassini et al., 2013; Supit et al., 2010*). In France, growth of yields has stopped since the 1990s for several crops, such as winter wheat, barley, oats or durum wheat for example (*Schauberger et al., 2018*). Several causes are identified to explain this yield stagnation, such as changes in crop management practices or in legislation on fertilizers use, slowdown in genetic improvement and climate hazard (*Hawkins et al., 2013; Lin & Huybers, 2012*).

Wheat is particularly impacted by this yield stagnation, the inflection point appearing during the 1990s for many departments (*Brisson et al., 2010*). As France is the first wheat producer of the European Union in 2020, this deceleration of winter wheat harvest questions the food security of the continent (*Agreste, 2021*). With the increase in world food requirements, this statement represents a major societal issue (*Shiferaw et al., 2013*).

Climate hazard is one of the main causes of maize and wheat yields variation in France (*Ceglar et al., 2020*). With climate change, the agro-climatic risk is expected to be modified, leading to lower food production (*Gaupp et al., 2020*). In France, as in the entire Western Europe, over the 60 years, climate change results in an abrupt increase in surface temperatures, occurring around the 1987/1988 (*Brulebois et al., 2015; de Laat & Crok, 2013*). Both maximal and minimal temperatures are impacted, and spring and summer seasons show the highest differences between 1961-1987 and 1988-2013 periods with respectively 1.55°C and 1.31°C for maximal temperatures in France (*Brulebois et al., 2015*). Several factors have been identified to explain this rapid increase in surface temperature over Western Europe (*J. Robson et al., 2012; Terray & Boé, 2013*). The substantial warming of the North Atlantic Ocean due to North Atlantic Oscillation (NAO) variations and the decrease in the use of aerosols coupled with global warming seem to have played a major role in this regional abrupt warming (*Booth et al., 2012; Evan et al., 2009; Sutton & Dong, 2012*). After 1988, a slight positive trend in temperatures up to 2000 is followed by a 10-years hiatus due to La Nina conditions (*Meehl et al., 2011*). This delimits both sides of 1987/1988 two stationary periods of approximately same temporal length, differing from their mean temperature. More recently, a new strong surface temperature increase is observed around 2014/2015 years, suggesting a new climate warming process over France (*Laurent et al., under review*).

Such rapid warming in surface temperature impacts water cycle through modifications in evapotranspiration (*Yao et al., 2020*). In France, spring depicts a high increase in evapotranspiration, following the abrupt warming of 1987/1988. But in summer, water constraint is rising significantly, with the emptying of soil water reservoirs. From spring to the beginning of autumn, the increase in potential evapotranspiration and, in a second step, the lengthening of dry spells, play a major role in the intensification of water constraint (*Laurent et al., under review*). Those modifications of climate hazard linked to water cycle after the 1987/1988 climate shift is expected to affect agro-climatic risk, as the risk is the combination of hazard and vulnerability. Vegetation cover is highly affected by increased water constraint, leading to decline in forest growth or yield losses for example (*Creed et al., 2015; Daryanto et al., 2016*).

In France, wheat water balance is strongly affected by the abrupt changes in climate hazard around 1987/1988, leading to harsher hydric stress events altering the crop growth cycle (*Laurent et al., 2023*).

As France is the first wheat producer of the European Union since several years, the assessment of drought risk on wheat crops is a key issue (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022*). The assessment of risk parameters and their evolution is crucial for the socio-economic world of agriculture, especially for insurers, policy makers and governments (*Dragos et al., 2023*). The rapid increase in surface air temperature in France in 1987/1988 delimits along 1960-2014 two periods of respectively 28 and 27 years. This allows to assess robustly how this structural change in climate hazard affects agro-climatic risk. In France, wheat production is spread over several main production basins with different pedo-climatic characteristics. This offers the opportunity to investigate how agro-climatic regions are affected by climate warming. Furthermore, recent works suggest that a new warming shift occurs around 2014/2015 over France (*Laurent et al., under review*). Even if it displays a shorter period of 7 years between 2015 and 2021, dividing the 1988-2021 period into two sub-periods (1988-2014 and 2015-2021), this new rapid warming is of interest to investigate (i) if drought risk structure changes and (ii) if the changes are or not similar in space and time.

This original study aims at estimating structural changes in drought risk over the main wheat pedo-climatic production basins in France. More specifically, drought is assessed from both daily computation of water balance, for winter wheat crop, based-on a simplified two-reservoirs water balance model (*Jacquart & Choisnel, 1995*), and on the application of a threshold below which wheat is considered under hydric stress. This led us to develop a winter wheat annual water stress index. The index is computed for each year and for each 8km grid-points of the reanalysis of surface climate data that cover the six main French winter wheat crop basins. As the climatic dataset start from 1959, they are relevant to statistically investigate structural changes in the water stress index and consequently in drought risk. To this aim, we introduce the use of the Tweedie distribution to model simultaneously the occurrence and the intensity of drought events (*Dunn, 2004*).

Material and methods

Study area and datasets

The Safran-Isba-Modcou (SIM) model, developed by Météo France (*Habets et al., 2008; Soubeyrou et al., 2008*), consists in an 8km-resolution reanalysis chain combining the Safran meteorological analysis system (*Durand et al., 2009*), the Isba land surface model (*Noilhan & Planton, 1989*) and the Modcou hydrogeological model (*Ledoux et al., 1989*).

All the climatic variables used in this work come from the Safran module. This analysis system of the atmospheric forcing is based on robust vertical interpolation method of the main meteorological parameters (*Durand et al., 1993*). Both the Météo France observation network and the outputs of atmospheric models (Arpège or ECMWF) are used in the model, solar radiation terms are estimated using radiative transfer model. 8 meteorological parameters are analyzed at an hourly time-step on more than 9000 grid points (*Soubeyrou et al., 2008*), including liquid precipitation needed to compute water balance. Safran offers a continuous and uniform spatial and temporal information covering the entire French territory. The model also computes Potential EvapoTranspiration (PET) using Penman-Monteith equation (*Allen et al., 1998*). Several studies account for the relevance of the meteorological analysis, especially for the precipitation and air temperature fields (*Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010*).

The SIM chain starts from the 1st of August 1958 and is updated periodically until present time. In this study, a 63-years' time depth period is selected from 1959 to 2021 to model water balance at a daily time step for each grid point of the French territory using winter bread wheat characteristics. This allows to distinguish three climate regimes based on 1987/1988 and 2014/2015 rapid temperature warmings.

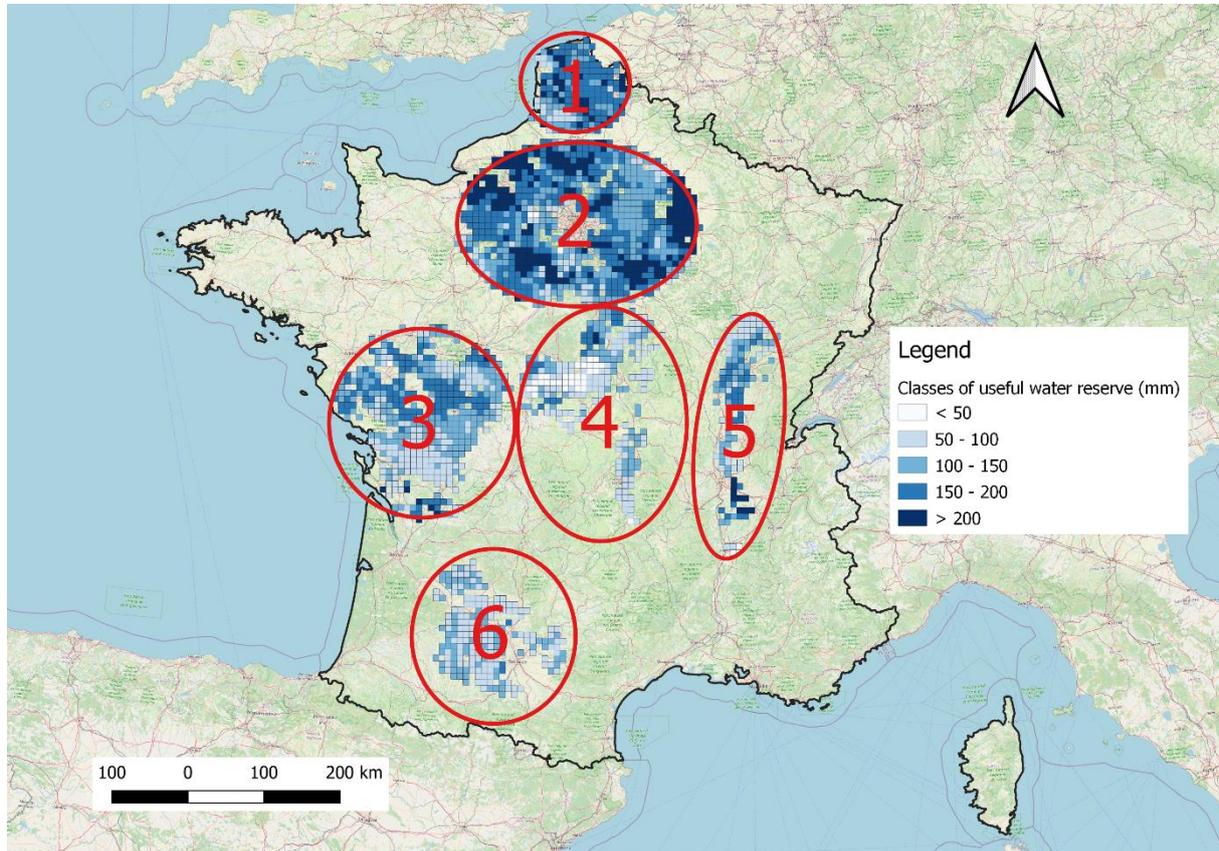


Figure 21: Map of the main winter bread wheat production basins in metropolitan France and associated useful soil water reserve. The area of each SIM grid point shown is covered by at least 10% wheat fields according to the 2019 survey of the Registre Parcellaire Graphique (Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019). Blue colors correspond to classes of useful water reserve (mm, see map legend). Red contours represent main winter bread wheat production basins: 1. Nord-Pas-de-Calais, 2. Parisian Basin, 3. Poitou-Charentes, 4. Centre, 5. Bourgogne/Rhône-Alpes, 6. Aquitain Basin. The background map comes from OpenStreet Map database.

The capacity of soil water reservoirs, required for water balance modeling, comes from the GISSol database (*Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011; Le Bas, 2018*). The mean of each class of useful water reserve is weighted by the surface of the class for each SIM grid point and averaged with the other classes of the grid point (Figure 21).

Table 8: Agronomic, pedologic and climatic characteristics of the six winter wheat production basins studied. Period 1: 1960-1987; period 2: 1988-2014; period 3: 2015-2021. PET: Potential EvapoTranspiration, PRELIQ: liquid precipitation. Production basins 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitaine production basins. * indicates that the difference is significant according to Bayesian differences test (95%HDI).

| Production basin | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
|---|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mean percentage of SIM grid point covered by winter wheat fields | | | 25.9 | 24.2 | 18.2 | 19.3 | 14.9 | 15.8 | |
| Useful water reserve (mm) | | | 161 | 165 | 125 | 95 | 126 | 100 | |
| Δ period 2 – period 1 (mm) | Year | PET | 99.3* | 100* | 103* | 87.0* | 95.6* | 135* | |
| | | PRELIQ | 80.9* | 25.7* | 3.80 | 37.1* | 55.1* | -12.8* | |
| | Spring | PET | 36.8* | 33.9* | 36.1* | 33.3* | 38.2* | 43.3* | |
| | | PRELIQ | -1.51 | -4.02* | -8.81* | -1.87 | 9.47* | 2.08 | |
| | Summer | PET | 80.7* | 82.3* | 76.8* | 72.9* | 78.7* | 94.1* | |
| | | PRELIQ | 19.7* | 4.75* | -1.98 | 12.0* | 15.4* | 3.63* | |
| | Autumn | PET | 52.1* | 50.3* | 58.1* | 43.3* | 47.9* | 70.1* | |
| | | PRELIQ | -0.514 | -11.3* | -6.98* | 16.2* | 41.3* | 12.1* | |
| | Winter | PET | 43.4* | 38.2* | 41.2* | 38.6* | 46.3* | 57.4* | |
| | | PRELIQ | 55.2* | 22.9* | -5.05* | 3.21 | 8.93* | -22.0* | |
| | Δ period 3 – period 2 (mm) | Year | PET | -17.8* | -5.83* | -10.3* | 27.2* | 70.8* | 17.0* |
| | | | PRELIQ | -15.4* | -5.55* | -6.69* | -39.0* | -58.1* | -7.44* |
| | | Spring | PET | -7.79* | -9.13* | -5.81* | -3.93* | 7.44* | 0.604* |
| | | | PRELIQ | -5.94* | 3.71* | 6.25* | 8.14* | 6.47* | -11.3* |
| Summer | | PET | -10.1* | -1.50 | -6.77* | 20.7* | 55.8* | 16.0* | |
| | | PRELIQ | -30.1* | -19.3* | 2.89* | -30.9* | -24.1* | -21.1* | |
| Autumn | | PET | -11.8* | -11.5* | -6.65* | 3.93* | 21.2* | 2.38* | |
| | | PRELIQ | -6.20* | 5.08* | -30.2* | -19.6* | -43.5* | -36.0* | |
| Winter | | PET | -7.63* | -11.1* | -8.50* | -4.98* | 8.33* | 0.182 | |
| | | PRELIQ | 15.9* | 31.4* | 31.1* | 33.5* | 22.3* | 24.5* | |

The analysis of water stress modifications is conducted in this work over each main winter bread wheat production basin (Figure 21). The latter are defined by first selecting all the grid points on which at least 10% of the surface is covered by winter bread wheat fields according to the 2019 agricultural

survey called Registre Parcellaire Graphique from the French Mapping Agency (*Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019*). Then main production basins are designed by selecting groups of grid points in French agricultural basins, and approved by field insurance experts. The impact of the abrupt warming on water stress index is thus assessed for the six main winter wheat production area: Nord-Pas-de-Calais, Parisian Basin, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain Basin regions. Each production basin is characterized by its climate, its useful water reserve and its wheat covering (Table 8).

Phenology and water balance modeling

The characteristics and phenology of the crop of interest are taken into account in the water balance model through Maximal EvapoTranspiration (MET), corresponding to the amount of water a given crop can evapotranspire under optimal soil water content and actual climatic conditions (*Allen et al., 1998*). MET can be computed by weighting the PET by the crop coefficient, named Kc, that depends on the phenological stage of the crop, i.e., the development stage.

Start date of each phenological stage is assessed for each SIM grid point by using a growing degree-days (GDD) model developed on R language (*R Core Team, 2021*). The growing degree-days needs to reach each specific phenological stage of winter bread wheat crop come from *Gate (1995)*. Growing degree-days are computed on a 0°C basis, starting at a sowing date on the 1st of November, from 1959 to 2021. When the growing degree-days needs of a phenological stage is achieved, the start date of this phenological stage is extracted, allowing to assess a Kc to each day. Daily Kc values are used to weight the PET to provide daily MET values for each grid point from 1959 to 2021. Daily MET is needed as input for water balance modeling.

In this study, we used a simplified two-reservoirs water balance model computing daily water balance on a given crop (*Jacquart & Choisnel, 1995*). The model uses several input variables: liquid precipitation and MET. The useful water reserve, also called RU, summarizes the soil water reservoir capacity i.e., the maximum extractable water in the soil, and is also needed as input to the model. Although this model does not involve an explicit resolution of surface energy balance equation, it displays good performance when compared to a model using a surface energy balance equation, such as in the Earth model for example (*Choisnel, 1985*). The model computes numerically and iteratively, at daily time step, the variation in soil water content as:

$$\frac{dW}{dt} = P - ET - D \quad (1)$$

where dW is the change in soil water content between two successive days (dt), balanced between water input from liquid precipitation (P), water loss from evapotranspiration (ET), and water loss as drainage (D).

The model assumes for each grid point that, on January 1st of 1959, their soil water storage on a homogeneous soil texture, called $R(t)$, is full. The inferior limit for $R(t)$ is 0 when soil water reservoirs are empty, the superior limit is the useful water reserve, called RU . So, for a given day, available soil water content is given by:

$$R(t) = \begin{cases} RU & \text{if } R(t-1) + dW > RU \\ R(t-1) + dW & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

The RU value is fixed for each SIM grid point (see Study area and datasets). $R(t)$ water storage is managed by decomposing soil water content in two reservoirs: the surface reservoir ($R1(t)$) supplied by liquid precipitation and emptying in case of water excess in the deep reservoir ($R2(t)$). It gives an accurate representation of the dependence of evaporation on soil water content near surface, and allows to better account for the impact of dry and wet sequences succession on water availability, especially during spring and summer seasons. In the Earth model, the Actual EvapoTranspiration (AET)/MET ratio drops significantly when the $R(t)/RU$ ratio is going under 60% (Choisnel, 1985). Through those findings, in the simplified two-reservoirs water balance model used in this study, the partition of the surface (RU1) and deep (RU2) reservoirs corresponds respectively to 40% and 60% of the total RU. For more details on the simplified two-reservoirs water balance model see Jacquart & Choisnel (1995), and for more details on the water balance modeling methodology of this study see Laurent et al. (2023).

Water balance is computed continuously between 1959 and 2021. Note that 1959 is considered as spin-up and is removed from statistical analysis.

Water balance analysis

Vegetation cover is considered under water stress when the proportion of the capacity of soil water reservoirs, or water balance, falls below a threshold (Granier et al., 1999). The threshold for which plant growth and development starts to diverge from a reference value varies according to several factors, such as evaporative demand, root distribution and soil texture (Sadras & Milroy, 1996). For example, in Meyer & Green (1980), the winter wheat leaf growth starts to decrease when 52 to 57% of the RU is used. Wheat evapotranspiration declines when soil water reservoirs are 20 to 30% full, and its growth slows down around 34% of the RU. Another substrate based experiment estimated that the limit of extractable water for wheat is 39.7% (Norikane et al., 2003). Regarding previous findings, this work considers a water stress threshold fixed at 40% of the total RU of each point, under which winter bread wheat growth is affected by water stress (Jacquart & Choisnel, 1995).

A useful index that accounts for variability in water-storing capacity is the relative extractable water (REW), expressed here as:

$$REW = \frac{R(t)}{RU} \text{ with } R(t) = R1(t) + R2(t) \quad (3)$$

where $R1(t)$ and $R2(t)$ are respectively the t day amount of water in the surface and deep reservoirs. The daily REW mean cycle is computed for each SIM grid point along the 1959-2021. Spatial and temporal aggregations for each winter bread wheat production basins are computed to analyze the evolution of REW daily mean cycle with abrupt warmings.

From there we consider, as previously shown, that water stress is assumed to occur when REW drops below 40% (REW_c i.e., critical REW) of the maximum extractable water (RU). Hence, daily Soil Water Deficit (SWD , in mm) is computed against this threshold as:

$$SWD(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } REW(t) \geq REW_c \\ 0.4 * RU - R(t) & \text{if } REW(t) < REW_c \end{cases} \quad (4)$$

Based on those daily differences and to compare wheat production basins, an index quantifying the water stress experienced by a crop during a specific period is required. Such index may summarize

both duration and intensity of the water stress. Following *Granier et al. (1999)*, we propose a water stress index (I_s) that cumulates daily soil water deficit (SWD) on an annual scale. I_s is computed as:

$$I_s = \sum_{t=January1}^{t=December31} SWD(t) \quad (5)$$

with water stress index (I_s) expressed in mm. I_s is computed for each of the grid points covering the six winter wheat production basins. From there, for one grid point and for a given year, two cases are possible. First, no water stress is observed (i.e., $I_s = 0$). Second, winter wheat experiments water stress (i.e., $I_s > 0$) of a particular amount. This amount indicates drought.

In order to statistically assess drought risk, it is necessary to simultaneously account for (i) the probability that a drought occurs and (ii) its intensity. The difficulty with drought risk modelling is that water stress is continuous with exact zeros. One of the statistical models able to dive with a mixture of discrete and continuous distributions is the Tweedie model. The latter was successful at modeling precipitation (*Dunn, 2004*) or frost stress (*Castel et al., 2017*), which are also a mixture of discrete and continuous processes.

Modeling drought risk with Tweedie distributions

Annual water stress index distributions may produce various forms of probability density functions, revealing for instance an inflation of zeros and more or less thick tails. Poisson-gamma distributions, belonging to the class of Tweedie models (*Jørgensen, 1987; Tweedie, 1984*), offer unified framework to model zero-inflated asymmetric histogram with thicker or thinner tail. In this work, we applied such a model to fit the histograms of water stress index derived from each of the period bounded by the abrupt rises in surface temperature. Due to its mathematical properties, the parameters of the fitted distributions allow to infer the mean of occurrence and intensity of drought events. The evolution of these two parameters with warming enables us to assess structural changes in drought risk.

Results

Water balance daily mean cycle modifications

Water balance, or REW, daily mean cycle displays, as expected, values close to 1 for the fall and winter seasons, when soil reservoirs are full (i.e., at field capacity), while spring and summer values are decreasing (Figure 22). A value close to 0 indicates that soil reservoirs are empty, i.e., at permanent wilting point.

In this part, only results merged for all the grid points of all the production basins are depicted (Figure 22), to illustrate the methodology used to study water stress events. But the analysis of REW daily mean cycle on each wheat production basin reveals spatial disparities in the pattern of evolution after the abrupt warmings (Supplementary Figure 3).

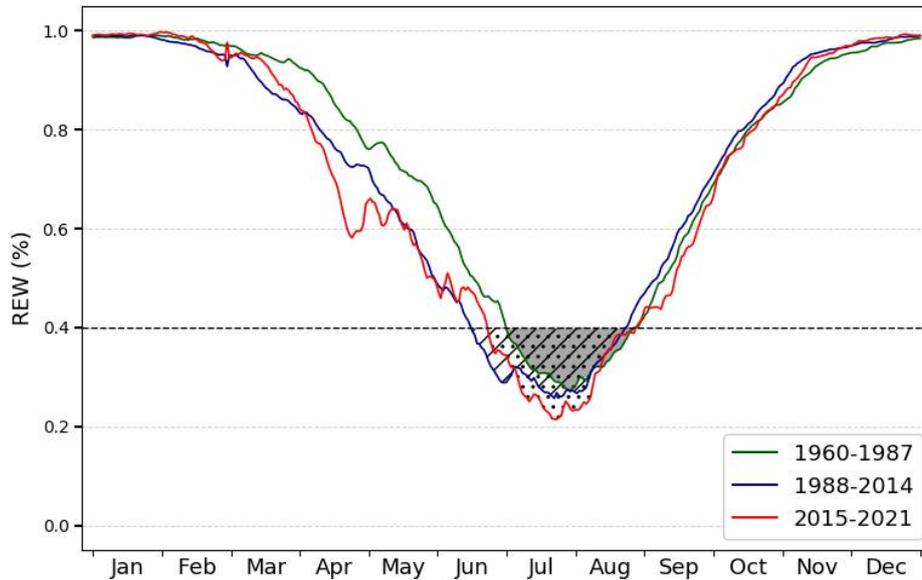


Figure 22: Water balance daily mean cycle for all winter bread wheat production basins. Green: daily mean for 1960–1987 period; blue: daily mean for 1988-2014 period; red: daily mean for 2015-2021 period. Black dashed line: stress threshold. Gray, line and point fillings represent the annual cumulative hydric stress index (mm).

Over all the winter wheat production basins, the abrupt warmings of 1987/1988 and 2014/2015 significantly affected water balance cycle (Figure 22). Minimum water storage occurs in the end of July/beginning of August on the 1960-1987 period, with an average of 30% of soil water reservoirs filled, while during the 1988/2014 period, minimum water storage shifts by about a week with approximately 25% of reservoirs filled. REW is going under stress threshold almost 20 days sooner during the 1988-2014 period than during the 1960-1987 period, and the water stress event – materialized with gray, dots or bars filling – is finishing 5 days earlier. At the end of June, a strong decrease in REW up to almost 30% occurs during the 1988-2014 period but not for the 1960-1987 period. Clearly, climate warming affects more the emptying of the reservoir than its filling.

During 2015-2021 period, minimum REW occurs between the 15th and the 20th of July with almost 20% fill rate. Start date of the hydric stress event is occurring a week later on the 2015-2021 period compared to 1988-2014 period, but no clear shift in the end date of hydric stress event is detected. This is a preliminary trend that is likely to evolve over the coming years as a function of regional warming conditions.

1987/1988 and 2014/2015 abrupt warmings show different effects on water balance in all the wheat production basins, as in each of them independently (Supplementary Figure 3). Figure 22 shows that the first abrupt warming induced a shift in water stress events, becoming longer and more intense on the 1988-2014 period than in the 1960-1987 period. Since the 2014/2015 abrupt warming, the drought trend led to more intense but slightly shorter water stress events.

To study more precisely changes in water stress events both sides of each rapid warming, the average water stress index (represented by gray, dots and points filling on Figure 22) are computed for each

SIM grid point and each year, analyzed through histograms and modeled with Tweedie distributions. This allows us to identify changes in the occurrence and/or the intensity of drought events on each wheat production basin.

Water stress index evolution and drought risk modifications

The rate of cases (i.e. one grid-point and one year) with no water stress ($y(x = 0)$ on the graph) falls dramatically – divided by two on the 1988-2014 period compared to 1960-1987 period – on all the wheat grid points (Figure 23). This rate slightly increases on the 2015-2021 period compared to the 1988-2014 period, but is still under the 1960-1987 value. This latter trend is to be confirmed in view of the short number of years covered. Figure 23 displays a shift in non-zero water stress events, which are intensifying with time. The proportion of low water stress index ($> 500\text{mm}$) is decreasing between each studied period, whereas the mean value of the water stress index is increasing between the 1960-1987 period and the 1988-2014 period and between the 1988-2014 period and the 2015-2021 period. This analysis over all the winter wheat production basins is applied over each production basin independently, to study how water stress index evolves with abrupt warming on various geographic zones (Figure 24).

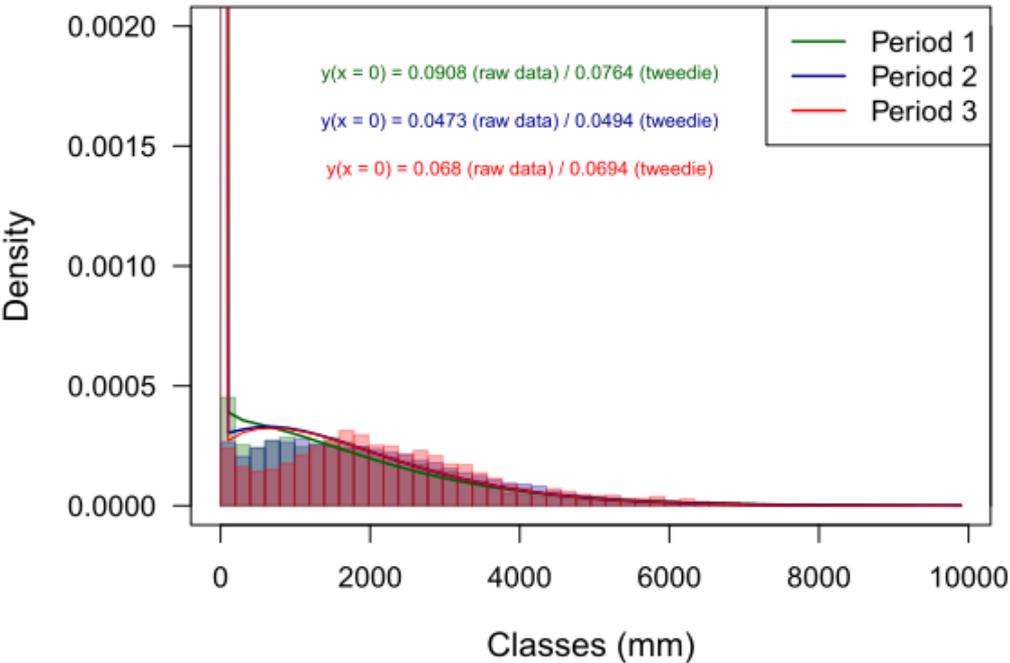


Figure 23: Density histograms of annual water stress index (mm) for all winter bread wheat main production basins and associated Tweedie distributions. Green bars: 1960-1987 period; blue bars: 1988-2014 period; red bars: 2015-2021 period. The first class on the far left (zero water stress) is represented by a thinner bar, the associated density value (exceeding y limits) is written in the corresponding colored text.

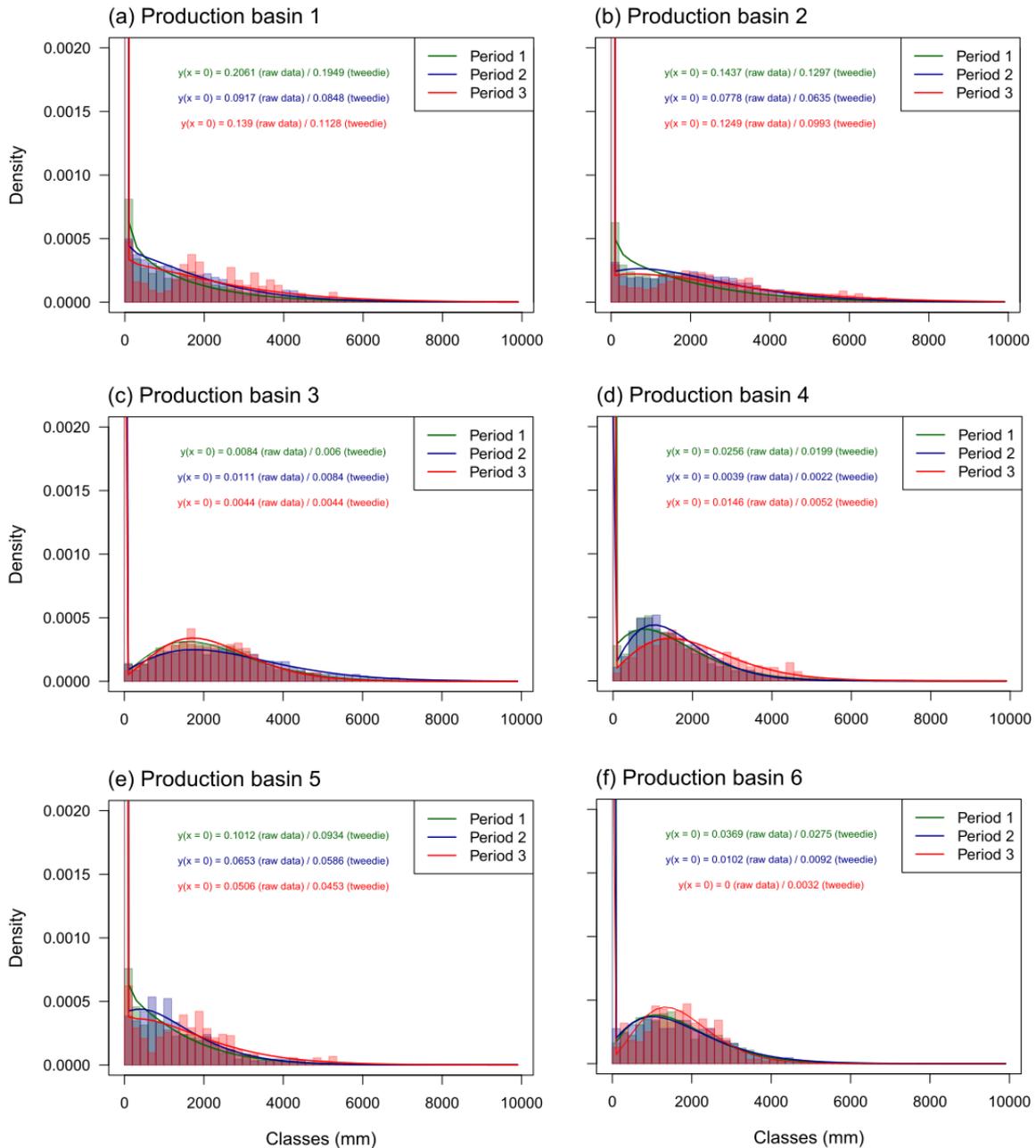


Figure 24: Same as Figure 23 but for each winter bread wheat production basin.

The rate of cases with no water stress ($y(x = 0)$ on the graph) is decreasing on the 1988-2014 period compared to the 1960-1987 period for all the wheat main production basins except Poitou-Charentes (Figure 24). Between the 1988-2014 and 2015-2021 period, the evolution is more contrasted. Nord-Pas-de-Calais, Parisian Basin and Centre production areas (n°1, 2 and 4) display a slight increase in the proportion of no-stress cases, whereas Poitou-Charentes, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain Basin production areas (n°3, 5 and 6) experience a decrease.

No-stress cases display various evolutions depending on the production basin (Figure 24). On almost every production basin, the proportion of water stress events with low intensity (i.e., annual

cumulative hydric stress index < 500mm) is decreasing with time. The mean value of water stress index seems to shift towards higher values between 1960-1987 and 1988-2014 periods for Nord-Pas-de-Calais, Parisian Basin, Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes production basins (n°1, 2, 4 and 5), and between 1988-2014 and 2015-2021 periods for Centre and Aquitaine Basin production areas (n°4 and 6).

As explained in the 2.4 section (see Modeling drought risk with Tweedie distributions) Tweedie distributions closely match water stress index distributions, with the presence of a zero-inflation and more or less thick tails (Figure 23 and Figure 24). Kolmogorov-Smirnov tests show significant similarities between the distributions of water stress index and fitted Tweedie distributions for the three studied periods and for all the production basins, with p-values above 0,5 (Supplementary Table 2). Kolmogorov-Smirnov tests on each production basin independently reveal more contrasted correlation results, but many production basins and studied periods exhibit significant similarities between the two distributions. Water stress index distributions modeling provides estimates of occurrence and intensity of water stress events. This allows to study changes in the distribution parameters both sides of each abrupt warming on the main wheat production basins, and consequently to assess drought risk changes. All those parameters are gathered in the Table 9, with the mean value of water stress index for each production basin and period.

The analysis on all the production basins reveals an increase in occurrence and intensity of wheat drought risk after the rapid 1987/1988 warming., which conceals subtleties depending on the subperiod of warming considered. A strong increase of water stress occurrence is depicted on the 1988-2014 period compared to the 1960-1987 period (around 25%), but a slight decrease in their intensity (2%) (Table 9). Opposite trends are observed between the 1988-2014 and the 2015-2021 periods, with 7% decrease in the occurrence but 14% increase in their intensity. Overall, winter wheat production basins experience an important rise in the mean water stress index of 23% and 6% respectively for 1987/1988 and 2014/2015 abrupt warmings.

As for the histograms, distribution parameters of water stress events display geographical disparities over the country (Table 9). In the Nord-Pas-de-Calais and the Centre production basins, the events of water stress are more than 50% more frequent on the 1988-2014 period than on the 1960-1987 period, but also respectively 8% and 33% less intense. In the Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitaine production basins, hydric stress events are respectively 20% and 30% more frequent, but also 4% and 19% less intense. On the contrary, in the Poitou-Charentes production basin, hydric stress events are 6% less frequent but 28% more intense. In the Parisian Basin, hydric stress events are both more frequent (35%) and slightly more intense (less than 1%).

Between the 1988-2014 and the 2014-2015 periods, Nord-Pas-de-Calais, Parisian Basin and Centre production basins experience a decrease in the frequency of hydric stress events but an increase in their intensity. Poitou-Charentes and Aquitaine production basins encounter an increase in occurrence but a decrease in intensity of water stress events, and in the Bourgogne/Rhône-Alpes production basin both occurrence and intensity are rising. These results on the second abrupt warming have to be taken carefully as the temporal depth of the 2015-2021 period is substantially lower than the one of the two first periods and is less than 20 years.

Table 9: Mean occurrence and intensity of water stress events according to the fitted Tweedie distributions and mean water stress index (mm). Period 1: 1960-1987, period 2: 1988-2014, period 3: 2015-2021. Production basins 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain production basins.

| Production basin | Period 1 | | | Period 2 | | | Period 3 | | |
|------------------------------|------------------|---------------------------------------|--|------------------|---------------------------------------|--|------------------|---------------------------------------|--|
| | Number of events | Mean intensity of an event (mm/event) | Mean cumulative hydric stress index (mm) | Number of events | Mean intensity of an event (mm/event) | Mean cumulative hydric stress index (mm) | Number of events | Mean intensity of an event (mm/event) | Mean cumulative hydric stress index (mm) |
| All production basins | 2.57 | 645 | 1660 | 3.24 | 632 | 2050 | 3.01 | 722 | 2180 |
| 1 | 1.64 | 686 | 1120 | 2.47 | 628 | 1550 | 2.18 | 880 | 1920 |
| 2 | 2.04 | 772 | 1580 | 2.76 | 777 | 2140 | 2.31 | 1057 | 2440 |
| 3 | 5.11 | 440 | 2250 | 4.78 | 563 | 2690 | 5.43 | 410 | 2220 |
| 4 | 3.92 | 385 | 1510 | 6.13 | 257 | 1580 | 5.25 | 395 | 2080 |
| 5 | 2.37 | 476 | 1130 | 2.84 | 457 | 1300 | 3.09 | 529 | 1540 |
| 6 | 3.59 | 462 | 1660 | 4.69 | 373 | 1750 | 5.74 | 301 | 1730 |

Consequently, for both abrupt warmings and every production basin – except Poitou-Charentes and Aquitaine Basin on the 2014/2015 abrupt warming – the mean value of the water stress index is increasing significantly with time. The northernmost production basins experience the highest increases over the 1988-2014 period compared to the 1960-1987 period, with 38% and 36% for respectively Nord-Pas-de-Calais and Parisian Basin. Nord-Pas-de-Calais and Centre production basins show the largest increase in the mean cumulative hydric stress index over the 2015-2021 period compared to the 1988-2014 period, with respectively 24% and 32%.

To summarize, modifications in winter wheat water balance cycle with abrupt warmings led to changes in water stress events and drought risk. Their occurrence and intensity increase after the 1987/1988 warming shift. However, the results show non-homogeneous changes during the 1988-2021 period. Indeed, drought risk evolves in various ways depending on the sub-period (1988-2014 or 2015-2021) and on the production basin studied. Overall, the mean value of the water stress index rises after the rapid increase in surface air temperature on almost every French winter wheat main production basin.

Geographical pattern of extreme hydric stress index evolution

This last section investigate how each SIM grid point of the wheat production basins reacts to changes in the extreme values of the water stress index, to assess spatial changes on a sub-regional scale. The 90th percentile of water stress index is determined for the 1960-1987 period and for all the winter wheat SIM grid points using Tweedie R package (*Dunn & Smyth, 2005*). Figure 25 illustrates, for each of the three studied periods, the proportion of year for which the water stress index overcomes the 90th percentile value described before.

On all the production basins except Centre, the rate of SIM grid points exceeding the 90th percentile is rising on the 1988-2014 period compared to the 1960-1987 period (Figure 25a). On many of those SIM grid points, the probability to overcome 90th percentile is increasing strongly between period 1 and period 2. Parisian and Poitou-Charentes production basins experience the most important increase in the probability to exceed 90th percentile. On the 1960-1987 period, the grid points of those production basins had between 10 and 30% of chances to overcome extreme water stress events, whereas on the 1988-2014 period, some grid points overcome this threshold more than one year out of two. Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitaine production basins grid points almost didn't encounter extreme water stress events on the 1960-1987 period. On the 1988-2014 period, SIM grid points on those production basins have between 10 and 20% of chances to overcome 90th percentile of the water stress index of the 1960-1987 period.

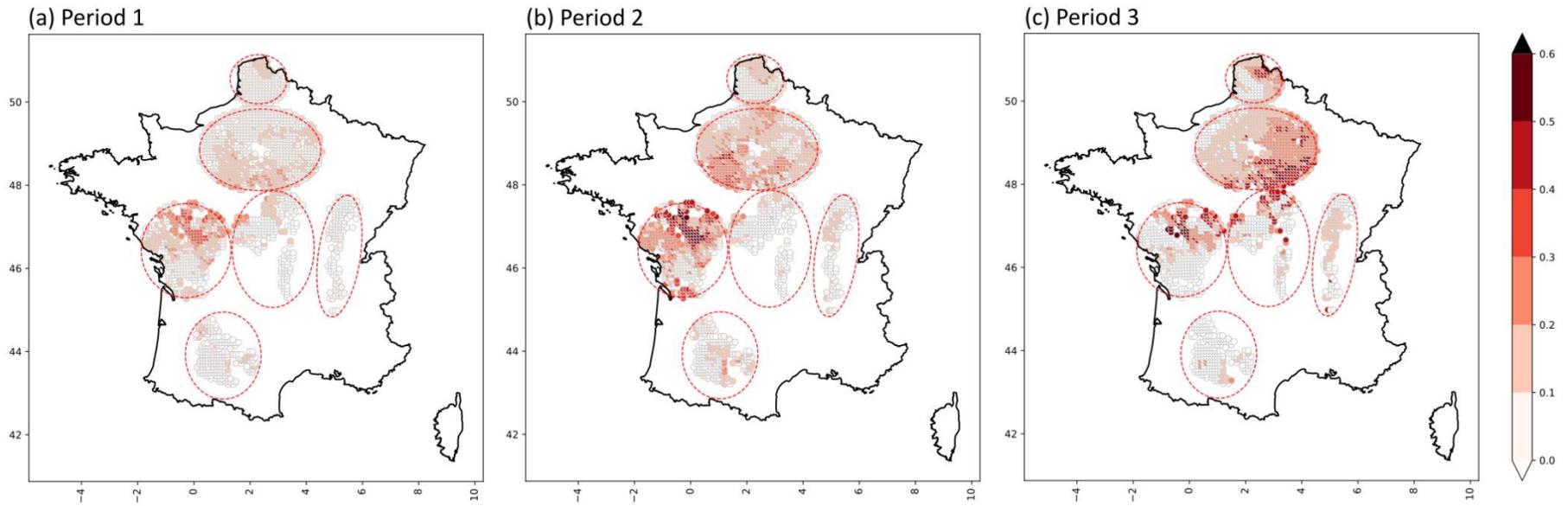


Figure 25: Proportion of years exceeding the 90th percentile of the water stress index of all the winter bread wheat production basins of the 1960-1987 period. (a) Period 1: 1960-1987; (b) period 2: 1988-2014; (c) period 3: 2015-2021.

Between the 1988-2014 and 2015-2021 periods, the probability to exceed 90th percentile reveals more contrasted changes. Poitou-Charentes and Aquitaine production basins show a decrease in the number of grid points overpassing the 90th percentile, in contrast to the other zones. Nord-Pas-de-Calais and Parisian production basins grid points almost all exceed the threshold at least one time out of ten on the 2015-2021 period. On this period, almost half of the Parisian production grid points have more than 20% of chances to overcome the 90th percentile. On several grid points of the Parisian, Poitou-Charentes and Centre production basin, the threshold is exceeded more than 4 times out of 10.

After the rapid warmings in surface air temperature, French winter wheat production basins encounter strong increase in water stress events intensity. Northern production basins and Poitou-Charentes production basin are particularly impacted by the 1987/1988 abrupt warming, with an important increase in the probability to experience extreme water stress events. The other production basins reveal more various changes. Along with changes in occurrence and intensity of mean value of the water stress events, the abrupt surface temperature warmings induced more widespread and frequent extreme drought over almost all winter wheat production basins.

Discussion

This groundbreaking study aims at characterizing changes in winter wheat water stress events and drought risk parameters after an abrupt warming using Tweedie distributions. Statistical distributions of water stress index display patterns that Tweedie distributions can fit well. These distributions are a combination of discrete (when no hydric stress) and continuous processes. 1987/1988 rapid surface air temperature warming delimits over the 1960-2014 period two climate states subperiods of sufficient and almost same temporal depth to statistically determine structural modifications of drought risk (occurrence and intensity). In this work, we also try to carry out an initial assessment of the preliminary impact of 2014/2015 abrupt warming on winter wheat water stress, even if the temporal depth of the 2015-2021 period is not long enough to robustly and fully evaluate significant changes in drought risk. However, it allows to show that drought risk evolutions over this last period vary spatially.

The increase in water demand after the abrupt warmings in France led to modifications in climatic water balance, with a significant increase in water demand leading to soil water content decrease (*Chaouche et al., 2010; Laurent et al., 2023*). Over winter bread wheat production basins, water balance daily mean cycle reveals various changes. Depending on the production basin considered, the period for which water balance is under the stress threshold is longer or shifts earlier in the year, or the minimum REW daily mean cycle is lower on the post-shift period compared to the pre-shift period. The rapid warming affects more the emptying of the reservoir than its filling, which can be due to the fact that spring experiences a more important warming than autumn after 1987/1988 (*Brulebois et al., 2015*). Over the entire country, 1987/1988 abrupt warming led to longer and slightly more intense periods under water stress threshold, and 2014/2015 abrupt warming induced more intense and slightly shorter periods of hydric stress.

Water balance modeling results must be considered in relation to the modeling chain used in the study. As explained in the 2.2 section (see Phenology and water balance modeling), crop phenology is modeled using a simple growing degree-day model. When compared to REW coming from a modeling chain using a more complex phenological model, STICS (Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures

Standard, *Brisson et al., 2009*), REW appears to be overestimated between March and November (Supplementary Figure 4). This could be due to the fact that the crop coefficient is reaching its maximum value ($K_c = 1,1$) earlier in the year and for a longer period with the simple growing degree-day phenological model compared to the STICS model (Supplementary Figures 5 and 6). The choice of the phenological model used in the water balance modeling chain is thus an important factor affecting the assessment of changes in water balance and hydric stress events. This does not change the impact of warming on drought risk, except in terms of amplitude of change.

The changes in climatic hazard linked to water balance result in changes in agro-climatic risks, especially drought risk. In this study, we show that the water stress index distributions are significantly modified on every wheat production basin after the abrupt warmings. Tweedie modeling reveals changes in occurrence and intensity of water stress events that are not homogeneous with the considered period and show also subtle regional modifications. Some wheat production basins experience an increase in occurrence but a decrease in intensity, others encounter opposite effects, and the latter go through a rise in both occurrence and intensity of water stress. Ultimately, the water stress index is increasing after both abrupt warmings on every wheat production basin. Over all the winter wheat production basins in average, 1987/1988 abrupt warming induced an increase in the number of water stress events, and 2014/2015 warming led to more intense water stress. Each time, the mean water stress index is rising strongly.

Extreme drought events are also impacted by the abrupt increase in surface air temperature over France. The probability to overcome the 90th percentile of water stress index of all the wheat production basins is increasing sharply, especially on the Nord-Pas-de-Calais, Parisian and Poitou-Charentes production basins, which are the main production areas. On some grid points of those zones after 1987/1988 and 2014/2015 abrupt warmings, the probability to experience extreme water stress for wheat is exceeding 40%. Note that on some grid points of Poitou-Charentes and Aquitaine production basins, the probability to go through extreme drought events is decreasing on the 2015-2021 period compared to the 1988-2014 period. This could be explained by the evolution of the annual amount of liquid precipitation and mean length of dry spell in spring and summer (result not shown). On those seasons, France is divided into two zones with a north-west/south-east axis. East of this axis, a lengthening of dry spells is highlighted, whereas west of the axis, mean length of dry spells is decreasing (*Raymond & Ullmann, 2021*). This decrease could offset the effects of temperature warming on drought risk evolution. Conversely, to the east of the north-west/south-east axis, Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes production basins experience an increase in PET and a lengthening of dry spells in spring and summer, leading to an increase in the probability to overcome extreme water stress events after 2014/2015 abrupt warming.

Those results are in line with others studies at a larger spatial or temporal scale. *Spinoni et al. (2018)* show that over western Europe, drought events intensity and occurrence evolve with climate change. On the historical period, temperature warming leads to a moderate but almost generalized rise in drought occurrence and intensity at the annual scale in France/Benelux region, spring being particularly impacted by a strong increase. Future scenarios of temperature warming point out a critical increase in agricultural drought spatio-temporal characteristics over France (*Vidal et al., 2012*). Severe and extreme soil moisture drought occurrence and intensity are expected to drastically increase up to 2100 over France and Europe (*Grillakis, 2019*).

Several factors are involved in the impact of climatic shifts on wheat water balance and drought. At the annual scale, Parisian and Poitou-Charentes production basins experience an important increase in PET between 1960-1987 and 1988-2014 periods, but only a slight increase in liquid precipitation (Table 8). This important climatic water balance deficit – also highlighted on a seasonal scale in spring and summer (Table 8) – could explain the important rise in water stress index on those zones (Table 9), and the increase in extreme drought events probability (Figure 25). Aquitain Basin also undergo through an important increase in PET after 1987/1988 abrupt warming but a decrease in liquid precipitation (Table 8), but the impact on wheat water stress is less pronounced (Table 9 and Figure 25). On this production basin, hydric stress event is not more intense or longer, but shifts earlier in the year (Supplementary Figure 3). This could be explained by a shift in the crop growth cycle, the maturity being reached earlier in the year. The strong increase in PET in spring between 1960-1987 and 1988-2014 periods could have foster the shift in water stress event towards spring (Table 8). The low useful water reserve of the Aquitain Basin may explain the development of water stress already during the 1960-1987 period. The strong increase in PET between 1988-2014 and 2015-2021 periods on the Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes production basins at the annual scale and in summer, and the decrease in liquid precipitation (Table 8) – enhancing the decline in climatic water balance – are identified as possible causes of the strong increase of the mean value of the water stress index and in extreme drought events probability (Figure 25).

Such changes in drought events parameters can be correlated with yields losses, as for example for maize and wheat that are particularly affected by drought events modifications (*Daryanto et al., 2016; Hendrawan et al., 2022; Mohammed et al., 2022*). In Spain for example, wheat yields are strongly linked to dry spells (*Raymond et al., 2018*). This study highlights the role of liquid precipitation in the evolution of drought events. The absence of liquid precipitation combined with the increase in evaporative demand with temperature warming leads to increased drought risk. In France, *Zampieri et al. (2017)* show spatial disparities in the correlation between the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and wheat yields anomalies. Mediterranean regions are more sensitive to drought while northern parts of the country result to be more sensitive to water excess. It would be interesting to compare yield anomalies with the water hydric stress index computed in this work. Note that the extreme drought event of 2003 in France and Europe dramatically affected primary productivity, including crop yields (*Ciais et al., 2005*).

Modifications of drought events characteristics after the abrupt warmings affect different phenological stages of the crop. More intense drought events in summer can alter grain forming and ripening, longer water stress events can spill over spring and affect bolting development stages (*Arvalis Institut du Végétal, 2022*). *Jamieson et al. (1995)* for example, demonstrated that wheat yield response to drought was mostly associated with grain number, which is determined between June and July. Drought during stem elongation is also a driver of wheat yield stagnation (*Le Gouis et al., 2020*). Thus, depending on drought intensity and occurrence changes on each winter wheat production basin, different yields components will be affected, leading to a decrease in wheat harvests.

In the context of climate change, the mean surface temperature is expected to increase continuously up to more than 5°C by 2100 under the Radiative Concentration Pathway (RCP) 8.5 scenario in France (*IPCC, 2021*). As a result, the hydrological cycle will intensify, with further increase in evapotranspiration (*Douville et al., 2013; Huntington, 2006*). Over France, those changes are likely to occur mostly in summer (*Boé et al., 2009; Chauveau et al., 2013*). In this season, evapotranspiration is expected to decrease, leading to an important increase in meteorological and agricultural drought

(Dayon *et al.*, 2018). By 2100, spatial coverage and intensity of agricultural drought events are foreseen to drastically increase (Vidal *et al.*, 2012).

Modifications of water stress intensity and occurrence after the abrupt warmings in France and their impacts on wheat yields, together with future expected changes in drought events, highlight the need for adaptation of the agricultural sector. Agricultural insurance industry, especially crop insurance, is particularly vulnerable to adverse climatic events. Assessment of the impact of changes in agro-climatic risk linked to drought on yields and, by extension, on economic losses, is of major concern for crop insurers (Hagenlocher *et al.*, 2019). Some studies tried to link drought indices with economic cost, but few of them have focused on crop insurance losses, especially in France (Charpentier *et al.*, 2022; Fusco *et al.*, 2018; Hagenlocher *et al.*, 2019). The impacts of agro-climatic risks changes, especially drought events modifications, and agricultural insurance loss ratio needs to be investigated more closely in our country, to better adapt the agricultural system to future challenges.

Conclusion

In this work, we explore how the winter bread wheat agro-climatic risk linked to drought can be modeled using Tweedie distributions, and how its parameters evolve with abrupt surface temperature warming. The studied period goes from 1960 to 2021, and is divided into three sub-periods according to the two rapid warming signals detected over France: 1987/1988 and 2014/2015. Spatial and temporal evolutions of drought risk are studied by computing a water stress index for each SIM grid point and each year from 1960 to 2021. Histograms of water stress index for each sub-period and each main winter wheat production basin are the result of a mixture of continuous and discrete processes (stress or no stress), showing an inflation of zeros values (no stress), and an asymmetry with more or less thick tails. Tweedie distributions are able to capture the characteristics of discrete and continuous compound processes, and can be used to model water stress index distributions.

Tweedie modeling clearly reports and supports modifications in occurrence and intensity of drought events on each winter bread wheat production basin with abrupt warmings. Changes in both parameters depends on the production basin studied, and the periods compared. Overall, the mean water stress index rises for all the studied zones. Occurrence and intensity of drought events increase in average on all the winter wheat production basins. Nord-Pas-de-Calais, Parisian and Poitou-Charentes production basins experience the most important increase in water stress index after 1987/1988. Those production basins also experience a strong increase in extreme drought events probability, several grid points of those zones having more than 4 chances out of 10 to experience extreme water stress along the 1988-2014 period, compared to 2 or 3 chances out of 10 during the 1960-1987 period. 2014/2015 rapid temperature increase also impacted drought risk. Nord-Pas-de-Calais, Centre and Bourgogne/Rhône-Alpes production basins show the most important rises in water stress index and extreme drought events probability.

In this study, we demonstrate that climate hazard evolution at regional scale, through the rapid surface temperature increase over France, induced modifications of winter bread wheat water balance, leading to significant changes in water stress occurrence and intensity. Structural drought risk evolution could affect crop growth and development, and ultimately alter yields. Resulting economic losses is of major concern for the agricultural sector, especially crop insurance industry. Such abrupt

warming may happen again in the future over France, accelerating the need for a better knowledge of the evolution of agro-climatic risk linked to drought and its impacts on yields and insurance losses.

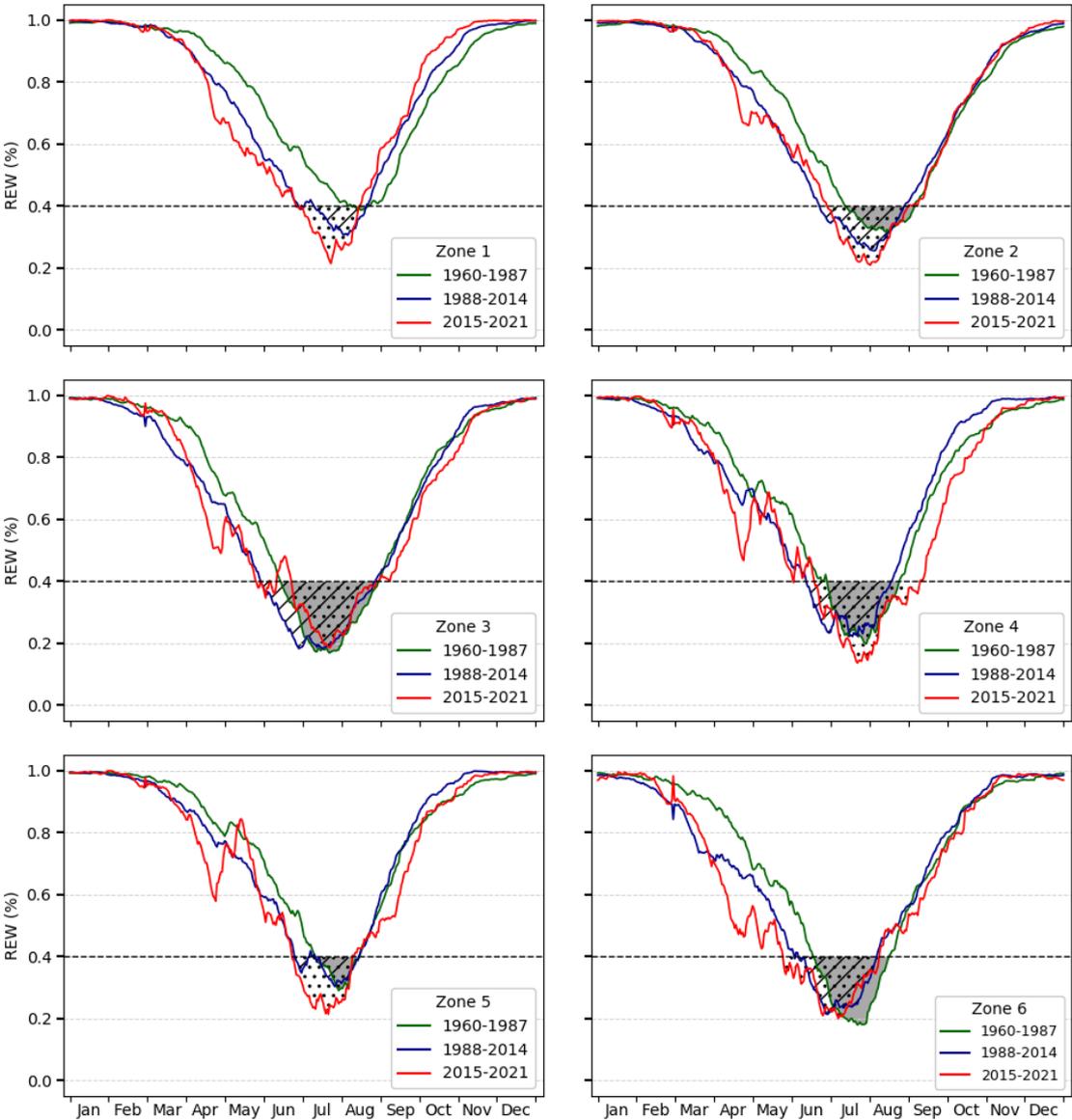
Authors contributions

Léa Laurent, **Albin Ullmann** and **Thierry Castel** designed methodology, **Léa Laurent** implemented the computer code for modeling, applied statistical techniques to analyze modeling results and wrote the original manuscript draft. **Albin Ullmann** and **Thierry Castel** supervised the project, contributed to interpret the results and reviewed and edited the manuscript.

Acknowledgments

This work is part of a CIFRE PhD supported by Groupama Rhône-Alpes Auvergne insurance company. In this context, we would like to acknowledge Claude Perrot – head of Domaine Assurance Récolte of the company and scientific manager of the CIFRE PhD student – and Xavier Aubouy – data scientist in the Pricing and Analysis Department of Groupama Mutuelle d'Assurance company and administrative manager of the CIFRE PhD student – for their help in the methodology development and data collection, and their listening and advices.

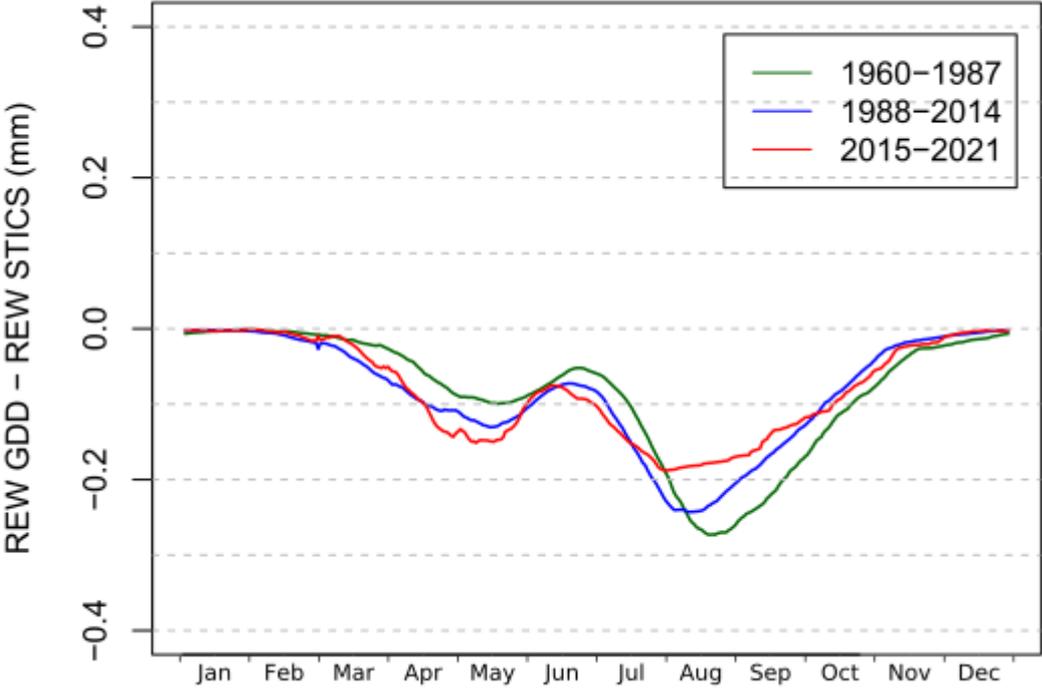
Supplementary Material



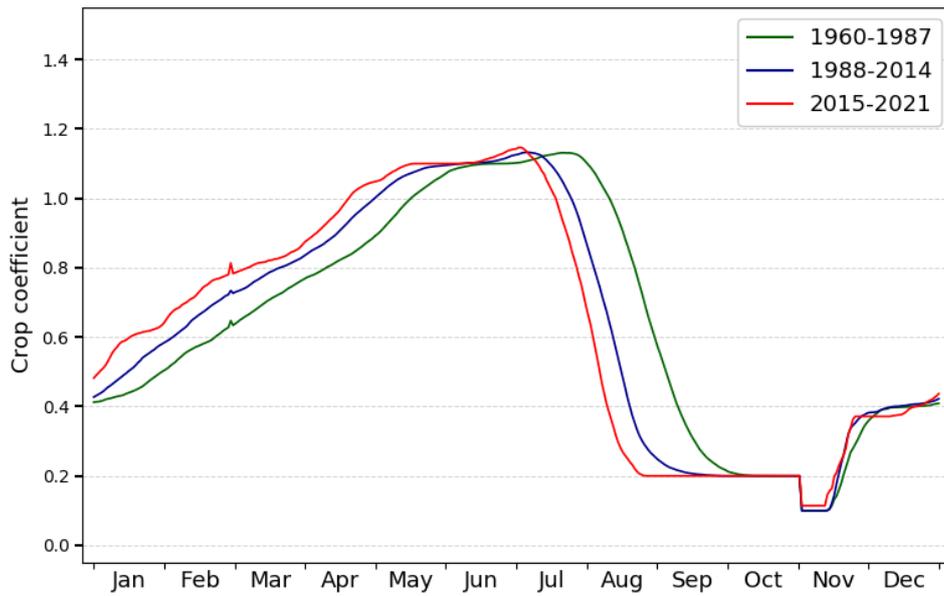
Supplementary Figure 3: Water balance daily mean cycle for each winter bread wheat main production basin. Green: daily mean for 1960–1987 period; blue: daily mean for 1988-2014 period; red: daily mean for 2015-2021 period. Black dashed line: stress threshold. Gray, line and point filling represent the annual cumulative hydric stress index (mm). Zones 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain production basins.

Supplementary Table 2: Kolmogorov-Smirnov test p-values for each period and each production basin. Period 1: 1960-1987, period 2: 1988-2014, period 3: 2015-2021. Production basins 1, 2, 3, 4, 5, 6 respectively Nord-Pas-de-Calais, Parisian, Poitou-Charentes, Centre, Bourgogne/Rhône-Alpes and Aquitain production basins.

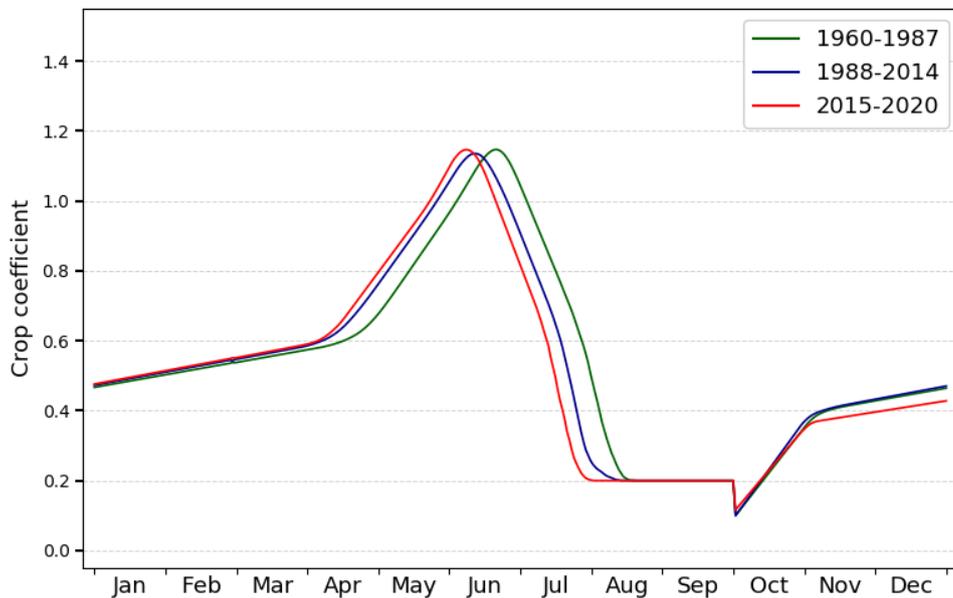
| Production basin | Period 1 | Period 2 | Period 3 |
|-----------------------|----------|----------|----------------------|
| All production basins | 0.28 | 0.72 | 0.41 |
| 1 | 0.013 | 0.043 | 0.12 |
| 2 | 0.28 | 0.56 | 0.41 |
| 3 | 0.12 | 0.99 | 0.00078 |
| 4 | 0.0035 | 0.19 | 0.00078 |
| 5 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 |
| 6 | 0.0069 | 0.0017 | 4.2×10^{-7} |



Supplementary Figure 4: Comparison of water balance daily mean cycle computed using growing degree-day model for phenology modeling and water balance daily mean cycle computed using STICS model for phenology modeling. Green line: water balance daily mean cycle on the 1960-1987 period; blue line: water balance daily mean cycle on the 1988-2014 period; red line: water balance daily mean cycle on the 2015-2021 period.



Supplementary Figure 5: Crop coefficient daily mean cycle for all winter bread wheat production basins. Green: daily mean for 1960–1987 period; blue: daily mean for 1988–2014 period; red: daily mean for 2015–2021 period. Black dashed line: stress threshold. Gray, line and point filling represent the annual cumulative hydric stress index (mm). Start date of each phenological stage is computed using a simple growing degree-day model.



Supplementary Figure 6: Same as Supplementary Figure 5 but start date of each phenological stage is computed using STICS crop model (Brisson et al., 2009).

Discussion générale

6.1. Impacts du réchauffement abrupt sur le bilan hydrique du maïs et de la vigne

Les travaux présentés dans ce manuscrit portent majoritairement sur l'analyse du risque agro-climatique lié à la sécheresse sur la culture du blé tendre d'hiver. Mais l'appréhension du risque est culture-dépendante. L'impact de l'aléa climatique varie selon l'espèce végétale considérée et son stade de développement, définis par la vulnérabilité de la culture (*Dai et al., 2020*). Les stades sensibles à la sécheresse peuvent, selon la culture considérée, apparaître à des périodes différentes dans l'année, et ainsi modifier la saisonnalité du risque. Il semble donc intéressant, en discussion de ce manuscrit, d'investiguer l'impact de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau sur d'autres cultures, afin d'avoir une vision plus exhaustive des modifications du risque sécheresse. Cela pourrait permettre également d'évaluer si les facteurs principaux d'évolution du stress hydrique sont les mêmes sur d'autres cultures, par exemple si les changements dans la demande évaporative et les séquences sèches jouent toujours un rôle prépondérant.

Dans le cadre du contrat CIFRE, le choix des autres cultures d'intérêt a été fait en accord avec les besoins de l'entreprise. Le maïs et la vigne constituant, avec le blé, les cultures majoritaires du portefeuille de Groupama, elles ont été choisies pour le diagnostic de l'évolution du risque agro-climatique sécheresse sur leurs parcelles. Les résultats d'évolution du bilan hydrique et du risque sécheresse du maïs et de la vigne suite au réchauffement abrupt des températures sont présentés dans cette partie.

6.1.1. Le cas du maïs

Le bilan hydrique du maïs a été modélisé avec le modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs (*Jacquart & Choissnel, 1995*) en utilisant des données d'ÉvapoTranspiration Maximale (ETM) calculées à partir des dates d'apparition de chaque stade phénologique issues du modèle STICS (collaboration avec Renan Le Roux de l'unité AgroClim de l'INRAE d'Avignon). Trois variétés ont été choisies afin d'analyser l'impact de la hausse des températures en France sur des cycles de croissance plus ou moins longs : une variété de cycle court (Meribel), une variété de cycle moyen (Furio), et une variété de cycle long (Cecilia). Dans cette partie, seuls les résultats pour la variété de cycle moyen (Furio) sont présentés pour illustrer l'impact du réchauffement sur la contrainte hydrique du maïs. Les résultats pour les autres variétés sont présentés en annexe du manuscrit.

Globalement, le maïs subit des contraintes hydriques fortes sur tous les bassins de production étudiés (Figure 26). Les bassins de production de Bretagne et des Pays de la Loire sont particulièrement touchés, avec dès la période 1960-1987 un bilan hydrique moyen qui descend jusqu'à moins de 20% de remplissage en eau des réservoirs du sol de mi-juillet à mi-septembre. Sur ces deux zones, on constate peu de différences entre les périodes 1960-1987 et 1988-2020. Le bilan hydrique y est déjà très bas sur la période 1960-1987, et on constate entre les périodes 1959-1987 et 1988-2019 peu, voire pas de différence significative dans les précipitations liquides et l'ÉvapoTranspiration Potentielle (ETP) aux échelles annuelle ou saisonnière au printemps, en été et en automne (Figure 16 et Supplementary Figure 2). Cette faible évolution des entrées (précipitations) et des sorties (évapotranspiration) du bilan hydrique montre une stabilité des contraintes hydriques sur l'ensemble de la période pour les bassins de production de Bretagne et des Pays de la Loire.

Le bassin de production Aquitain, le plus au Sud du pays, montre des contraintes hydriques un peu moins fortes que sur les deux précédentes zones, avec un minimum entre 25 et 30% de remplissage en eau des réservoirs du sol atteint en août sur la période 1960-1987 (Figure 26). Sur cette zone, la réserve utile en eau est en moyenne plus élevée que sur les bassins de production de Bretagne et des Pays de la Loire, ce qui peut expliquer un creusement moins important du bilan hydrique (Figure 11). La période 1988-2020 dévoile un cycle annuel moyen du bilan hydrique qui passe plus précocement sous le seuil de stress hydrique. Cette modification peut être associée à l'augmentation moyenne de l'ETP au printemps et en été consécutive au réchauffement (Figure 16 et Supplementary Figure 2).

Sur les bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône, la différence entre les deux périodes est beaucoup plus marquée. Le bilan hydrique passe sous le seuil de stress hydrique plus tôt dans l'année au cours de la période 1988-2020. Cette précocité est de plus de 15 jours et d'environ une semaine pour respectivement les bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône (Figure 26). La contrainte hydrique est également plus intense suite au réchauffement, passant d'environ 35% de remplissage en eau des réservoirs sur la période 1960-1987 à près de 25% sur la période 1988-2020. Sur ces deux zones, en été, l'ETP augmente de manière significative et importante alors que les précipitations liquides cumulées ne montrent pas d'évolutions significatives (Figure 16 et Supplementary Figure 2). Les sorties conséquentes d'eau des réservoirs du sol ne sont pas contrebalancées par les entrées. Mécaniquement, la contrainte hydrique s'intensifie nettement sur les bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône. Sur ces deux zones, on peut également constater un remplissage des réservoirs d'eau du sol plus rapide entre septembre et décembre sur la période 1988-2020 par rapport à la période 1960-1987. Cela peut s'expliquer par un décalage du cycle phénologique de la culture, qui atteint sa maturité physiologique plus tôt, ce qui conduit à une date de récolte plus précoce en moyenne. L'augmentation des températures impacte donc également le cycle de croissance et de développement de la culture, qui peut amener à un évitement de certaines périodes de stress hydrique sur ces deux bassins de production.

L'évolution du nombre de jours de stress hydrique sur la période 1988-2020 par rapport à la période 1960-1987 sur chaque point de grille Safran couvert d'au moins 10% de parcelles de maïs confirme cette analyse (Figure 27). Les points de grille des bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône dévoilent en moyenne les plus importantes différences, avec environ 10 à 20 jours de plus sous le seuil de stress hydrique. C'est en été que cette augmentation est la plus importante. Là encore, entre juin et août, les hausses les plus importantes concernent les bassins de production d'Alsace (de 15 à 20 jours) et de la vallée du Rhône (de 10 à 15 jours). Le bassin de production Aquitain montre aussi sur certains points de grille une hausse très importante du nombre de jours de stress hydrique jusqu'à 20 jours au maximum. Ceci confirme le décalage visible du cycle annuel moyen du bilan hydrique sur cette zone fin-juin début-juillet.

On peut noter que pour la variété de cycle court (Meribel), le cycle annuel moyen du bilan hydrique montre des événements de contrainte hydrique moins intenses que pour la variété de cycle moyen (Annexe 8). Ceci peut être dû au fait que chaque stade phénologique dure moins longtemps, l'ÉvapoTranspiration Réelle (ETR) reste moins longtemps à ses valeurs maximales, lesquelles surviennent un peu plus tôt dans l'année. Moins d'évapotranspiration implique donc des épisodes de stress hydrique moins intenses et moins longs. Inversement, la variété de cycle long (Cecilia) dévoile des contraintes hydriques plus marquées comparativement à la variété de cycle moyen (Annexe 9).

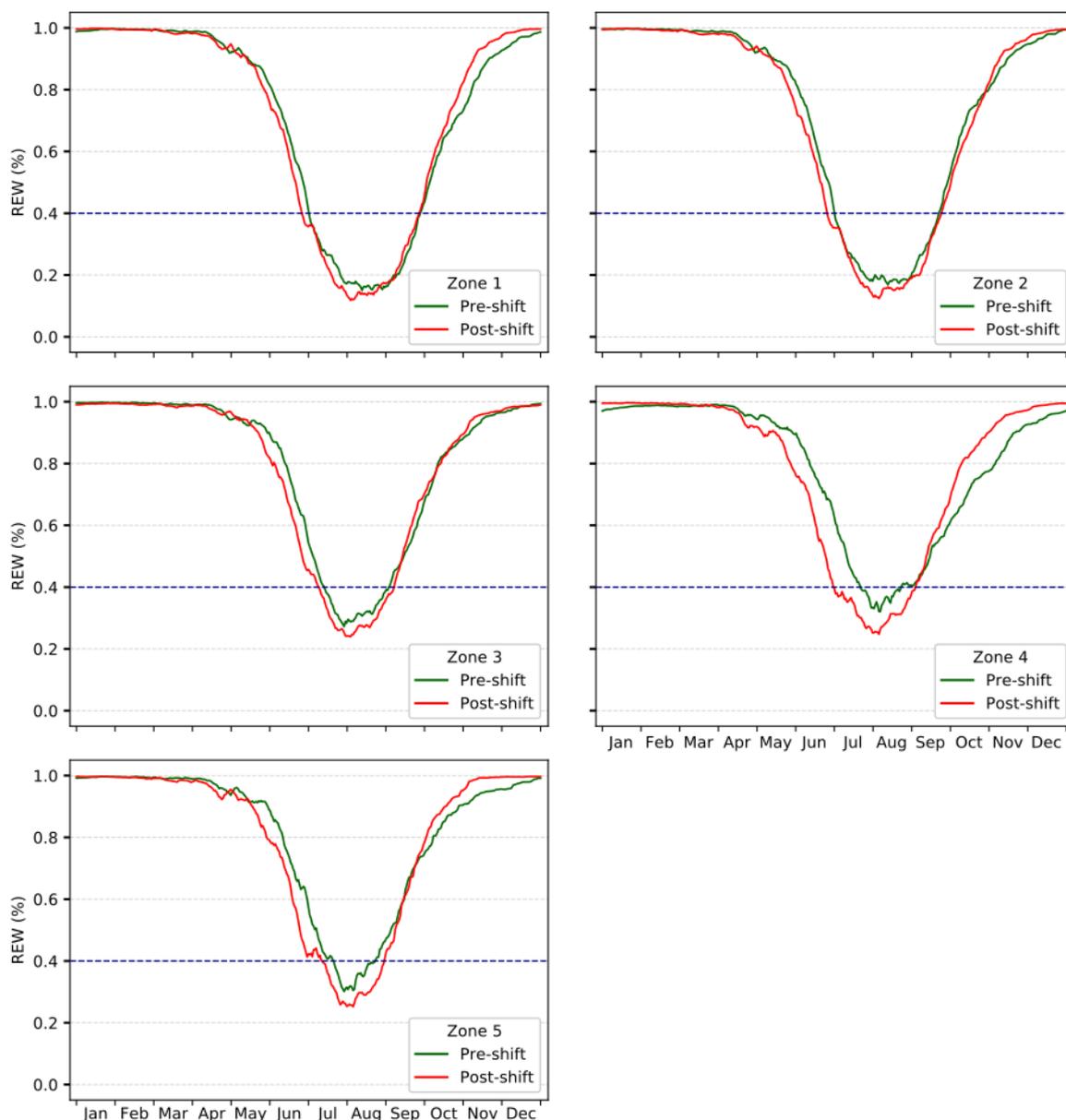


Figure 26 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire du maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2020. Ligne bleue pointillée : seuil de stress hydrique (40%). Zones 1, 2, 3, 4 et 5 respectivement les bassins de production de Bretagne, des Pays de la Loire, Aquitain, d'Alsace et de la vallée du Rhône.

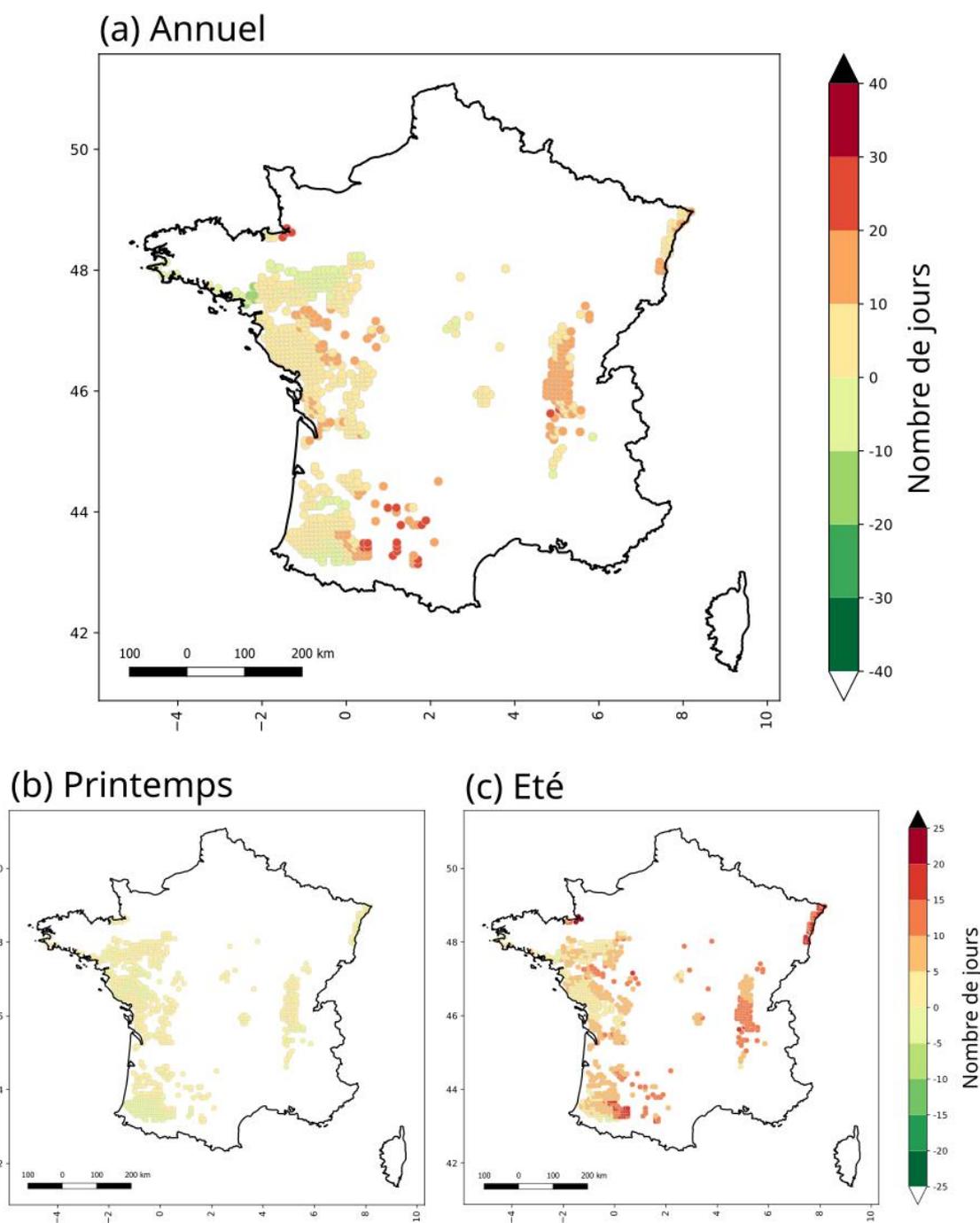


Figure 27 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). (a) Échelle annuelle, (b) printemps (MAM), (c) été (JJA).

L'effet variétal, par des décalages du cycle phénologique et de possibles effets d'évitement (ou non) des périodes à risque, impacte l'évolution du stress hydrique suite au réchauffement climatique.

Cependant, ces résultats n'abordent pas les effets des itinéraires techniques sur l'évolution du risque sécheresse, par exemple l'effet de l'irrigation. Il est clair que pour maintenir un potentiel de production, l'irrigation deviendra nécessaire sur certaines régions et à certaines périodes, affectant d'autant plus la ressource en eau.

Cette étude révèle l'impact de la hausse abrupte des températures sur le bilan hydrique du maïs, la contrainte et le risque qui y sont associés. On constate que sur tous les bassins de production majoritaires français, la culture est affectée. Le réchauffement rapide de 1987/1988 a fortement impacté les bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône, avec un allongement et une intensification des événements de stress hydrique. L'été est la saison la plus affectée, avec des valeurs de remplissage en eau des réservoirs du sol minimales en août. À cette période interviennent les stades de floraison et de remplissage des grains, stades particulièrement sensibles à la sécheresse (*Barutcular et al., 2016; NeSmith & Ritchie, 1992; Sah et al., 2020*). La poursuite de la hausse des températures pourrait donc avoir des conséquences délétères sur la croissance et le développement de la culture, menant à des pertes de rendement importantes. La caractérisation de l'évolution du risque sécheresse sur cette culture constitue donc un enjeu majeur pour le secteur agricole. Le stress hydrique caractérisé via l'indice de stress développé dans cette thèse pourrait, pour le maïs aussi, constituer un bon proxy pour évaluer les effets de la sécheresse sur la production agricole et la sinistralité des contrats d'assurance climatique sur récolte.

6.1.2. Le cas de la vigne

Le bilan hydrique de la vigne a été modélisé en utilisant la chaîne de modélisation décrite dans la méthodologie générale avec des caractéristiques de la culture fixes, correspondant en majorité à celles du Pinot Noir et à un itinéraire technique moyen du vignoble bourguignon. Les résultats présentés ci-dessous se concentrent, lorsque cela est pertinent, sur l'été et l'automne, car ces deux saisons rassemblent les stades phénologiques de la culture les plus sensibles à la sécheresse. Les résultats pour le printemps et l'hiver sont présentés en annexe du manuscrit.

Le cycle annuel du bilan hydrique moyen suit des schémas variés selon les bassins de production considérés (Figure 28). Mais sur toutes les zones, la fraction d'eau extractible croise les seuils de stress hydrique plus longuement et plus intensément suite au réchauffement. Sur les bassins de production de Champagne et d'Alsace, en moyenne, aucun stress hydrique n'apparaît sur la période 1960-1987. Suite à l'augmentation rapide des températures, une contrainte hydrique légère apparaît entre août et septembre sur la période 1988-2021. Là encore, la hausse significative de la demande évaporative suite au réchauffement peut expliquer cette intensification de la contrainte hydrique (Figure 16 et Supplementary Figure 2).

Les bassins de production de la vallée de la Loire, de la Bourgogne et du Bordelais expérimentent également une intensification de la contrainte hydrique, qui passe en moyenne d'un stress léger à un stress modéré avec le réchauffement (Figure 28). Ces événements de stress sont aussi plus longs, débordant sur le mois de septembre jusqu'à la maturité des grains. La Bourgogne et le Bordelais montrent une forte hausse de l'ETP en été et en automne sur la période 1988-2019 par rapport à la période 1959-1987, non contrebalancée par une augmentation des précipitations liquides (Figure 16 et Supplementary Figure 2). Cela peut expliquer l'intensification et l'allongement de la contrainte hydrique sur ces zones après 1987/1988.

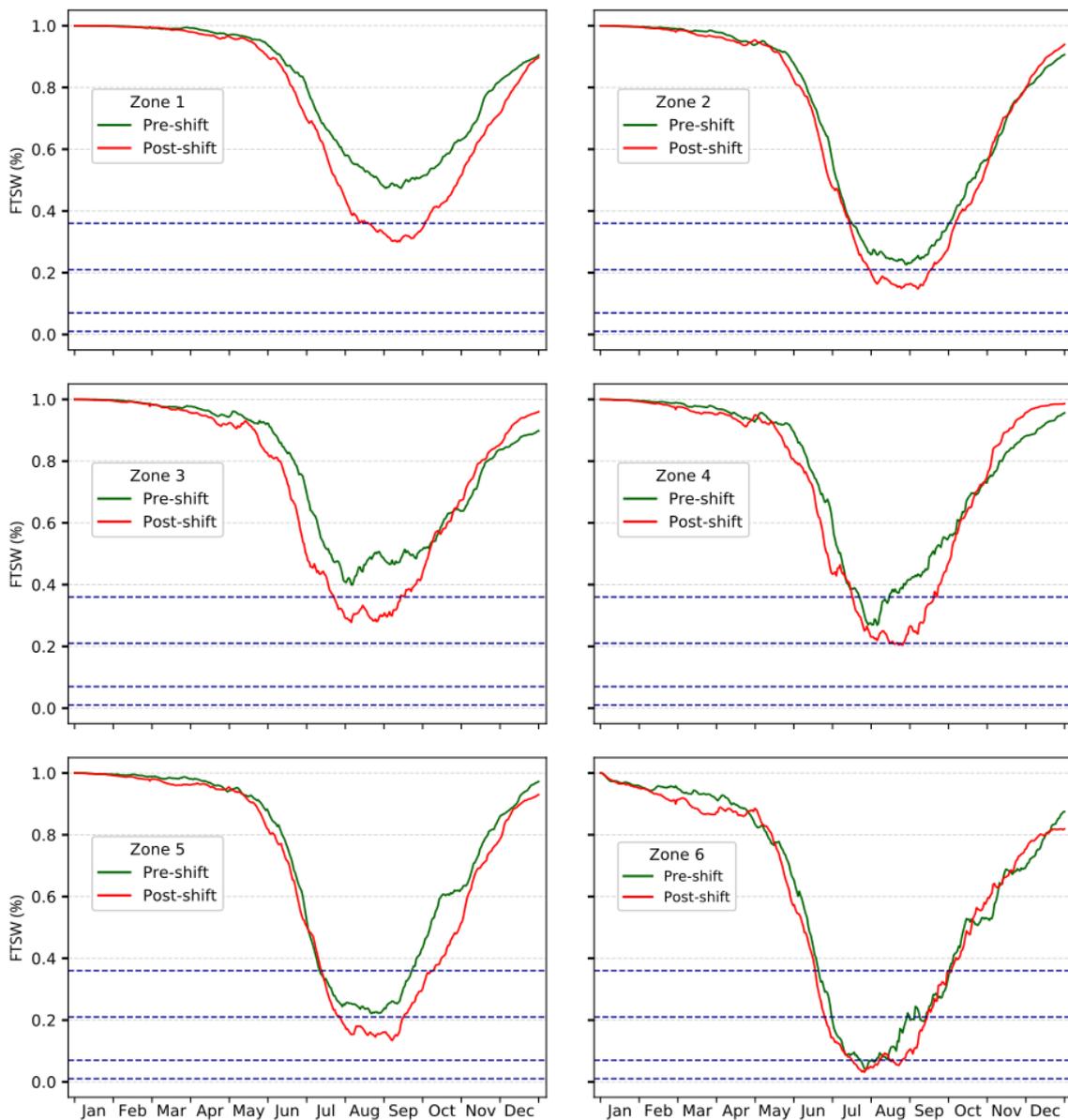


Figure 28 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire de la vigne. En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2021. Lignes bleues pointillées : seuils de stress hydrique léger, modéré, fort et très fort, respectivement 36%, 21%, 7% et 1%. Zones 1, 2, 3, 4, 5 et 6 respectivement les bassins de production de Champagne, de la vallée de la Loire, d’Alsace, de Bourgogne/Rhône, du Bordelais et de la région méditerranéenne.

Le bassin de production méditerranéen dévoile quant à lui des épisodes de stress hydrique fort dès la période 1960-1987 (Figure 28). Sur cette zone, la demande évaporative évolue relativement faiblement en moyenne par rapport aux autres bassins de production après 1987/1988. Ainsi, la différence entre le cycle annuel moyen du bilan hydrique de la période 1960-1987 et celui de la période

1988-2021 est beaucoup moins marquée que pour les autres zones. On peut noter malgré tout un allongement de la période sous seuil de stress hydrique jusqu'en septembre.

L'évolution du nombre de jours sous chaque seuil de stress hydrique complète l'analyse précédente (Figure 29). À l'échelle annuelle, les points de grille du bassin de production de Champagne montrent la plus forte hausse du nombre de jours de stress hydrique léger, avec entre 15 et 25 jours de plus. Sur ce même bassin de production, ainsi que sur ceux de la vallée de la Loire, de l'Alsace, de la Bourgogne et du Bordelais, le nombre de jours de stress modéré subit une augmentation de 10 à 20 jours en moyenne. On peut noter que ces hausses sont portées principalement par l'automne, où l'on constate des augmentations plus importantes du nombre de jours de stress modéré en comparaison à l'été (Figure 30 et Figure 31). Ces résultats confirment l'allongement de la période de stress tardif sur les bassins de production de Champagne, de la vallée de la Loire, de Bourgogne et du Bordelais. Le bassin de production méditerranéen quant à lui connaît une augmentation marquée du nombre de jours de stress très fort à l'échelle annuelle, allant de 5 à 15 jours de plus en moyenne (Figure 29). Celle-ci est majoritairement portée par la saison estivale, qui dévoile une hausse du nombre de jours de stress très fort beaucoup plus importante qu'en automne (Figure 30 et Figure 31). Sur cette zone, l'intensification et l'allongement du stress hydrique décrits précédemment sont donc confirmés par cette analyse géographique.

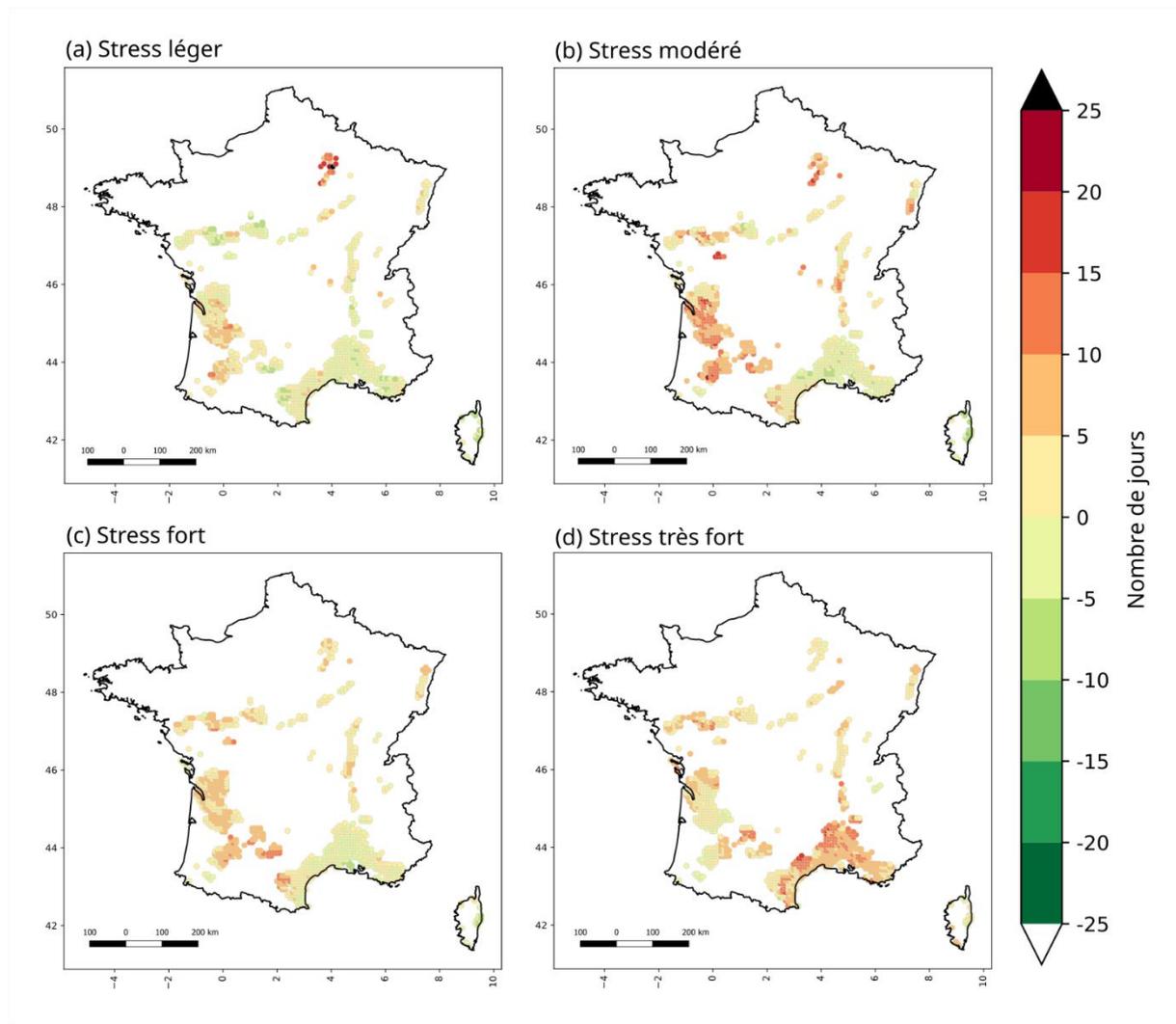


Figure 29 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, échelle annuelle. (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%).

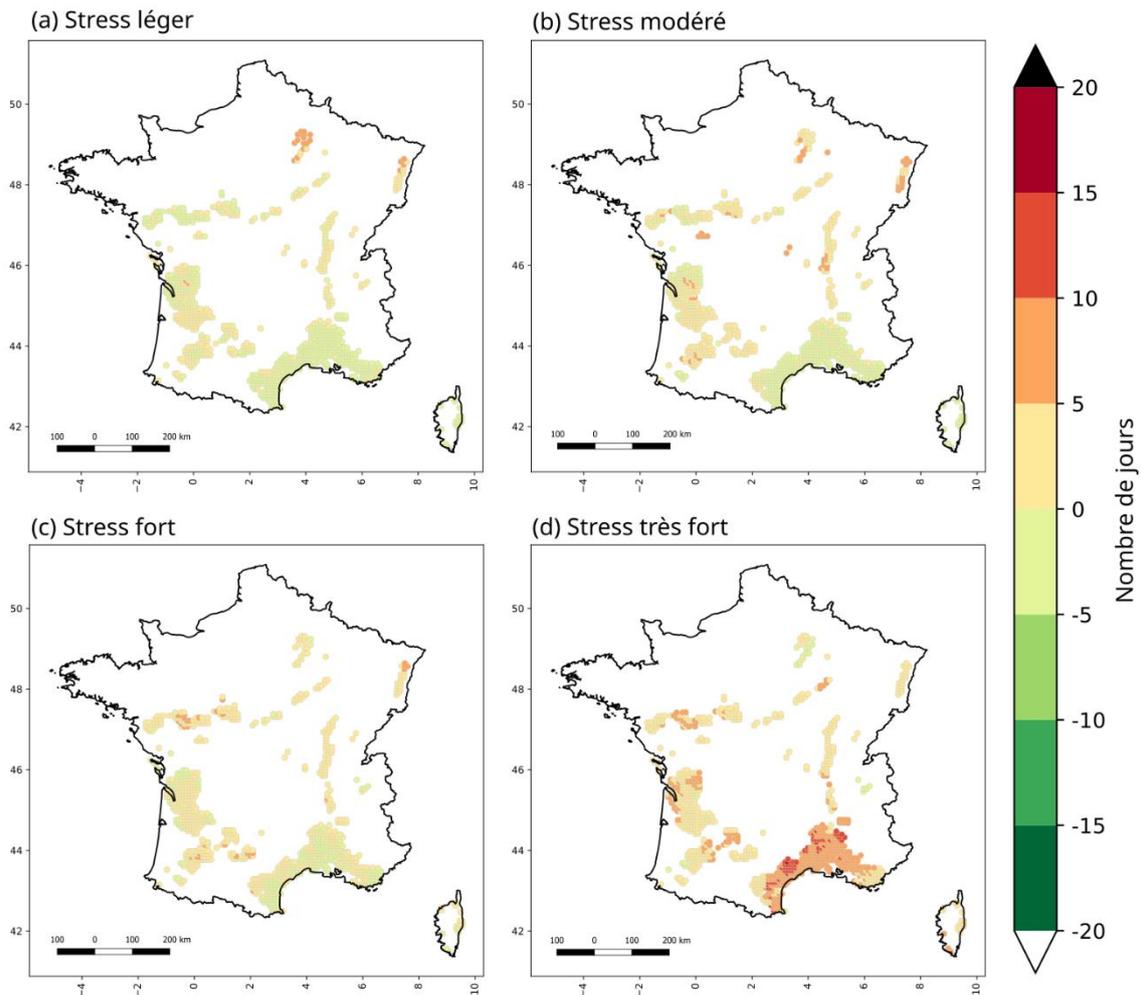


Figure 30 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, été (JJJ). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%).

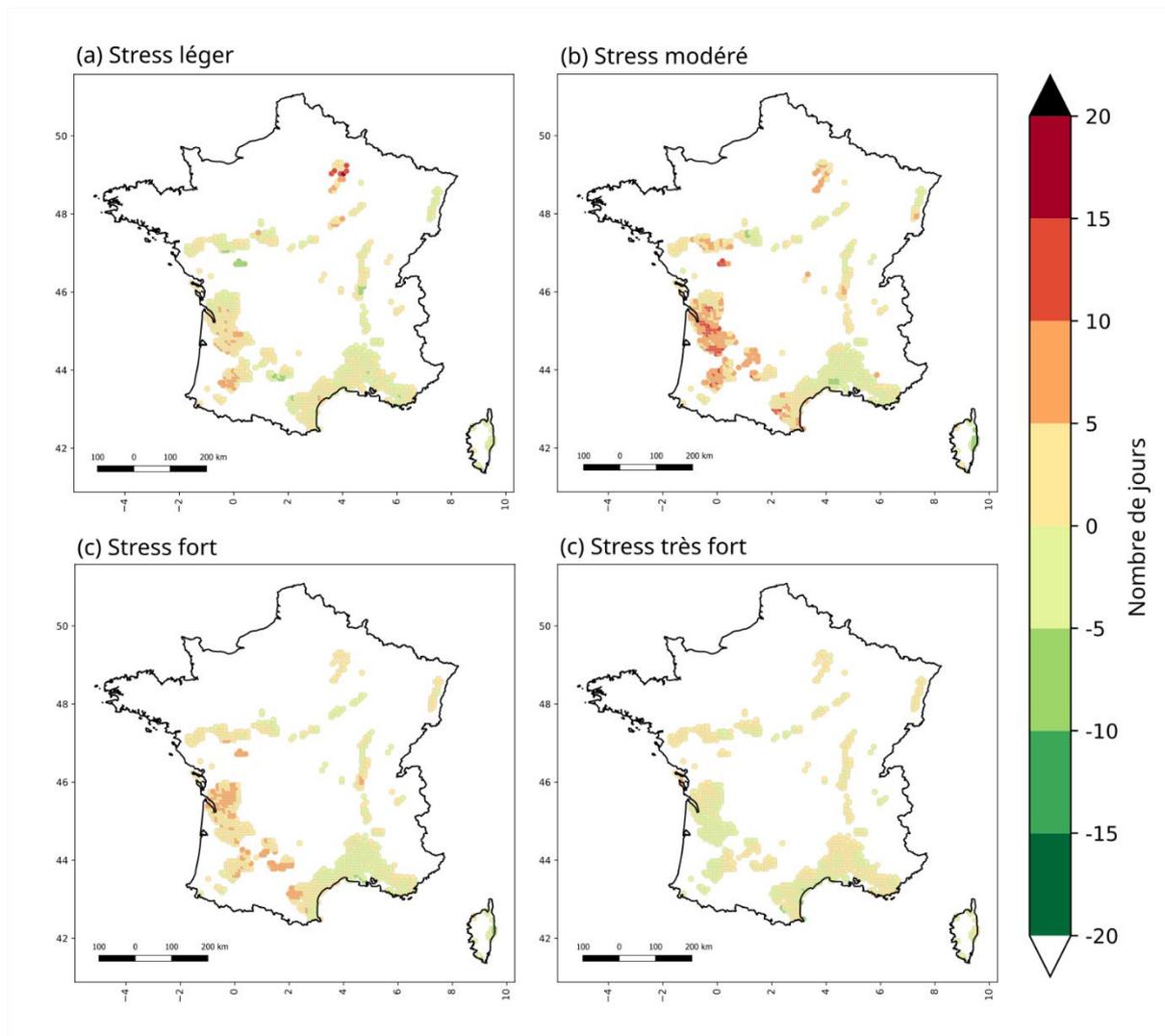


Figure 31 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, automne (SON). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%).

Ce travail présente l'impact du réchauffement climatique sur le bilan hydrique et le stress hydrique associé de la vigne. La hausse abrupte des températures en France autour de 1987/1988, délimitant deux périodes d'une profondeur temporelle similaire, a permis de produire des résultats robustes statistiquement. Sur tous les bassins de production étudiés, le réchauffement rapide couplé à une augmentation de la demande évaporative et une quasi-stagnation des cumuls annuels de précipitation amène à une modification de la contrainte hydrique sur les parcelles viticoles. La modification du bilan hydrique climatique entraîne un allongement et/ou une intensification des épisodes de stress hydrique, de manière variable selon les bassins de production. En majorité, on constate l'intensification des épisodes de stress, passant d'un stress léger à un stress modéré, et l'allongement vers le début d'automne (mois de septembre), où la demande évaporative augmente sans être suivie par une hausse significative des précipitations liquides (Figure 16 et Supplementary Figure 2). Notons la situation particulière du bassin de production méditerranéen, pour lequel le nombre de jours de

stress très fort augmente fortement, surtout en été. Sur cette région, la modification du bilan hydrique climatique entraîne une apparition d'épisodes de stress hydrique très intenses.

La composition des baies – et du vin en conséquence – est en partie fonction du stress hydrique subi par la vigne au cours de son cycle phénologique (Celette, 2007). Ainsi, les effets du réchauffement sur la croissance et le développement de cette culture, et à terme sur son rendement, sont plus complexes à déterminer. Selon le cépage et l'orientation stratégique du vignoble, chaque intensité de stress peut être adaptée aux profils de vins souhaités (Lovisolo et al., 2016). Dans le vignoble du Bordelais par exemple, la diminution de la fraction d'eau du sol transpirable moyenne annuelle depuis la fin des années 1960 est corrélée à une amélioration de la qualité des vins (Leeuwen & Darriet, 2016). Mais dans certains bassins de production, comme celui de Bourgogne par exemple, l'intensification et l'allongement du stress hydrique sur les cépages du Pinot Noir et du Chardonnay pourrait détériorer la qualité des vins de Bourgogne telle qu'elle s'est définie au fil du temps. La hausse des températures future prévue par les modèles climatiques, accompagnée d'une augmentation de la demande évaporative, pourrait amener sur ces zones des épisodes de stress hydrique encore plus intenses, conduisant à une réflexion nécessaire sur les cépages utilisés (IPCC, 2021; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017). Les vignobles du Rhône ou de la région méditerranéenne sont quant à eux moins impactés par ces modifications des contraintes hydriques. Les cépages utilisés dans ces bassins de production présentent une résistance à la sécheresse plus importante que celle du Pinot Noir ou du Chardonnay, et le vin produit affiche une typicité différente (Gaiotti et al., 2023). Les modifications du risque sécheresse sur les vignobles suite au réchauffement rapide en France en 1987/1988 amènent à redéfinir les itinéraires techniques de la culture et les cépages utilisés, afin de produire des vins de qualité selon les critères propres à chaque région viticole. Cela doit initier des réflexions auprès des producteurs et des instituts techniques sur les mesures à mettre en place si l'objectif est de maintenir une production typique de chaque région viticole. Si aucun risque de rupture hydrique pour la vigne n'a été détecté dans les séries d'observations de long terme des sécheresses dans les régions viticoles principales du monde entier, la hausse future des températures et de la demande évaporative pourrait devenir préjudiciable pour la production, impliquant des pertes économiques importantes (Charrier et al., 2018; IPCC, 2021). L'étude des épisodes de sécheresse extrême sur la vigne constitue dans ce cas un enjeu majeur pour le monde viticole.

En conclusion, ces analyses ont montré que l'évolution de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau a également impacté le risque sécheresse pour le maïs et la vigne. Pour ces deux cultures comme pour le blé, les modifications des entrées (précipitations) et des sorties (évapotranspiration) du bilan hydrique entraînent un assèchement moyen des réservoirs en eau du sol et modifient la longueur et l'intensité des épisodes de stress hydrique. Pour les trois cultures, on constate des disparités régionales dans l'évolution du risque agro-climatique. Cette variabilité spatiale est la combinaison d'une modification structurelle régionalisée de l'aléa climatique avec des spécificités territoriales agro-pédologiques. La saisonnalité du risque sécheresse diffère selon la culture étudiée. L'évolution du stress hydrique sur les parcelles de blé est portée principalement par le printemps sur les bassins de production du Poitou-Charentes, du Centre, de Bourgogne/Rhône-Alpes et Aquitain, alors que les bassins de production du nord du pays (Nord-Pas-de-Calais et Parisien) voient les épisodes de stress hydrique s'intensifier principalement en été. Concernant le maïs, le risque agro-climatique est modifié de manière très importante en été pour tous les bassins de production étudiés. L'analyse pour la culture de la vigne, pour laquelle le risque sécheresse constitue une menace plus complexe à

appréhender, dévoile une évolution saisonnière du risque sécheresse variable selon l'intensité du stress étudié. On peut noter que sur les vignobles de Champagne, de la vallée de la Loire, de Bourgogne et du Bordelais, le stress hydrique modéré s'étend vers l'automne avec l'allongement de la contrainte hydrique sur cette saison. Le vignoble du bassin méditerranéen subit quant à lui une évolution très importante du risque sécheresse en été, ou la vigne endure plus d'épisodes de stress hydrique très fort avec l'augmentation des températures.

L'impact du changement climatique sur le stress hydrique s'exprime donc différemment selon la culture étudiée. La combinaison des variabilités spatiales et temporelles de l'aléa climatique et de la vulnérabilité des espèces végétales induit des disparités géographiques et saisonnières dans l'évolution du risque agro-climatique sécheresse de chacune des cultures étudiées. Ces modifications du risque peuvent provoquer des pertes de rendement, affecter les résultats économiques des exploitations agricoles et, par conséquent, la sinistralité des assurances climatiques. L'indice de stress hydrique développé dans ces travaux permet de prendre en compte les spécificités de chaque culture et ainsi d'analyser finement l'évolution du risque sécheresse. Il serait intéressant de voir dans quelle mesure il pourrait constituer un proxy pertinent pour expliquer l'évolution de la sinistralité des contrats MRC.

6.2. Indice de stress hydrique et sinistralité de l'assurance multirisque climatique

Depuis 2005, l'évolution de la sinistralité des contrats assurantiels MultiRisque Climatique (MRC) montre, en fonction des cultures considérées, une plus ou moins forte volatilité, doublée d'une tendance à la hausse qui semble s'être accentuée depuis ces dernières années. C'est le cas par exemple pour le maïs du bassin de production des Pays de la Loire (Figure 32).

L'étude présentée en introduction de ce document montre que le ratio sinistre à prime (S/P) co-varie en partie et de manière plus ou moins nette avec l'index d'humidité du sol (Soil Water Index, SWI en anglais) (voir *Étude de cas : impact de la sécheresse sur le ratio S/P du maïs de Groupama*). Ce lien, même ténu, suggère que le stress hydrique est un risque qui contribue à l'évolution de la sinistralité. Toutefois, il est attendu que son poids ne soit pas identique en fonction des cultures et des régions considérées. De plus, le SWI moyen peut répondre à des objectifs de suivi générique des contraintes hydriques (i.e. multi occupation du sol), mais doit être affiné afin de caractériser plus précisément le déficit hydrique des cultures d'intérêt. Ces travaux de thèse se sont clairement inscrits dans cette perspective, en qualifiant plus spécifiquement le risque sécheresse, tant d'un point de vue méthodologique que thématique. L'objectif ici est de voir si cette approche permet de mieux appréhender l'évolution de la sinistralité des contrats d'assurance climatique sur récolte.

L'indice de stress hydrique cumulé annuel est calculé pour chaque culture d'intérêt à travers une modélisation de la croissance et du développement de la culture et une modélisation du bilan hydrique, et prend en compte la vulnérabilité de la culture à travers sa phénologie. Il doit donc permettre une caractérisation plus fine et robuste du risque agro-climatique lié à la sécheresse pour chaque culture. Dans cette partie, l'évolution des ratios S/P du maïs et du blé des contrats MRC de Groupama sont analysés au regard de l'évolution de l'indice de stress hydrique annuel de la culture correspondante. Ces ratios S/P sont aussi comparés à l'évolution d'un indice de stress hydrique annuel calculé à partir de la variable SWI disponible dans la base de données Safran-Isba-Modcou (SIM) (Soubeyroux et al., 2008).

Pour chaque point de grille Safran, les valeurs quotidiennes de SWI, exprimées en pourcentage de remplissage en eau du sol, sont ramenées à une valeur exprimée en mm en les multipliant par la valeur de RU du point de grille (Figure 11). Le seuil de stress hydrique de 40% est lui aussi ramené à une valeur exprimée en millimètres en le croisant avec la valeur de RU de chaque point de grille. Lorsque la valeur du SWI (également en millimètres) est inférieure à la valeur du seuil de stress hydrique, la différence entre ces deux valeurs est calculée, pour chaque jour et chaque point de grille. Le cumul annuel de ces différences fournit, pour chaque année et chaque point de grille, un indice de stress hydrique cumulé annuel. Celui-ci est calculé à partir du SWI de la base de données SIM, en utilisant une méthodologie similaire au calcul de l'indice de stress hydrique cumulé annuel à partir du bilan hydrique modélisé pour chaque culture développé dans ce manuscrit.

Les valeurs de ratio S/P annuelles départementales mises à disposition par l'entreprise couvrent une plage temporelle allant de 2011 à 2021 pour tous les départements des bassins de production du blé et du maïs, sauf pour les départements du bassin de production de maïs d'Alsace (depuis 2013). Les valeurs de ratio S/P de chaque département appartenant pour tout ou partie à un bassin de production sont agrégées, pour chaque culture. De même, les valeurs d'indice de stress hydrique calculées pour chaque point de grille SIM à partir du SWI ou selon la méthodologie de la thèse pour chaque culture

sont agrégées par bassin de production. Les coefficients de corrélation de Pearson entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique calculé à partir du SWI, et entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique calculé à partir du bilan hydrique modélisé pour chaque culture, sont analysés. L'objectif est d'évaluer si l'indice de stress hydrique développé dans ce manuscrit permet une meilleure explication de l'évolution de la performance des contrats MRC qu'un indice de stress hydrique calculé à partir du SWI de la base de données SIM.

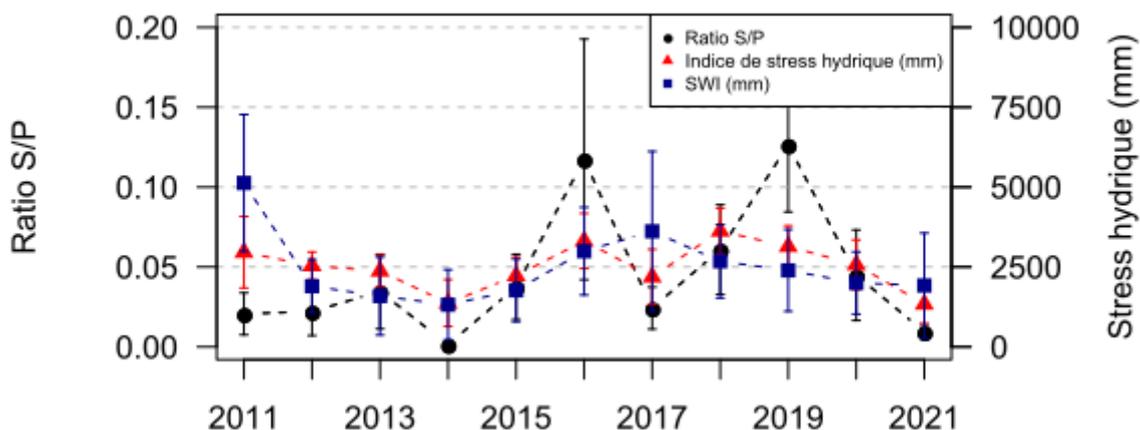


Figure 32 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir), de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l'indice de stress hydrique calculé pour le maïs (en rouge) pour les départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée.

Dans le bassin de production des Pays de la Loire, le ratio S/P du maïs semble être fortement corrélé à l'indice de stress hydrique tiré de la modélisation du bilan hydrique du maïs, mais un peu moins corrélé à l'indice de stress hydrique tiré du SWI (Figure 32). Les coefficients de corrélation de Pearson confirment cette analyse, avec un coefficient de corrélation entre le ratio S/P du maïs et l'indice de stress hydrique tiré du SWI de 0,096 qui s'améliore de manière importante, jusqu'à 0,72, lorsqu'on compare le ratio S/P du maïs à l'indice de stress hydrique tiré de la modélisation du bilan hydrique du maïs (Annexe 17). Les autres bassins de production du maïs dévoilent eux aussi une amélioration de la corrélation avec le ratio S/P lorsqu'on utilise l'indice de stress hydrique développé dans cette thèse par rapport à l'indice de stress hydrique issu du SWI (Annexe 15 et Annexe 17). Pour le maïs, l'indice de stress hydrique développé ici semble donc pouvoir expliquer de manière plus robuste l'évolution de la sinistralité des contrats d'assurance MRC.

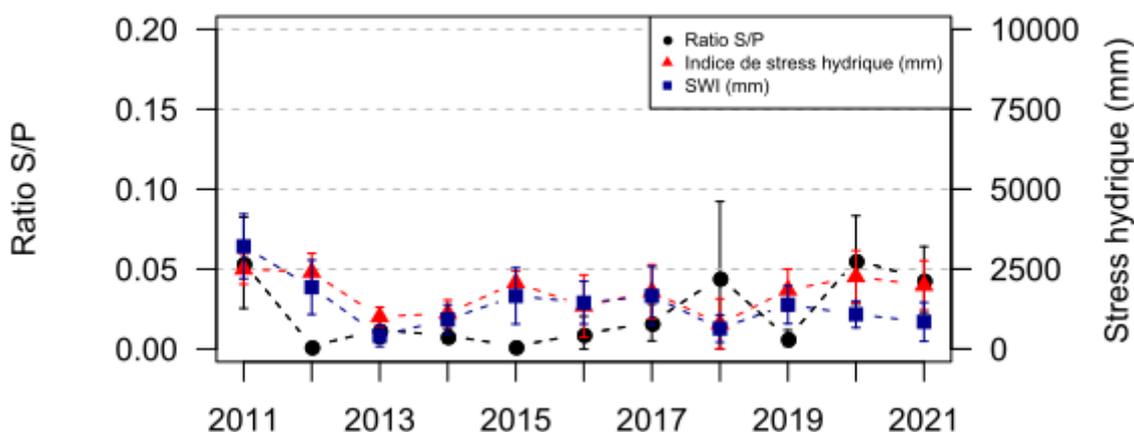


Figure 33 : Évolutions annuelles du ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama (en noir), de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l'indice de stress hydrique calculé pour le blé (en rouge) pour les départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne.

Pour le blé, dans le bassin de production Aquitain par exemple, il semble y avoir une corrélation positive entre le ratio S/P et les indices de stress hydrique issus du SWI et de la modélisation du bilan hydrique (Figure 33). Le calcul des coefficients de corrélation de Pearson montre que la corrélation entre le ratio S/P du blé et l'indice de stress hydrique issu de la modélisation du bilan hydrique du blé est plus robuste que la corrélation entre le ratio S/P du blé et l'indice de stress hydrique issu du SWI, avec respectivement 0,19 et 0,10 (Annexe 16). Ainsi, l'indice de stress hydrique développé dans ces travaux explique de manière un peu plus pertinente l'évolution du ratio S/P du blé sur le bassin de production Aquitain. Les résultats pour les autres bassins de production du blé sont beaucoup plus contrastés, avec parfois des anticorrélations entre le ratio S/P et les indices de stress hydrique (Annexe 14 et Annexe 16).

Les résultats sont très encourageants, démontrant l'intérêt méthodologique des travaux de thèse. En premier lieu, surtout pour le maïs, la caractérisation du déficit hydrique en utilisant le cumul annuel des valeurs sous le seuil de stress hydrique à partir du SWI permet d'améliorer la corrélation entre le ratio S/P et la sécheresse par rapport à l'utilisation du SWI moyen. Cette approche méthodologique utilisant le taux de remplissage en eau du sol et un seuil de stress hydrique pour caractériser la sécheresse permet donc de mieux expliquer la variabilité de la sinistralité des contrats MRC. L'intégration de la vulnérabilité des cultures d'intérêt, notamment pour le maïs, dans le calcul de l'indice de stress hydrique – via la modélisation du bilan hydrique – augmente encore la robustesse de la corrélation entre cet indice de stress et la sinistralité de la culture. Les résultats sont plus contrastés pour le blé, même si, pour la majorité des bassins de production, l'approche utilisée dans la thèse pour calculer les indices de stress hydrique améliore la corrélation entre la sécheresse et le ratio S/P.

Le lien entre l'indice de stress hydrique annuel et la sinistralité n'est cependant pas univoque, et dépend de multiples facteurs. L'indice de stress hydrique cumulé annuel est calculé à partir des résultats de modélisation du bilan hydrique de chaque culture d'intérêt, considérant que les parcelles ne sont pas irriguées. Or le ratio S/P de l'entreprise est calculé à partir de tous les sinistres déclarés sur

les parcelles des cultures étudiées, sans écarter les sinistres déclarés sur des parcelles irriguées. Notons aussi que le ratio S/P étudié ici comprend les coûts des sinistres liés à tous les aléas couverts par les contrats MRC (Tableau 1). L'isolement des coûts liés uniquement à l'aléa sécheresse (ou à d'autres aléas pertinents pour l'analyse du déficit hydrique) et sur des parcelles uniquement non irriguées pourrait probablement permettre d'améliorer la corrélation entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique issu de la modélisation du bilan hydrique. D'autres facteurs cultureux – tels que la variété utilisée – ou l'échelle d'intégration brulent aussi le signal de covariation. L'affinage des données assurantielles enregistrées par Groupama, couplé aux indices de stress hydrique produits dans le cadre de cette thèse, ouvrent des perspectives prometteuses d'analyse de l'évolution de la sinistralité pour les trois cultures cibles (blé, maïs et vigne) en lien avec le changement climatique.

Conclusion générale

La hausse des températures de l'air est l'un des principaux facteurs affectant le cycle de l'eau dans le monde (Dobler et al., 2010; Gebre & Ludwig, 2015; Khanal et al., 2021). Les effets sur la couverture neigeuse et les glaciers dans les régions montagneuses (Huss et al., 2017; Marty et al., 2017), sur la biodiversité (Malcolm et al., 2006) et sur les débits (Gu et al., 2020; Laurent et al., 2020) sont nombreux. En France, les débits des rivières sont en baisse de janvier à juillet après la hausse rapide des températures, avec des disparités spatiales et saisonnières (Brulebois et al., 2015). Les autres éléments climatiques du cycle de l'eau – les précipitations et l'évapotranspiration – sont eux aussi impactés par l'augmentation des températures (Held & Soden, 2006). L'évapotranspiration est un moteur clé de l'évolution des débits et des épisodes de sécheresse, contribuant à l'assèchement des sols et à la hausse de la contrainte hydrique (Rossi et al., 2016; Teuling et al., 2013).

Les travaux menés au cours de cette thèse se sont inscrits dans ce contexte. Ils ont pour objectif de déterminer comment et dans quelles proportions les modifications de l'aléa climatique ont affecté les risques agro-climatiques liés à la sécheresse en France métropolitaine de 1960 à aujourd'hui. En utilisant les données climatiques de la base de données Safran-Isba-Modcou (Soubeyroux et al., 2008), les modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau local suite au réchauffement abrupt des températures de l'air en surface en France en 1987/1988 sont quantifiées. Cette quantification a été conduite à l'échelle régionale en s'appuyant sur une approche de modélisation simplifiée du bilan hydrique de 3 cultures d'intérêt : le blé, le maïs et la vigne. La prise en compte de la phénologie de chaque culture a permis de déterminer de manière robuste l'évolution de la ressource en eau du sol des bassins de production de chaque culture. La création d'un indice de stress hydrique annuel, dont la distribution est modélisée statistiquement, permet de caractériser les modifications structurelles du risque sécheresse suite à la hausse rapide des températures. Les résultats montrent que l'augmentation rapide des températures induit une forte hausse de la demande évaporative, signant une sortie nette de l'eau des réservoirs du sol. Les précipitations ne suffisent pas à contrer l'assèchement du sol après 1987/1988, ce qui mène à une hausse de la contrainte hydrique sur les cultures d'intérêt, principalement en été et en automne. Le bilan hydrique du blé se creuse, de manière variée selon les bassins de production. La structure du risque sécheresse (occurrence et intensité) est modifiée en conséquence, questionnant les impacts sur les rendements et la sinistralité des contrats d'assurance climatique récolte.

L'augmentation abrupte des températures en France métropolitaine autour des années 1987/1988 a impacté significativement les variables climatiques liées au cycle de l'eau local sur la période 1959-2019.

Le réchauffement abrupt en France en 1987/1988 a modifié structurellement une variable clé dans le cycle de l'eau : l'évapotranspiration. Sur la période 1988-2019, la demande évaporative augmente significativement, surtout au printemps, amenant à une vidange des réservoirs en eau du sol. Cette hausse continue en été et dure jusqu'en septembre, conduisant à un assèchement des sols. La contrainte hydrique climatique sur les couverts végétaux augmente en conséquence, aux échelles annuelle et saisonnière, avec l'été et l'automne particulièrement impactés. À ces saisons en effet, la hausse de la demande évaporative n'est pas suivie par une hausse de l'évapotranspiration réelle, signant le manque d'eau disponible pour la plante et l'apparition de la contrainte hydrique. Spatialement, des disparités dans l'évolution de cette contrainte sont mises en évidence. Le sud-ouest et l'extrême nord-est de la France, la Picardie, la vallée du Rhône et la Côte d'Azur sont les régions les plus touchées par la hausse de la contrainte hydrique. L'assèchement des réservoirs d'eau du sol est encore plus marqué au cours des dernières années, et plus particulièrement depuis 2014/2015, qui semble révéler une nouvelle étape du réchauffement sous nos latitudes. L'extension de la période

d'assèchement des sols vers l'automne suggère que l'augmentation de la fréquence des séquences sèches joue également un rôle important. En effet, en automne, le nombre moyen de séquences sèches par décennies est en hausse sur quasiment tout le territoire métropolitain (*Raymond & Ullmann, 2021*).

La hausse abrupte des températures en 1987/1988 en France métropolitaine a affecté l'aléa climatique lié au cycle de l'eau. L'intensification et l'allongement des périodes d'assèchement des sols et de contrainte hydrique climatique sont portés majoritairement par le réchauffement et la hausse de la demande évaporative, mais également par une augmentation de la fréquence des séquences sèches à la fin de l'été et au début de l'automne. Les modifications des composantes climatiques du cycle de l'eau local après le réchauffement rapide peuvent impacter directement ou indirectement les écosystèmes naturels et les activités humaines (*Creed et al., 2015; Higgins & Vellinga, 2004; Yang et al., 2021*). L'extension de la période d'assèchement des sols et les modifications de la contrainte hydrique s'étalant du printemps au début de l'automne, elle couvre sous nos latitudes une période clé pour la croissance de la majorité des cultures. Se pose alors la question de savoir comment la disponibilité en eau est affectée. Celle-ci va en effet déterminer, en fonction des besoins des couverts végétaux, la survenance d'un stress hydrique. Cette question a été abordée dans ces travaux de thèse au travers d'une modélisation simplifiée du bilan hydrique pour chaque culture d'intérêt.

Les modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau affectent le bilan hydrique des cultures d'intérêt, de manière variable selon les cultures, les bassins de production et les saisons étudiés.

L'évolution de l'évapotranspiration dépend des besoins spécifiques à chaque espèce végétale. L'impact régionalisé du réchauffement climatique sur le bilan hydrique des cultures nécessite donc une approche spécifique à chaque culture et à chaque bassin de production. Le deuxième chapitre et la discussion de cette thèse s'attachent donc à évaluer les impacts de la hausse abrupte des températures sur les bassins de production français majoritaires des cultures les plus importantes pour l'entreprise : le blé, le maïs et la vigne. À travers une modélisation du bilan hydrique prenant en compte la phénologie des espèces étudiées et des seuils de stress hydrique définis pour chaque culture, les événements de contrainte hydrique sont analysés de part et d'autre du réchauffement de 1987/1988.

Sur la période 1988-2021, tous les bassins de production du blé tendre d'hiver montrent une baisse du cycle annuel moyen du bilan hydrique en comparaison à celui de la période 1960-1987. Le dépassement du seuil de contrainte hydrique évolue de manière variée selon les bassins de production et les saisons. Les bassins de production du blé du Nord-Pas-de-Calais et Parisien dévoilent des contraintes hydriques plus longues et plus intenses, particulièrement en été. Sur les bassins de production du Poitou-Charentes, du Centre, de Bourgogne/Rhône-Alpes et Aquitain, le nombre de jours de stress hydrique pour cette culture augmente de manière importante au printemps, allongeant les épisodes de contrainte hydrique. Pour le maïs, le cycle annuel moyen du bilan hydrique est également plus creusé sur tous les bassins de production suite au réchauffement. Les bassins de production d'Alsace et de la vallée du Rhône sont les plus touchés, avec une hausse très importante du nombre de jours de stress hydrique, principalement en été. Le bilan hydrique de la vigne est également impacté par la hausse abrupte des températures. Celui-ci est en baisse sur tous les bassins de production, faisant apparaître des épisodes de contrainte hydrique modérée après 1987/1988 et dévoilant un allongement des périodes de contrainte hydrique vers l'automne.

La modification du bilan hydrique suite à l'augmentation rapide des températures survient principalement au printemps et en été, saisons où le blé et le maïs sont particulièrement sensibles à la

sécheresse (Hlaváčová et al., 2018; Sah et al., 2020). Les effets de l'augmentation de la contrainte hydrique pour la vigne sont plus complexes à analyser. Pour cette culture, le manque d'eau est considéré comme un levier de conduite de cette culture qui permet notamment de moduler la composition des baies, et donc la qualité des vins produits (Lovisolo et al., 2016). Pour les trois cultures, l'exposition au risque agro-climatique lié à la sécheresse est clairement modifiée. L'évolution de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau (évapotranspiration, précipitation) suite au réchauffement rapide de 1987/1988 semble être en première approche l'un des déterminants de cette évolution. Afin de caractériser plus finement les modifications du risque sécheresse, un indice de stress hydrique est proposé. La modélisation de ses distributions avec le modèle de Tweedie permet de décomposer le risque, en inférant simultanément l'occurrence et l'intensité du stress hydrique. Cette approche ouvre des perspectives prometteuses afin de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur le risque sécheresse pour ces cultures.

Le risque agro-climatique lié à la sécheresse est modifié suite au réchauffement, l'occurrence et l'intensité des évènements de stress hydrique évoluent de manière variée selon les cultures et les bassins de production étudiés. Les sécheresses extrêmes sont plus fréquentes sur tous les bassins de production du blé tendre d'hiver.

Pour explorer les modifications du risque agro-climatique lié à la sécheresse avec le réchauffement, un indice de stress hydrique est proposé. Dans le troisième chapitre de cette thèse, les évolutions temporelle et spatiale du risque sécheresse sont appréhendées en calculant cet indice, correspondant au cumul annuel du stress hydrique estimé quotidiennement. Pour cette partie, les travaux se concentrent sur la culture du blé tendre d'hiver, avec une vulnérabilité constante correspondant au seuil en-dessous duquel la croissance et le développement de la plante sont impactés (Meyer & Green, 1981, 1980; Norikane et al., 2003). Les distributions des indices de stress hydrique sont étudiées pour chaque période de part et d'autre de 1987/1988, et pour chaque bassin de production. Les caractéristiques particulières de ces distributions (inflation de zéros, asymétrie, queue de distribution plus ou moins épaisse) ont été modélisées par l'intermédiaire d'un modèle de Tweedie (Dunn, 2004), donnant accès aux évolutions de l'occurrence et de l'intensité du stress hydrique pour le blé.

Avec le réchauffement, l'occurrence et l'intensité des évènements de stress hydrique sont modifiées sur tous les bassins de production du blé. Les changements varient selon les bassins de production et les périodes étudiées. Les augmentations de fréquence, d'intensité ou des deux paramètres à la fois entraînent une hausse des indices de stress hydrique moyens sur toutes les régions étudiées sur la période 1988-2014 par rapport à la période 1960-1987. Les bassins de production du Nord-Pas-de-Calais, Parisien et de Poitou-Charentes connaissent les augmentations les plus importantes, en concordance avec les évolutions de la demande évaporative et des précipitations montrées dans le premier chapitre de cette thèse. Les changements sur la période 2015-2021 par rapport à la période 1988-2014 sont un peu plus contrastés.

Les évènements de sécheresse extrême sont également impactés par la hausse rapide des températures. Sur les bassins de production de blé du Nord-Pas-de-Calais, Parisien et de Poitou-Charentes, la proportion de points de grille qui dépassent le percentile 90 des indices de stress hydrique passe d'en moyenne 20 à 30% sur la période 1960-1987 à presque 40% sur la période 1988-2014. Plusieurs points de grille des bassins de production du Centre et de Bourgogne/Rhône-Alpes voient aussi le risque d'expérimenter des évènements de stress hydrique extrêmes augmenter après le réchauffement de 2014/2015. Ces changements dans la probabilité d'apparition d'un stress hydrique extrême sur le blé peuvent être expliqués là encore par une modification du bilan hydrique,

avec un assèchement plus marqué des sols dû à une forte évapotranspiration et des séquences sèches plus fréquentes et/ou plus longues (Raymond & Ullmann, 2021).

Les modifications de l'aléa climatique après les augmentations rapides des températures de l'air en surface mises en évidence en France métropolitaine sur la période allant de 1960 à aujourd'hui ont amené à des changements structurels dans le bilan hydrique des cultures. Les caractéristiques du risque sécheresse, notamment pour la culture du blé tendre d'hiver, varient en conséquence. Ces résultats corroborent ceux d'autres études réalisées à des échelles spatiales ou temporelles plus larges. Spinoni et al. (2018) ont par exemple montré que sur toute l'Europe de l'Ouest, l'intensité et la fréquence des événements de sécheresse évoluent avec le changement climatique. Sur la période historique (1951-2010), l'augmentation des températures induit une hausse modérée mais quasiment généralisée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses à l'échelle annuelle dans la région France/Bénélux, le printemps étant particulièrement impacté. La fréquence et l'intensité de faibles indices d'humidité des sols devrait subir une hausse drastique d'ici 2100 en France et en Europe (Grillakis, 2019). Les scénarios futurs de réchauffement pointent une augmentation critique de toutes les caractéristiques spatio-temporelles des sécheresses agricoles sur la France (Vidal et al., 2012).

Les événements de sécheresses agricoles peuvent être corrélés aux pertes de rendement de plusieurs cultures, comme par exemple le maïs et le blé (Daryanto et al., 2016; Hendrawan et al., 2022; Mohammed et al., 2022). L'évènement de sécheresse extrême que la France et l'Europe ont connu en 2003 en témoigne, avec une productivité primaire très affectée, notamment celle des grandes cultures (Ciais et al., 2005). Les modifications des événements de stress hydrique peuvent affecter différents stades de développement des cultures. Des stress plus intenses en été altèrent la formation des grains et leur maturation ; des stress plus longs, débordant sur le printemps, affectent la montaison du blé (Arvalis Institut du Végétal, 2022; Jamieson et al., 1995; Le Gouis et al., 2020). Alors que, d'ici 2100, la hausse des températures pourrait amener à une intensification et une extension spatiale de ces événements de sécheresse agricole (Dayon et al., 2018; Vidal et al., 2012), une meilleure compréhension du lien entre le risque sécheresse et les pertes de rendement devient nécessaire. Pour les assureurs tels que Groupama, les coûts liés aux pertes de rendement sont notamment étudiés en analysant le ratio sinistre à primes (S/P).

L'indice de stress hydrique : un bon indicateur des variations du ratio S/P ?

La mesure des risques liés aux contrats assurantiels constitue un enjeu majeur pour les assureurs (Charpentier et al., 2022; Fusco et al., 2018; Hagenlocher et al., 2019). Les résultats des contrats MultiRisque Climatique (MRC) notamment sont maîtrisés avec l'analyse du risque agro-climatique. La sécheresse est à l'origine d'une part importante des coûts de l'entreprise liés à ce type de contrat. L'analyse du risque agro-climatique lié à la sécheresse se révèle cruciale pour mieux maîtriser les résultats de l'assurance MRC, qui depuis sa création montre une faible proportion d'années performantes pour les assureurs la proposant, dont Groupama.

L'indice de stress hydrique développé dans les travaux de thèse présentés ici permet de caractériser le risque agro-climatique sécheresse pour chacune des cultures d'intérêt. Cet indice est plus ou moins bien corrélé au ratio S/P des contrats MRC selon la culture et les bassins de production. Ces premiers résultats ouvrent des pistes intéressantes, et positionnent l'indice de stress hydrique et le risque associé comme un proxy potentiellement pertinent pour mesurer et expliquer de manière satisfaisante les variations de la performance des contrats d'assurance climatique sur récoltes. Pour le maïs, le signal de covariation entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique dérivé du calcul du bilan hydrique est

systématiquement amélioré comparativement à la corrélation obtenue avec l'indice de stress hydrique issu du SWI (Soil Water Index) du jeu de données Safran-Isba-Modcou. Pour le blé, les résultats sont plus contrastés, même si sur certains bassins de production la corrélation s'améliore entre l'indice de stress hydrique développé dans la thèse et le ratio S/P par rapport à celle entre le ratio S/P et l'indice de stress hydrique calculé à partir du SWI.

Le ratio S/P réagit aux variations de l'indice de stress hydrique proposé dans le cadre de cette thèse. La prise en compte des caractéristiques spécifiques de chaque culture étudiée permet, pour certaines cultures (maïs) et certains bassins de production (Pays de la Loire, Bassin Aquitain), d'améliorer significativement la corrélation. L'indice de stress hydrique développé dans ce travail constitue donc un potentiel facteur explicatif de la sinistralité des contrats MRC. Mais ce lien n'est pas univoque, et dépend de multiples facteurs. La présence d'irrigation, l'itinéraire technique cultural ou encore l'échelle spatiale d'intégration des données choisie peuvent bruite le signal de covariation entre l'indice de stress hydrique cumulé annuel et le ratio S/P. De plus, les travaux présentés en discussion de ce manuscrit utilisent un ratio S/P calculé à partir des coûts des sinistres déclarés pour tous les aléas climatiques assurés par l'assurance MRC. L'isolement des coûts uniquement dus à l'aléa sécheresse pourrait permettre d'améliorer la corrélation entre l'indice de stress hydrique et le ratio S/P des contrats d'assurance récolte, et de faire ainsi de cet indice un proxy robuste pour évaluer la volatilité assurantielle due au réchauffement climatique.

Dans le contexte de réchauffement climatique actuel et futur, où les événements de sécheresse extrême devraient être plus fréquents et plus intenses (*IPCC, 2021*), le lien de causalité entre l'indice de stress hydrique et la sinistralité des contrats d'assurance MultiRisque Climatique doit être étudié plus finement. La compréhension de l'impact du risque agro-climatique lié à la sécheresse sur la performance des contrats MRC est primordiale pour mieux maîtriser les coûts de l'assurance climatique sur récolte, et pour permettre aux assureurs agricoles de mettre en place des solutions de prévention et d'adaptation auprès du monde agricole.

Perspectives aux travaux de thèse

L'étude du climat, de sa variabilité et de ses impacts régionaux en contexte de dérèglement impose des réflexions autour du temps et de l'espace, un raisonnement au cœur de la géographie. Dans cette étude, la complexité du système climatique, multi-scalaire, est couplée à celle des agrosystèmes. Ces derniers déploient en effet des variabilités spatiales (selon les bassins de production étudiés) et temporelles (selon les cycles culturaux considérés) qui doivent être prises en compte dans l'évaluation des modifications de l'aléa climatique. Les travaux de cette thèse s'emploient à comprendre comment ce croisement entre l'évolution de l'aléa climatique et la vulnérabilité des cultures affecte le risque agro-climatique sécheresse sur le territoire français métropolitain. La rupture de stationnarité dans le cycle de l'eau, avancée par certains auteurs (*Milly et al., 2008*), va se décliner différemment selon les régions. Elle implique des changements structurels forts dans l'évolution du risque agro-climatique, dont certains effets sont déjà à l'œuvre et devraient s'intensifier au moins jusqu'au milieu du siècle.

Mécaniquement, le réchauffement climatique impose une hausse de la demande évaporative, à l'origine de situations de stress hydrique pour le couvert végétal. Depuis 2014/2015, les résultats suggèrent qu'une nouvelle étape du réchauffement climatique est enclenchée. À l'heure actuelle, rien ne dit qu'elle suive le même patron que la rupture de 1987/1988. Toutefois, ce schéma d'évolution, impliquant des points de bascule plus ou moins marqués, est de nature à se reproduire, eu égard à la forte non linéarité du système climatique. Il convient de penser les stratégies de prévention et d'adaptation en intégrant cette dimension d'effet seuil dans le changement. Le dépérissement massif

et brutal des épicéas en lien avec les sécheresses récentes en est un bon exemple (*Piedallu et al., 2023*). Le scénario du réchauffement climatique sur lequel les choix de notre société, de nos décideurs, nous mèneront va imposer le rythme de ces ruptures, et ainsi l'augmentation du risque. La vitesse du réchauffement est donc directement liée à la vitesse des modifications du risque agro-climatique. Cette problématique doit questionner l'ensemble des acteurs du monde agricole, des exploitants aux décideurs en passant par les assureurs, et les réunir dans l'objectif commun de trouver des solutions d'adaptation pertinentes.

Le changement climatique se traduit aussi par des modifications spatiales de l'aléa climatique. En fonction des saisons et des régions étudiées, la variabilité des changements de l'évapotranspiration et des précipitations peut aggraver ou compenser leurs effets respectifs sur la contrainte hydrique. Les impacts des modifications de l'aléa climatique sur le risque agro-climatique doivent être donc évalués à des échelles infra-saisonnières et infra-régionales, au travers d'études tenant compte des spécificités locales de chaque bassin de production agricole. Cette géographie du risque est fondamentale pour accompagner au mieux les territoires à s'adapter aux conséquences du changement climatique.

L'évaluation des modifications du risque et l'élaboration de scénarios de prévention et d'adaptation ne peut se faire correctement qu'en liant la recherche (fondamentale et appliquée) au monde socio-économique. C'est la force de cette thèse CIFRE, fruit d'une collaboration entre un laboratoire de recherche et un acteur majeur du monde agricole : l'assurance. L'étude du risque agro-climatique passe obligatoirement par une approche de recherche fondamentale pour qualifier et quantifier le changement climatique aux échelles pertinentes pour l'ensemble des parties prenantes. L'introduction de la vulnérabilité pour évaluer les modifications du risque, ainsi que la détermination des échelles spatiales pertinentes pour l'étude, nécessite la prise en compte de l'expertise de l'entreprise, qui, en qualité d'assureur, a une vision globale et complète des enjeux de chaque territoire. La mesure du risque du côté assurantiel, par le recensement précis et continu de l'évolution des coûts des sinistres et du montant des primes et des capitaux assurés, est primordial. C'est avec ce type de base de données que la collaboration entre la recherche scientifique et le monde socio-économique pour l'étude du risque agro-climatique et de ses impacts peut se faire. Au terme de ces trois années de doctorat, je ne peux que recommander aux assureurs de pérenniser et affiner les inventaires de leurs données assurantielles, et de continuer à se tourner vers la recherche pour coconstruire des stratégies d'adaptation pertinentes, locales et durables.

Références bibliographiques

- Ageorges, A., & Terrier, N., 2014. Impact du stress hydrique sur la qualité de la vendange : l'exemple des flavonoïdes. *Innov. Agron.* 38, 87–95.
- Agreste, 2022. Agreste Conjoncture - Grandes cultures.
- Agreste, 2021. Graphagri'2021 - L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires. Agreste 224.
- Agreste, 2020. Agreste Conjoncture - Grandes cultures.
- Alcamo, J., Dronin, N., Endejan, M., Golubev, G., & Kirilenko, A., 2007. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Glob. Environ. Change* 17, 429–444. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. (No. 56), FAO Irrigation and drainage. Food and Agriculture Organization, Roma, Italy.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P., & Royo, C., 2002. Plant Breeding and Drought in C3 Cereals: What Should We Breed For? *Ann. Bot.* 89, 925–940. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf049>
- Arvalis Institut du Végétal, 2022. Les Essentiels d'ARVALIS - Comment s'élabore le rendement des céréales à paille ? [WWW Document]. ARVALIS. URL <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/comment-selabore-le-rendement> (accessed 11.18.22).
- Aubry, M., 2022. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique pour la vigne (Pinot Noir). Évaluation et analyse en contexte de réchauffement climatique abrupt, sur la période historique de 1960 à 2020. Institut Agro Dijon.
- Babusiaux, C., 2000. L'assurance récolte et la protection contre les risques en agriculture. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.
- Banik, P., Zeng, W., Tai, H., Bizimungu, B., & Tanino, K., 2016. Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *Environ. Exp. Bot.* 126, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.008>
- Barry, D., & Hartigan, J.A., 1993. A Bayesian Analysis for Change Point Problems. *J. Am. Stat. Assoc.* 88, 309–319. <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10594323>
- Barutcular, C., Dizlek, H., EL-Sabagh, A., Sahin, T., Elsabagh, M., & Islam, S., 2016. Nutritional quality of maize in response to drought stress during grain-filling stages in mediterranean climate condition. *J. Exp. Biol. Agric. Sci.* 4, 644–652. [https://doi.org/10.18006/2016.4\(Issue6\).644.652](https://doi.org/10.18006/2016.4(Issue6).644.652)
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A., 2016. Plant adaptation to drought stress. *F1000Research* 5, F1000 Faculty Rev-1554. <https://doi.org/10.12688/f1000research.7678.1>
- Beillouin, D., Schauburger, B., Bastos, A., Ciais, P., & Makowski, D., 2020. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 375, 20190510. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0510>
- Ben-Ari, T., Boé, J., Ciais, P., Lecerf, R., Van der Velde, M., & Makowski, D., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nat. Commun.* 9, 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>
- Beven, K.J., & Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Boé, J., & Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 691–708. <https://doi.org/10.5194/hess-18-691-2014>
- Boé, J., Terray, L., Martin, E., & Habets, F., 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.* 45. <https://doi.org/10.1029/2008WR007437>

- Bois, B., 2007. Cartographie agroclimatique à méso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin (phdthesis). Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- Boone, A., Calvet, J.-C., & Noilhan, J., 1999. Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force–Restore Method. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 38, 1611–1630. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2)
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T., & Noilhan, J., 2000. The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 39, 1544–1569. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1544:TIOATIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1544:TIOATIO>2.0.CO;2)
- Booth, B.B.B., Dunstone, N.J., Halloran, P.R., Andrews, T., & Bellouin, N., 2012. Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability. *Nature* 484, 228–232. <https://doi.org/10.1038/nature10946>
- Boucher, L., Duval, L., Karame, F., Phelippe-Guinvarc’h, M., & Prudon, E., 2019. MARCHÉ DGPE-2017-085 - Évaluation du Programme national de gestion des risques et d’assistance technique (PNGRAT), et en particulier de l’assurance récolte - Rapport d’évaluation. DECID & RISK, Paris.
- Boyer, J.S., 1982. Plant Productivity and Environment. *Science* 218, 443–448. <https://doi.org/10.1126/science.218.4571.443>
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., & Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- Brisson, N., & Perrier, A., 1991. A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resour. Res.* 27, 719–727. <https://doi.org/10.1029/91WR00075>
- Brisson, N.N., Launay, M., Mary, B.B., & Beaudoin, N.N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae.
- Brulebois, E., Castel, T., Richard, Y., Chateau-Smith, C., & Amiotte-Suchet, P., 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *J. Hydrol.* 531, 892–901. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.026>
- Calderini, D.F., & Slafer, G.A., 1998. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Res.* 57, 335–347. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00080-X)
- Castel, T., Lecomte, C., Richard, Y., Lejeune-Hénaut, I., & Larmure, A., 2017. Frost stress evolution and winter pea ideotype in the context of climate warming at a regional scale. *OCL* 24, D106. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017002>
- Ceglar, A., Zampieri, M., Gonzalez-Reviriego, N., Ciais, P., Schauburger, B., & Velde, M.V. der, 2020. Time-varying impact of climate on maize and wheat yields in France since 1900. *Environ. Res. Lett.* 15, 094039. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba1be>
- Celette, F., 2007. Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous le climat méditerranéen. Montpellier SupAgro.
- Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., & Caballero, Y., 2010. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Geosci.* 342, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.02.001>
- Charpentier, A., James, M., & Ali, H., 2022. Predicting drought and subsidence risks in France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 22, 2401–2418. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2401-2022>
- Charrier, G., Delzon, S., Domec, J.-C., Zhang, L., Delmas, C.E.L., Merlin, I., Corso, D., King, A., Ojeda, H., Ollat, N., Prieto, J.A., Scholach, T., Skinner, P., van Leeuwen, C., & Gambetta, G.A., 2018. Drought will not leave your glass empty: Low risk of hydraulic failure revealed by long-term drought observations in world’s top wine regions. *Sci. Adv.* 4, eaao6969. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6969>
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., & de Lacaze, X., 2013. Quels impacts des changements

- climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *Houille Blanche - Rev. Int. Eau* 5–15. <https://doi.org/10.1051/lhb/2013027>
- Chaves, M.M., & Oliveira, M.M., 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *J. Exp. Bot.* 55, 2365–2384. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh269>
- Choisnel, E., 1985. Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. Presented at the Les besoins en eau des cultures, conférence internationale, Paris, Versailles, 11-14 septembre 1984, pp. 115–132.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., & Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
- Creed, I.F., Hwang, T., Lutz, B., & Way, D., 2015. Climate warming causes intensification of the hydrological cycle, resulting in changes to the vernal and autumnal windows in a northern temperate forest. *Hydrol. Process.* 29, 3519–3534. <https://doi.org/10.1002/hyp.10450>
- Dai, M., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Guo, Y., Wang, L., Fang, W., Li, P., & Zheng, X., 2020. Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. *Agric. Water Manag.* 231, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106003>
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P.-A., 2016. Global Synthesis of Drought Effects on Maize and Wheat Production. *PLOS ONE* 11, e0156362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362>
- Dayon, G., Boé, J., Martin, É., & Gailhard, J., 2018. Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geosci.* 350, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.03.001>
- de Laat, A.T.J., & Crok, M., 2013. A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening? *Atmospheric Clim. Sci.* 03, 291–300. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.33031>
- Decharme, B., Boone, A., Delire, C., & Noilhan, J., 2011. Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 116. <https://doi.org/10.1029/2011JD016002>
- Decharme, B., Brun, E., Boone, A., Delire, C., Le Moigne, P., & Morin, S., 2016. Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *The Cryosphere* 10, 853–877. <https://doi.org/10.5194/tc-10-853-2016>
- Desbruyères, D., Chafik, L., & Maze, G., 2021. A shift in the ocean circulation has warmed the subpolar North Atlantic Ocean since 2016. *Commun. Earth Environ.* 2, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00120-y>
- Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2022. Réforme de l'assurance récolte. Qu'est-ce qui change au 1er janvier 2023 ?
- Dobler, C., Stötter, J., & Schöberl, F., 2010. Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Lech Valley in northern Alps. *J. Water Clim. Change* 1, 207–218. <https://doi.org/10.2166/wcc.2010.122>
- Dong, B., Sutton, R.T., & Shaffrey, L., 2017. Understanding the rapid summer warming and changes in temperature extremes since the mid-1990s over Western Europe. *Clim. Dyn.* 48, 1537–1554. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3158-8>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Bulletin FAO d'Irrigation et de drainage. FAO, Rome, Italy.
- Douvillé, C., 2019. L'assurance agricole en 2018 - Etude Juillet 2019. Fédération Française de l'Assurance, Direction des études économiques et statistiques.

- Douville, H., Ribes, A., Decharme, B., Alkama, R., & Sheffield, J., 2013. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nat. Clim. Change* 3, 59–62. <https://doi.org/10.1038/nclimate1632>
- Dragos, C.M., Dragos, S.L., Mare, C., Muresan, G.M., & Purcel, A.-A., 2023. Does risk assessment and specific knowledge impact crop insurance underwriting? Evidence from Romanian farmers. *Econ. Anal. Policy* 79, 343–358. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.06.025>
- Dunn, P.K., 2004. Occurrence and quantity of precipitation can be modelled simultaneously. *Int. J. Climatol.* 24, 1231–1239. <https://doi.org/10.1002/joc.1063>
- Dunn, P.K., & Smyth, G.K., 2005. Series evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities. *Stat. Comput.* 15, 267–280. <https://doi.org/10.1007/s11222-005-4070-y>
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., & Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.* 18, 65–71. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011277>
- Durand, Yves, Laternser, Martin, Giraud, G., Gérald, Etchevers, Pierre, Lesaffre, Bernard, Mérindol, L., & Laurent, 2009. Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958–2002): Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48, 429. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1808.1>
- Erdman, C., & Emerson, J.W., 2008. bcp: An R Package for Performing a Bayesian Analysis of Change Point Problems. *J. Stat. Softw.* 23, 1–13. <https://doi.org/10.18637/jss.v023.i03>
- Evan, A.T., Vimont, D.J., Heidinger, A.K., Kossin, J.P., & Bennartz, R., 2009. The Role of Aerosols in the Evolution of Tropical North Atlantic Ocean Temperature Anomalies. *Science* 324, 778–781. <https://doi.org/10.1126/science.1167404>
- Ewert, F., Rötter, R.P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, M., Semenov, M.A., Wallach, D., Porter, J.R., Stewart, D., Verhagen, J., Gaiser, T., Palosuo, T., Tao, F., Nendel, C., Roggero, P.P., Bartošová, L., & Asseng, S., 2015. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environ. Model. Softw.* 72, 287–303. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003>
- Falkenmark, M., & Rockström, J., 2006. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 132, 129–132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129))
- Fédération Française de l'Assurance, 2023. L'assurance agricole en 2022 - Assurances de biens et de responsabilité. Fédération Française de l'Assurance, Direction des études économiques et statistiques, Paris.
- Finger, R., 2010. Evidence of slowing yield growth - The example of Swiss cereal yields. *Food Policy* 35, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2009.11.004>
- Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J., Gerber, J.S., Havlik, P., Hasegawa, T., Herrero, M., Krisztin, T., van Meijl, H., Powell, T., Sands, R., Stehfest, E., West, P.C., & Smith, P., 2019. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Glob. Environ. Change* 58, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022. FAOSTAT.
- Fusco, G., Miglietta, P.P., & Pririni, D., 2018. How Drought Affects Agricultural Insurance Policies: The Case of Italy. *J. Sustain. Dev.* 11, 1–13. <https://doi.org/doi:10.5539/jsd.v11n2p1>
- Gaiotti, F., Nerva, L., Fila, G., Lovat, L., Belfiore, N., & Chitarra, W., 2023. Comparative effects of drought stress on leaf gas exchange, foliar ABA and leaf orientation in four grapevine cultivars grown in Northern Italy. *Physiol. Plant.* 175, e14063. <https://doi.org/10.1111/ppl.14063>
- Gambarini, A., 2022. Déjà 150 millions d'euros de sinistres entre juin et juillet 2022. *Fr. Agric.*
- Gate, P., 1995. *Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture*. Tec & Doc-Lavoisier.
- Gaupp, F., Hall, J., Hochrainer-Stigler, S., & Dadson, S., 2020. Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nat. Clim. Change* 10, 54–57. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0600-z>

- Gebre, S., & Ludwig, F., 2015. Hydrological Response to Climate Change of the Upper Blue Nile River Basin: Based on IPCC Fifth Assessment Report (AR5). *J. Climatol. Weather Forecast.* 03. <https://doi.org/10.4172/2332-2594.1000121>
- Gervois, S., Ciais, P., de Noblet-Ducoudré, N., Brisson, N., Vuichard, N., & Viovy, N., 2008. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century. *Glob. Biogeochem. Cycles* 22. <https://doi.org/10.1029/2007GB003018>
- Gibelin, A.-L., Dubuisson, B., Corre, L., & Madec, T., 2015. Evolution of temperature and precipitation in France since the 1950s: a new homogenised dataset. Presented at the European Geosciences Union, Vienna, Austria, p. 14242.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villetta, S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Model.* 116, 269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)
- Grassini, P., Eskridge, K.M., & Cassman, K.G., 2013. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nat. Commun.* 4, 2918. <https://doi.org/10.1038/ncomms3918>
- Grillakis, M.G., 2019. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Sci. Total Environ.* 660, 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>
- Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (France), 2011. L'état des sols de France: les services rendus par les sols, la diversité des sols de France, l'état des sols de France et son évolution. GIS Sol, S.I.
- Gu, L., Chen, J., Yin, J., Xu, C.-Y., & Zhou, J., 2020. Responses of Precipitation and Runoff to Climate Warming and Implications for Future Drought Changes in China. *Earths Future* 8, e2020EF001718. <https://doi.org/10.1029/2020EF001718>
- Guyot, G., 2013. *Climatologie de l'environnement*, Dunod. ed, Sciences Sup.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Moigne, P.L., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Seguí, P.Q., Rousset-Regimbeau, F., & Viennot, P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>
- Habets, F., Etchevers, P., Golaz, C., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., & Ottlé, C., 1999. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 104, 31145–31172. <https://doi.org/10.1029/1999JD901008>
- Hagenlocher, M., Meza, I., Anderson, C.C., Min, A., Renaud, F.G., Walz, Y., Siebert, S., & Sebesvari, Z., 2019. Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. *Environ. Res. Lett.* 14, 083002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab225d>
- Hamot, C., 2023. Etude de l'évolution des longs et très longs épisodes secs en France métropolitaine depuis les années 1960. Institut Agro Dijon.
- Hansen, J.E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L.S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J.C., von Schuckmann, K., Loeb, N.G., Osman, M.B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., & Li, J., 2023. Global warming in the pipeline. *Oxf. Open Clim. Change* 3, kgad008. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>
- Hare, S.R., & Mantua, N.J., 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Prog. Oceanogr.* 47, 103–145. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00033-1)
- Hartick, C., Furusho-Percot, C., Clark, M.P., & Kollet, S., 2022. An Interannual Drought Feedback Loop Affects the Surface Energy Balance and Cloud Properties. *Geophys. Res. Lett.* 49, e2022GL100924. <https://doi.org/10.1029/2022GL100924>
- Hawkins, E., Fricker, T.E., Challinor, A.J., Ferro, C.A.T., Ho, C.K., & Osborne, T.M., 2013. Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s. *Glob. Change Biol.* 19, 937–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12069>
- He, W., Yang, J.Y., Qian, B., Drury, C.F., Hoogenboom, G., He, P., Lapen, D., & Zhou, W., 2018. Climate change impacts on crop yield, soil water balance and nitrate leaching in the semiarid and

- humid regions of Canada. *PLOS ONE* 13, e0207370. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207370>
- Held, I.M., & Soden, B.J., 2006. Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *J. Clim.* 19, 5686–5699. <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Hendrawan, V.S.A., Kim, W., Touge, Y., Ke, S., & Komori, D., 2022. A global-scale relationship between crop yield anomaly and multiscalar drought index based on multiple precipitation data. *Environ. Res. Lett.* 17, 014037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac45b4>
- Higgins, P.A.T., & Vellinga, M., 2004. Ecosystem Responses to Abrupt Climate Change: Teleconnections, Scale and the Hydrological Cycle. *Clim. Change* 64, 127–142. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024672.41571.ba>
- Hlaváčková, M., Klem, K., Rapantová, B., Novotná, K., Urban, O., Hlavinka, P., Smutná, P., Horáková, V., Škarpa, P., Pohanková, E., Wimmerová, M., Orság, M., Jurečka, F., & Trnka, M., 2018. Interactive effects of high temperature and drought stress during stem elongation, anthesis and early grain filling on the yield formation and photosynthesis of winter wheat. *Field Crops Res.* 221, 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.022>
- Holmer, B., 2008. Fluctuations of winter wheat yields in relation to length of winter in Sweden 1866 to 2006. *Clim. Res.* 36, 241–252. <https://doi.org/10.3354/cr00737>
- Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *J. Hydrol.* 319, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R.S., Clague, J.J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D.R., Greenwood, G., Mark, B.G., Milner, A.M., Weingartner, R., & Winder, M., 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earths Future* 5, 418–435. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>
- Institut National de l'information Géographique et Forestière, 2019. RPG Version 2.0 - Descriptif de contenu et de livraison. Les bases vectorielles 28.
- International Maritime Organization, 2023. Index of MEPC Resolutions and Guidelines related to MARPOL Annex VI [WWW Document]. URL <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx#1> (accessed 12.18.23).
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacquart, C., & Choisnel, E., 1995. Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie. *La Météorologie* 8ème série, 29–44. <https://doi.org/10.4267/2042/51939>
- Jamieson, P.D., Martin, R.J., & Francis, G.S., 1995. Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 23, 55–66. <https://doi.org/10.1080/01140671.1995.9513868>
- Jørgensen, B., 1987. Exponential Dispersion Models. *J. R. Stat. Soc. Ser. B Methodol.* 49, 127–145. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1987.tb01685.x>
- Kangur, K., Ginter, K., Kangur, A., Kangur, P., & Möls, T., 2020. How Did the Late 1980s Climate Regime Shift Affect Temperature-Sensitive Fish Population Dynamics: Case Study of Vendace (*Coregonus albula*) in a Large North-Temperate Lake. *Water* 12, 2694. <https://doi.org/10.3390/w12102694>
- Keevallik, S., 2011. Shifts in meteorological regime of the late winter and early spring in Estonia during recent decades. *Theor. Appl. Climatol.* 105, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0356-x>
- Khanal, S., Lutz, A. f., Kraaijenbrink, P.D.A., van den Hurk, B., Yao, T., & Immerzeel, W.W., 2021. Variable 21st Century Climate Change Response for Rivers in High Mountain Asia at Seasonal to Decadal Time Scales. *Water Resour. Res.* 57, e2020WR029266. <https://doi.org/10.1029/2020WR029266>

- Knight, J.R., Folland, C.K., & Scaife, A.A., 2006. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL026242>
- Kontovas, C.A., 2020. Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation. *Mar. Policy* 113, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103815>
- Kruschke, J.K., 2013. Bayesian estimation supersedes the t test. *J. Exp. Psychol. Gen.* 142, 573–603. <https://doi.org/10.1037/a0029146>
- Labat, D., Godd ris, Y., Probst, J.L., & Guyot, J.L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Adv. Water Resour.* 27, 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.02.020>
- Labrousse, C., Ludwig, W., Pinel, S., Sadaoui, M., & Lacquement, G., 2020. Unravelling Climate and Anthropogenic Forcings on the Evolution of Surface Water Resources in Southern France. *Water* 12, 3581. <https://doi.org/10.3390/w12123581>
- Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.-L., & Pergaud, J., 2020. The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif. *Sci. Rep.* 10, 10420. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7>
- Laurent, L., Ullmann, A., & Castel, T., 2023. How abrupt changes in surface temperature impacts water cycle over France? The case study of winter bread wheat area. *Total Environ. Res. Themes* 8, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100079>
- Laurent, L., Ullmann, A., & Castel, T., under review. How abrupt changes in surface temperature impact the main climatic components of the local water cycle over France? *J. Hydrol.*
- Le Bas, C., 2018. Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France. <https://doi.org/10.15454/JPB9RB>
- Le Gouis, J., Oury, F.-X., & Charmet, G., 2020. How changes in climate and agricultural practices influenced wheat production in Western Europe. *J. Cereal Sci.* 93, 102960. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102960>
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Bo , J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., & Rousset-Regimbeau, F., 2020. The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France. *Geosci. Model Dev.* 13, 3925–3946. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., & Schultz, H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Funct. Plant Biol.* 30, 699–710. <https://doi.org/10.1071/fp02222>
- Ledoux, E., Girard, G., de Marsily, G., Villeneuve, J.P., & Deschenes, J., 1989. Spatially Distributed Modeling: Conceptual Approach, Coupling Surface Water And Groundwater, in: Morel-Seytoux, H.J. (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 435–454. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_16
- Leeuwen, C. van, & Darriet, P., 2016. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *J. Wine Econ.* 11, 150–167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- Leeuwen, C. van, Tr goat, O., Chon , X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudill re, J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One* 43, 121–134. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>
- Légifrance, 2022. LOI n  2022-298 du 2 mars 2022 d’orientation relative   une meilleure diffusion de l’assurance récolte en agriculture et portant réforme des outils de gestion des risques climatiques en agriculture (1) - Légifrance.
- Li, Y., Ye, W., Wang, M., & Yan, X., 2009. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. *Clim. Res.* 39, 31–46. <https://doi.org/10.3354/cr00797>
- Lidsky, V., Maudet, C., Malpel, G.-P., Gerster, F., Helfter, M., Lejeune, H., & Le Theule, F.-G., 2017. Les outils de gestion des risques en agriculture. Inspection Générale des Finances & Conseil général de l’alimentation, de l’agriculture et des espaces ruraux.

- Lin, M., & Huybers, P., 2012. Reckoning wheat yield trends. *Environ. Res. Lett.* 7, 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024016>
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., & Naylor, R.L., 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* 319, 607–610. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>
- Lobell, D.B., Sibley, A., & Ivan Ortiz-Monasterio, J., 2012. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nat. Clim. Change* 2, 186–189. <https://doi.org/10.1038/nclimate1356>
- Lovisolo, C., Lavoie-Lamoureux, A., Tramontini, S., & Ferrandino, A., 2016. Grapevine adaptations to water stress: new perspectives about soil/plant interactions. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 28, 53–66. <https://doi.org/10.1007/s40626-016-0057-7>
- Mahrt, L., & Pan, H., 1984. A two-layer model of soil hydrology. *Bound.-Layer Meteorol.* 29, 1–20. <https://doi.org/10.1007/BF00119116>
- Malcolm, J.R., Liu, C., Neilson, R.P., Hansen, L., & Hannah, L., 2006. Global Warming and Extinctions of Endemic Species from Biodiversity Hotspots. *Conserv. Biol.* 20, 538–548. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00364.x>
- Mandal, U., Sena, D.R., Dhar, A., Panda, S.N., Adhikary, P.P., & Mishra, P.K., 2021. Assessment of climate change and its impact on hydrological regimes and biomass yield of a tropical river basin. *Ecol. Indic.* 126, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107646>
- Mann, M.E., & Emanuel, K.A., 2006. Atlantic hurricane trends linked to climate change. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 87, 233–241. <https://doi.org/10.1029/2006EO240001>
- Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M., & Leuning, M., 2017. How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere* 11, 517–529. <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., & Lacaze, R., 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *J. Clim.* 16, 1261–1282. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2)
- Maury, O., Garcia de Cortazar Atauri, I., Bertuzzi, P., Persyn, B., & Lagier, M., 2023. SICLIMA : Système d'information de données climatiques maillées. <https://doi.org/10.15454/HIPDPZ>
- Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Fasullo, J.T., Hu, A., & Trenberth, K.E., 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nat. Clim. Change* 1, 360–364. <https://doi.org/10.1038/nclimate1229>
- Meyer, W.S., & Green, G.C., 1981. Plant indicators of wheat and soybean crop water stress. *Irrig. Sci.* 2, 167–176. <https://doi.org/10.1007/BF00257978>
- Meyer, W.S., & Green, G.C., 1980. Water Use by Wheat and Plant Indicators of Available Soil Water. *Agron. J.* 72, 253–257. <https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200020002x>
- Michel, L., & Makowski, D., 2013. Comparison of Statistical Models for Analyzing Wheat Yield Time Series. *PLOS ONE* 8, e78615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078615>
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J.C.J., Lang, H., Parmet, B.W.A.H., Schädler, B., Schulla, J., & Wilke, K., 2001. Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin. *Clim. Change* 49, 105–128. <https://doi.org/10.1023/A:1010784727448>
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., & Stouffer, R.J., 2008. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science* 319, 573–574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2023. Assurance multirisque climatique des récoltes : réponses aux questions fréquemment posées [WWW Document]. Ministère Agric. Souveraineté Aliment. URL <https://agriculture.gouv.fr/assurance-multirisque-climatique-des-recoltes-reponses-aux-questions-frequemment-posees> (accessed 10.19.23).
- Miralles, D.G., Gentine, P., Seneviratne, S.I., & Teuling, A.J., 2019. Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1436, 19–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>

- Mohammed, S., Alsafadi, K., Enaruvbe, G.O., Bashir, B., Elbeltagi, A., Széles, A., Alsalman, A., & Harsanyi, E., 2022. Assessing the impacts of agricultural drought (SPI/SPEI) on maize and wheat yields across Hungary. *Sci. Rep.* 12, 8838. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12799-w>
- Moisselin, J.-M., Schneider, M., & Canellas, C., 2002. Les changements climatiques en France au XX^e siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie* 8, 45–56. <https://doi.org/10.4267/2042/36233>
- Nakamoto, H., & Hiyama, T., 1999. Heat shock proteins and temperature stress, in: *Handbook of Plant and Crop Stress*. University of Arizona, Tucson, Arizona, pp. 399–416.
- NeSmith, D.S., & Ritchie, J.T., 1992. Maize (*Zea mays* L.) response to a severe soil water-deficit during grain-filling. *Field Crops Res.* 29, 23–35. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90073-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90073-I)
- Noilhan, J., & Mahfouf, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Planet. Change, Soil Moisture Simulation* 13, 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7)
- Noilhan, J., & Planton, S., 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Weather Rev.* 117, 536–549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)
- Norikane, J.H., Tynes, G.K., & Levine, H.G., 2003. Determining the Extractable Water Limit for Wheat in a Substrate-Based Media Designed for Space Flight Applications. *Appl. Eng. Agric.*
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., & Deloire, A., 2002. Influence of Pre- and Postveraison Water Deficit on Synthesis and Concentration of Skin Phenolic Compounds during Berry Growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am. J. Enol. Vitic.* 53, 261–267.
- Ojeda, H., & Saurin, N., 2014. L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innov. Agron.* 38, 97–108.
- Osborne, T.M., & Wheeler, T.R., 2013. Evidence for a climate signal in trends of global crop yield variability over the past 50 years. *Environ. Res. Lett.* 8, 024001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024001>
- Ouvrié, M., 2020. Les assurances climatiques : état des lieux et perspectives de déploiement pour le vignoble de Bourgogne. Confédération des Appellations et des Vignerons de Bourgogne, Beaune.
- Pandey, V., & Shukla, A., 2015. Acclimation and Tolerance Strategies of Rice under Drought Stress. *Rice Sci.* 22, 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2015.04.001>
- Parkash, V., & Singh, S., 2020. A Review on Potential Plant-Based Water Stress Indicators for Vegetable Crops. *Sustainability* 12, 3945. <https://doi.org/10.3390/su12103945>
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., & P. Laurila, I., 2009. Cereal yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realisation. *Field Crops Res.* 110, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.007>
- Petit, S., Castel, T., Henrion, G., Richard, Y., Traore, M., Vergote, M.-H., & Young, J., 2023. Changing local climate patterns through hail suppression systems: conflict and inequalities between farmers and wine producers in the Burgundy Region (France). *Reg. Environ. Change* 23, 89. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02076-5>
- Philipona, R., Behrens, K., & Ruckstuhl, C., 2009. How declining aerosols and rising greenhouse gases forced rapid warming in Europe since the 1980s. *Geophys. Res. Lett.* 36. <https://doi.org/10.1029/2008GL036350>
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y., Zhang, T., & Fang, J., 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467, 43–51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- Piedallu, C., Dallery, D., Bresson, C., Legay, M., Gégout, J.-C., & Pierrat, R., 2023. Spatial vulnerability assessment of silver fir and Norway spruce dieback driven by climate warming. *Landsc. Ecol.* 38, 341–361. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01570-1>

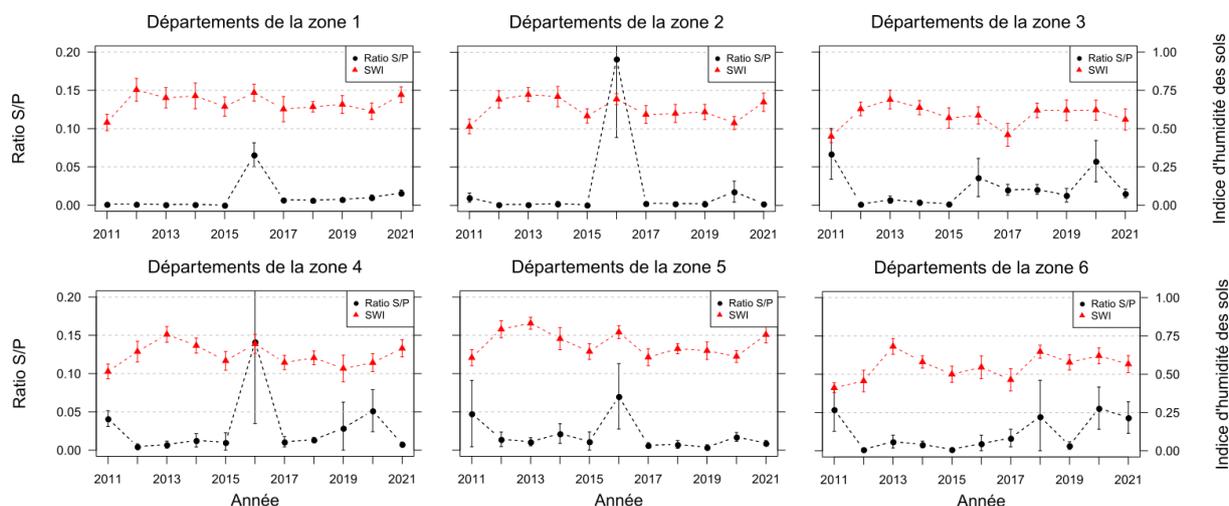
- Planton, S., Déqué, M., Douville, H., & Spagnoli, B., 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *Comptes Rendus Geosci.* 337, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.003>
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., & Blong, R., 2005. The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now. *Risk Anal.* 25, 1483–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694.x>
- Quevauviller, P., 2011. Adapting to climate change: reducing water-related risks in Europe – EU policy and research considerations. *Environ. Sci. Policy, Adapting to Climate Change: Reducing Water-related Risks in Europe* 14, 722–729. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.02.008>
- Quintana-Seguí, P., Moigne, P.L., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., & Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [WWW Document]. URL <https://www.r-project.org/> (accessed 12.30.23).
- Ray, D.K., Ramankutty, N., Mueller, N.D., West, P.C., & Foley, J.A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3, 1293. <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>
- Raymond, F., & Ullmann, A., 2021. Variabilité spatio-temporelle des séquences sèches en France depuis 1950. *Cybergeo Eur. J. Geogr.* <https://doi.org/10.4000/cybergeo.37260>
- Raymond, F., Ullmann, A., & Camberlin, P., 2018. Très longs épisodes secs hivernaux dans le bassin méditerranéen : variabilité spatio-temporelle et impact sur la production céréalière en Espagne. *Cybergeo Eur. J. Geogr.* <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29156>
- Reid, P.C., Borges, M. de F., & Svendsen, E., 2001. A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery. *Fish. Res.* 9.
- Reid, P.C., Hari, R.E., Beaugrand, G., Livingstone, D.M., Marty, C., Straile, D., Barichivich, J., Goberville, E., Adrian, R., Aono, Y., Brown, R., Foster, J., Groisman, P., Hélaouët, P., Hsu, H.-H., Kirby, R., Knight, J., Kraberg, A., Li, J., Lo, T.-T., Myneni, R.B., North, R.P., Pounds, J.A., Sparks, T., Stübi, R., Tian, Y., Wiltshire, K.H., Xiao, D., & Zhu, Z., 2016. Global impacts of the 1980s regime shift. *Glob. Change Biol.* 22, 682–703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>
- Riou, C., Pieri, P., & Clech, B.L., 1994. Consommation d'eau de la vigne en conditions hydriques non limitantes. *Formulation simplifiée de la transpiration. Vitis* 33, 109.
- Riou, C., Valancogne, C., & Pieri, P., 1989. Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie* 9, 441–450. <https://doi.org/10.1051/agro:19890502>
- Robson, J., Sutton, R., Lohmann, K., Smith, D., & Palmer, M.D., 2012. Causes of the Rapid Warming of the North Atlantic Ocean in the Mid-1990s. *J. Clim.* 25, 4116–4134. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00443.1>
- Robson, J.I., Sutton, R.T., & Smith, D.M., 2012. Initialized decadal predictions of the rapid warming of the North Atlantic Ocean in the mid 1990s. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL053370>
- Rossi, M.W., Whipple, K.X., & Vivoni, E.R., 2016. Precipitation and evapotranspiration controls on daily runoff variability in the contiguous United States and Puerto Rico. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 121, 128–145. <https://doi.org/10.1002/2015JF003446>
- Ruckstuhl, C., Philipona, R., Behrens, K., Coen, M.C., Dürr, B., Heimo, A., Mätzler, C., Nyeki, S., Ohmura, A., Vuilleumier, L., Weller, M., Wehrli, C., & Zelenka, A., 2008. Aerosol and cloud effects on solar brightening and the recent rapid warming. *Geophys. Res. Lett.* 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL034228>
- Ruggieri, E., 2013. A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. *Int. J. Climatol.* 33, 520–528. <https://doi.org/10.1002/joc.3447>

- Sadras, V.O., & Milroy, S.P., 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Res.* 47, 253–266. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00014-7)
- Sah, R.P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V.K., Chakravarty, M.K., Narayan, S.C., Rana, M., & Moharana, D., 2020. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Sci. Rep.* 10, 2944. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., & Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332–336. <https://doi.org/10.1038/nature02300>
- Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H., & Ciais, P., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Sci. Rep.* 8, 16865. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T.E.E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübke, T., Nelson, D.B., Rammig, A., Rigling, A., Rose, L., Ruehr, N.K., Schumann, K., Weiser, F., Werner, C., Wohlgemuth, T., Zang, C.S., & Kahmen, A., 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic Appl. Ecol.* 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
- Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H.-J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G., 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Secur.* 5, 291–317. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y>
- Soubeyroux, J.-M., Martin, E., Franchisteguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., Regimbeau, F., Vidal, J.-P., Lemoigne, P., & Morel, S., 2008. Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie* 8, 40. <https://doi.org/10.4267/2042/21890>
- Soubeyroux, J.-M., Neppel, L., Veysseire, J.-M., Trambly, Y., Carreau, J., & Gouget, V., 2015. Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique. *Houille Blanche* 101, 27–33. <https://doi.org/10.1051/lhb/2015004>
- Spiertz, J.H.J., & Ewert, F., 2009. Crop production and resource use to meet the growing demand for food, feed and fuel: opportunities and constraints. *NJAS Wagening. J. Life Sci.* 56, 281–300. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(09\)80001-8](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(09)80001-8)
- Spinoni, J., Vogt, J.V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A., 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *Int. J. Climatol.* 38, 1718–1736. <https://doi.org/10.1002/joc.5291>
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., & Jódar, J., 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 2367–2382. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2367-2010>
- Supit, I., van Diepen, C.A., de Wit, A.J.W., Kabat, P., Baruth, B., & Ludwig, F., 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agric. Syst.* 103, 683–694. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.009>
- Sutton, R.T., & Dong, B., 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. *Nat. Geosci.* 5, 788–792. <https://doi.org/10.1038/ngeo1595>
- Terray, L., 2012. Evidence for multiple drivers of North Atlantic multi-decadal climate variability. *Geophys. Res. Lett.* 39. <https://doi.org/10.1029/2012GL053046>
- Terray, L., & Boé, J., 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geosci.* 345, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.003>
- Teuling, A.J., 2018. A hot future for European droughts. *Nat. Clim. Change* 8, 364–365. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0154-5>

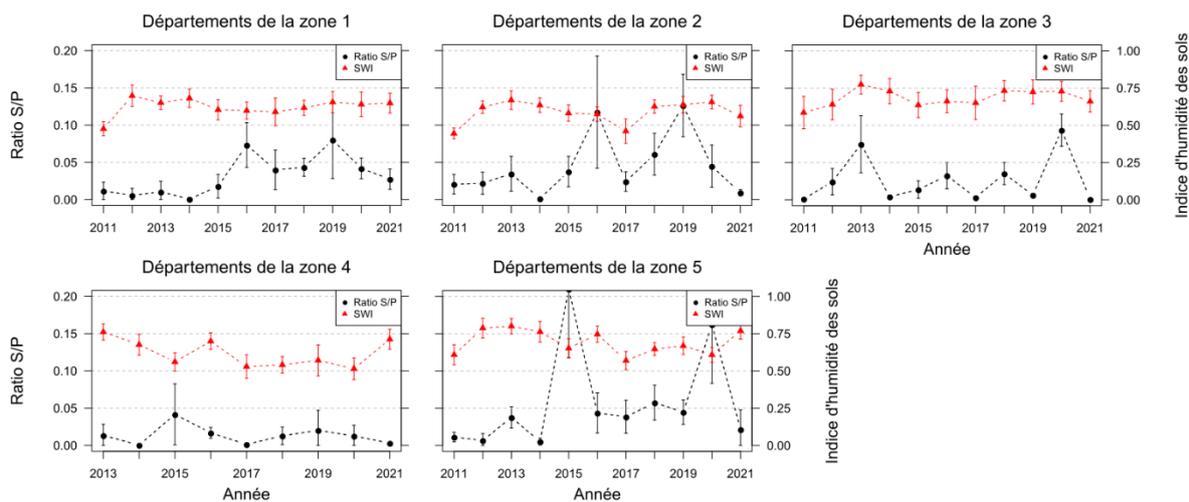
- Teuling, A.J., Van Loon, A.F., Seneviratne, S.I., Lehner, I., Aubinet, M., Heinesch, B., Bernhofer, C., Grünwald, T., Prasse, H., & Spank, U., 2013. Evapotranspiration amplifies European summer drought. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2071–2075. <https://doi.org/10.1002/grl.50495>
- Tolentino, P.L.M., Poortinga, A., Kanamaru, H., Keesstra, S., Maroulis, J., David, C.P.C., & Ritsema, C.J., 2016. Projected Impact of Climate Change on Hydrological Regimes in the Philippines. *PLOS ONE* 11, e0163941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163941>
- Tweedie, M.C.K., 1984. An index which distinguishes between some important exponential families., in: *Statistics: Applications and New Directions. Proceedings of the Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference.* Indian Statistical Institute, Calcutta, pp. 579–604.
- Valo, M., 2022. Historic drought persists in France despite recent rains. *Le Monde.fr*.
- van Lanen, H.A.J., & Tallaksen, L.M., 2004. *Hydrological drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Developments in Water Science.* Elsevier.
- van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A., 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One* 51, 147–154. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1647>
- van Oldenborgh, G.J., Drijfhout, S., van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., Hazeleger, W., & Dijkstra, H., 2009. Western Europe is warming much faster than expected. *Clim Past* 12.
- Verslues, P.E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., & Zhu, J.-K., 2006. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant J.* 45, 523–539. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2005.02593.x>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.* 30, 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J., & Soubeyroux, J.-M., 2012. Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 2935–2955. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2935-2012>
- Wang, J., Wang, E., Luo, Q., & Kirby, M., 2009. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia. *Clim. Change* 96, 79–96. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9599-x>
- Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Ellis, R.H., Porter, J.R., & Vara Prasad, P.V., 2000. Temperature variability and the yield of annual crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 82, 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00224-3)
- Woolway, R.I., Dokulil, M.T., Marszelewski, W., Schmid, M., Bouffard, D., & Merchant, C.J., 2017. Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Clim. Change* 142, 505–520. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1966-4>
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J., 2021. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geogr. Sustain.* 2, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>
- Yao, J., Chen, Y., Zhao, Y., Guan, X., Mao, W., & Yang, L., 2020. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China. *J. Hydrol.* 585, 124823. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124823>
- Yasunaka, S., & Hanawa, K., 2002. Regime Shifts Found in the Northern Hemisphere SST Field. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser II* 80, 119–135. <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.119>
- Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., & Toreti, A., 2017. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environ. Res. Lett.* 12, 064008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa723b>
- Zhou, S., Williams, A.P., Berg, A.M., Cook, B.I., Zhang, Y., Hagemann, S., Lorenz, R., Seneviratne, S.I., & Gentile, P., 2019. Land–atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 18848–18853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904955116>
- Zhou, W., Guan, K., Peng, B., Shi, J., Jiang, C., Wardlow, B., Pan, M., Kimball, J.S., Franz, T.E., Gentile, P., He, M., & Zhang, J., 2020. Connections between the hydrological cycle and crop yield in the rainfed U.S. Corn Belt. *J. Hydrol.* 590, 125398. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125398>

Zolina, O., Simmer, C., Belyaev, K., Gulev, S.K., & Koltermann, P., 2013. Changes in the Duration of European Wet and Dry Spells during the Last 60 Years. *J. Clim.* 26, 2022–2047. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00498.1>

Annexes



Annexe 1 : Évolutions annuelles du ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama (en noir) et de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en rouge). Départements de la zone 1 (bassin de production Nord-Pas-de-Calais) : Nord, Pas-de-Calais ; départements de la zone 2 (bassin de production Parisien) : Aisne, Eure, Eure-et-Loir, Loiret, Oise, Seine-et-Marne, Yonne ; départements de la zone 3 (bassin de production Poitou-Charentes) : Charente, Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne ; départements de la zone 4 (bassin de production Centre) : Allier, Cher, Indre, Nièvre, Puy-de-Dôme ; départements de la zone 5 (bassin de production Bourgogne/Rhône-Alpes) : Ain, Côte d'Or, Rhône et Saône-et-Loire ; départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne.



Annexe 2 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir) et de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en rouge). Départements de la zone 1 (bassin de production Bretagne) : Calvados, Côtes d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Mayenne, Morbihan ; départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée ; départements de la zone 3 (bassin de production Aquitain) : Gers, Landes, Pyrénées Atlantiques, Hautes Pyrénées ; départements de la zone 4 (bassin de production Plaine d'Alsace) : Bas-Rhin, Haut-Rhin ; départements de la zone 5 (bassin de production vallée du Rhône) : Ain, Ardèche, Loire, Rhône et Saône-et-Loire.

| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Coefficient de corrélation | 0.348 | 0.234 | -0.477 | 0.0752 | 0.116 | 0.0983 |
| p-value | 0.294 | 0.488 | 0.138 | 0.826 | 0.734 | 0.773 |

Annexe 3 : Coefficients de corrélation de Pearson entre le ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama et l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI). Départements de la zone 1 (bassin de production Nord-Pas-de-Calais) : Nord, Pas-de-Calais ; départements de la zone 2 (bassin de production Parisien) : Aisne, Eure, Eure-et-Loir, Loiret, Oise, Seine-et-Marne, Yonne ; départements de la zone 3 (bassin de production Poitou-Charentes) : Charente, Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne ; départements de la zone 4 (bassin de production Centre) : Allier, Cher, Indre, Nièvre, Puy-de-Dôme ; départements de la zone 5 (bassin de production Bourgogne/Rhône-Alpes) : Ain, Côte d'Or, Rhône et Saône-et-Loire ; départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne.

| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 |
|-----------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Coefficient de corrélation | -0.0555 | 0.233 | 0.582 | -0.235 | -0.413 |
| p-value | 0.871 | 0.491 | 0.0603 | 0.543 | 0.207 |

Annexe 4 : Coefficients de corrélation de Pearson entre le ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama et l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI). Départements de la zone 1 (bassin de production Bretagne) : Calvados, Côtes d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Mayenne, Morbihan ; départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée ; départements de la zone 3 (bassin de production Aquitain) : Gers, Landes, Pyrénées Atlantiques, Hautes Pyrénées ; départements de la zone 4 (bassin de production Plaine d'Alsace) : Bas-Rhin, Haut-Rhin ; départements de la zone 5 (bassin de production vallée du Rhône) : Ain, Ardèche, Loire, Rhône et Saône-et-Loire.

Annexe 5 : Questionnaire à destination des experts sinistres sur récolte sur les caractéristiques agronomiques et climatiques des bassins de production des cultures d'intérêt délimités dans la thèse

Questionnaire à destination des experts et leurs responsables

Contexte de ce questionnaire

Dans le cadre d'une thèse CIFRE que je réalise en partenariat avec Groupama Rhône-Alpes Auvergne, je travaille sur l'évolution des risques agro-climatiques en lien avec les modifications de l'aléa climatique en contexte de réchauffement. A ce titre, j'étudie l'évolution de deux métriques caractérisant l'aléa climatique (les longs épisodes secs et le bilan hydrique) et leur impact sur la stagnation voire la baisse des rendements de trois cultures en France métropolitaine, le blé, le maïs et la vigne.

Afin d'affiner l'analyse de l'aléa climatique, je sélectionne pour chaque culture des zones d'étude correspondant aux bassins de production principaux. Les variables climatiques que j'étudie étant rassemblées dans un jeu de données sous forme de grille couvrant le territoire français avec des carrés de 8km x 8km, cette sélection permet d'identifier des points de grille à retenir pour chaque bassin agricole. Les cartes obtenues pour le blé, le maïs et la vigne sont présentées ci-dessous.

A ce stade de mes travaux, il est nécessaire de caractériser de la manière la plus précise possible les pratiques agronomiques des zones identifiées pour chaque culture. En effet, outre l'aléa climatique, les facteurs influençant le rendement agronomique sont très nombreux : irrigation, variété utilisée, améliorations génétiques, monoculture, type de rotation, surfaces en agriculture biologique, ... Aussi avons-nous mis en place, conjointement avec mon responsable dans l'entreprise Claude Perrot, ce questionnaire à destination des experts et de leurs responsables. Il rassemble des questions respectives à chaque culture dont les réponses permettraient d'analyser les résultats d'évolution de l'aléa climatique et de son impact sur les rendements des cultures de la manière la plus pertinente possible.

I. Blé

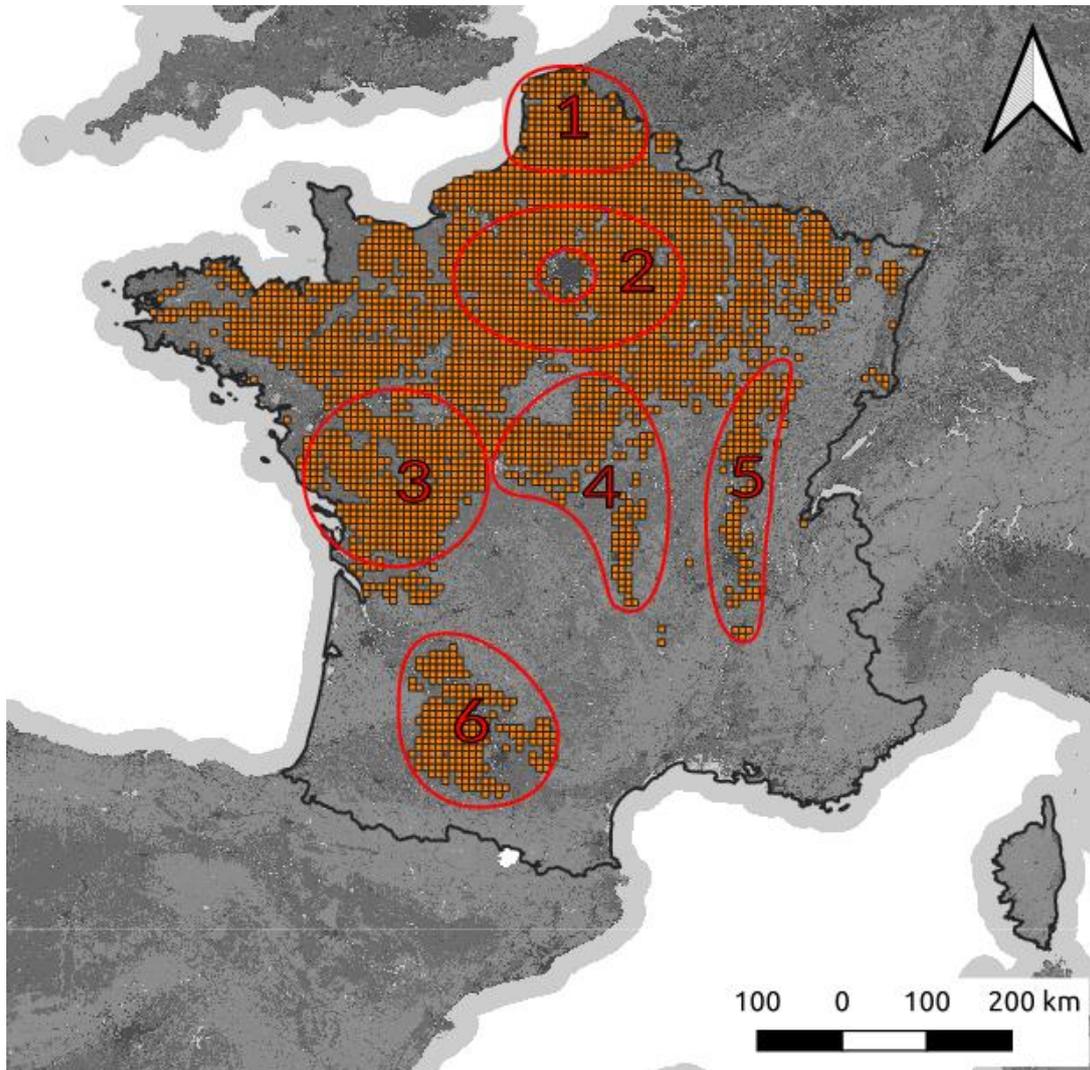


Image 1 : Points de grille Safran avec au moins 10% de surface couverte par des parcelles de blé tendre d'hiver en 2019.

Les points de grille sélectionnés sont ceux pour lesquels au moins 10% de la surface totale du point de grille (8km x 8km = 64km²) est recouverte de parcelles de blé tendre d'hiver en 2019. Les principales régions de production mises en évidence sont entourées en rouge sur la carte ci-dessus :

1. le Nord-Pas-de-Calais ;
2. le Bassin Parisien ;
3. le Poitou-Charentes ;
4. le Centre ;
5. la Bourgogne et Rhône-Alpes ;

6. le Bassin Aquitain.

Pour chacune de ces régions de production, seriez-vous en mesure de répondre à ces questions :

a. Les parcelles de blé tendre d'hiver sont-elles irriguées ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces en blé tendre d'hiver sont irriguées ?

b. Y a-t-il une part importante de conversion des exploitations vers l'agriculture biologique ou d'autres pratiques de réduction ou d'absence d'utilisation des intrants ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces en blé tendre sont concernées ?

c. Les variétés de blé tendre d'hiver utilisées sont-elles plutôt précoces ou tardives ?

d. Y a-t-il des légumineuses dans la rotation de certaines parcelles cultivées en blé tendre d'hiver ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces en blé tendre d'hiver ont des légumineuses dans la rotation ?

e. Pourquoi certaines parcelles de blé tendre d'hiver sont irriguées et d'autres non ? Est-ce systématique ou suite à des problèmes de sécheresse ?

f. Y a-t-il eu des sécheresses agricoles ayant affecté les rendements pour les parcelles de blé tendre d'hiver non irriguées ? Quelles années ont été concernées (à partir de 1960 si possible à nos jours) ?

II. Maïs

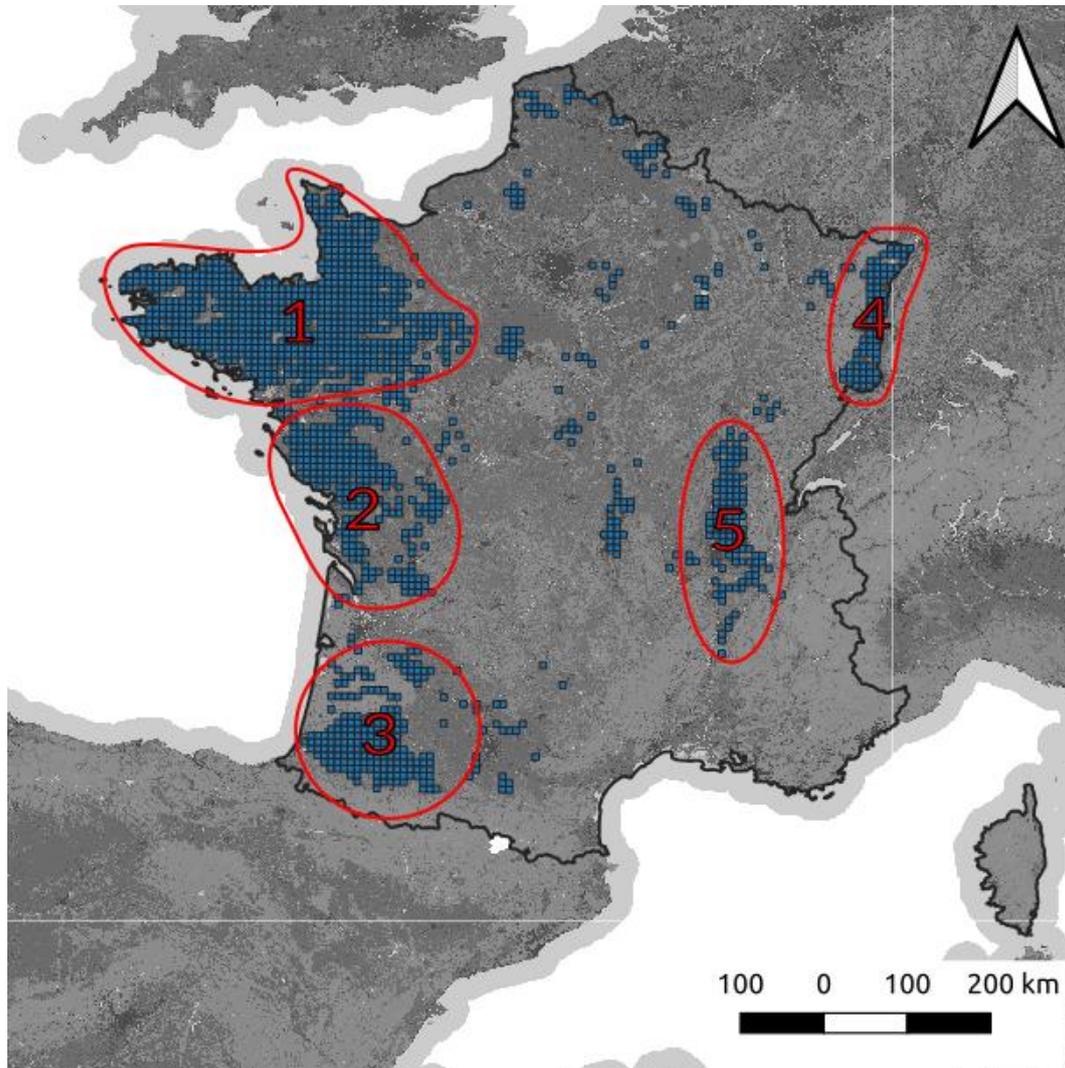


Image 2 : Points de grille Safran avec au moins 10% de surface couverte par des parcelles de maïs en 2019.

Les points de grille sélectionnés sont ceux pour lesquels au moins 10% de la surface totale du point de grille (8km x 8km = 64km²) est recouverte de parcelles de maïs (maïs, maïs doux ou maïs ensilage) en 2019. Les principales régions de production mises en évidence sont entourées en rouge sur la carte ci-dessus :

1. la Bretagne ;
2. les Pays de la Loire ;
3. le Bassin Aquitain ;
4. la Plaine d'Alsace ;
5. la vallée du Rhône.

Pour chacune de ces régions de production, seriez-vous en mesure de répondre à ces questions :

- a. Les parcelles de maïs sont-elles irriguées ? Si oui, quel pourcentage approximatif de parcelles de maïs sont irriguées ?
- b. Y a-t-il une part importante de conversion des exploitations vers l'agriculture biologique ou d'autres pratiques de réduction ou d'absence d'utilisation des intrants ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces en maïs sont concernées ?
- c. Les variétés de maïs utilisées sont-elles plutôt précoces ou tardives ?
- d. Quelle est la part des surfaces cultivées en maïs ensilage dans les surfaces totales cultivées en maïs ?
- e. Quelle est la part des surfaces en monoculture de maïs dans les surfaces totales cultivées en maïs ?
- f. Pourquoi certaines parcelles de maïs sont irriguées et d'autres non ? Est-ce systématique ou suite à des problèmes de sécheresse ?
- g. Y a-t-il eu des sécheresses agricoles ayant affecté les rendements pour les parcelles de maïs non irriguées ? Quelles années ont été concernées ?

III. Vigne

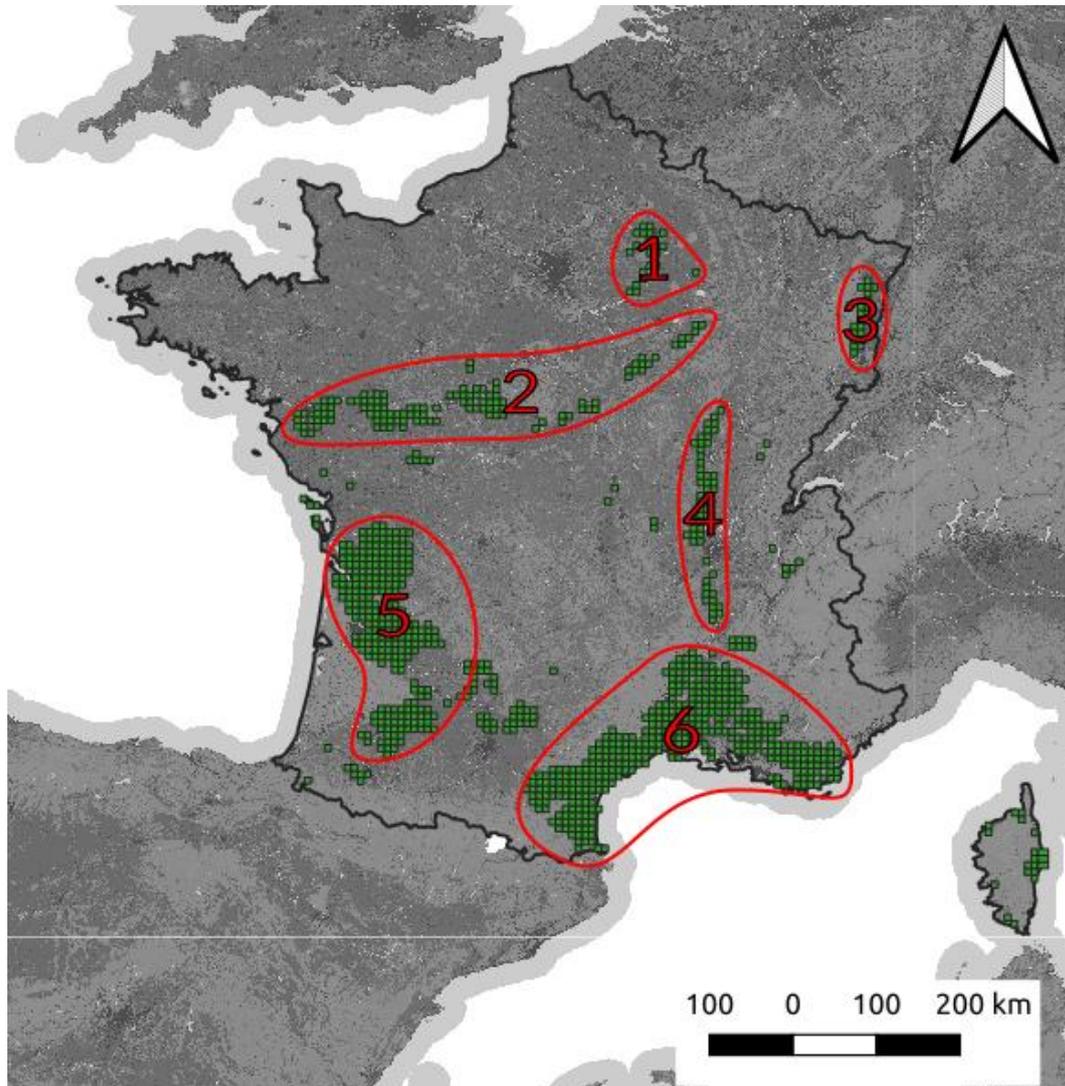


Image 3 : Points de grille Safran avec au moins 1% de surface couverte par des vignes en 2019.

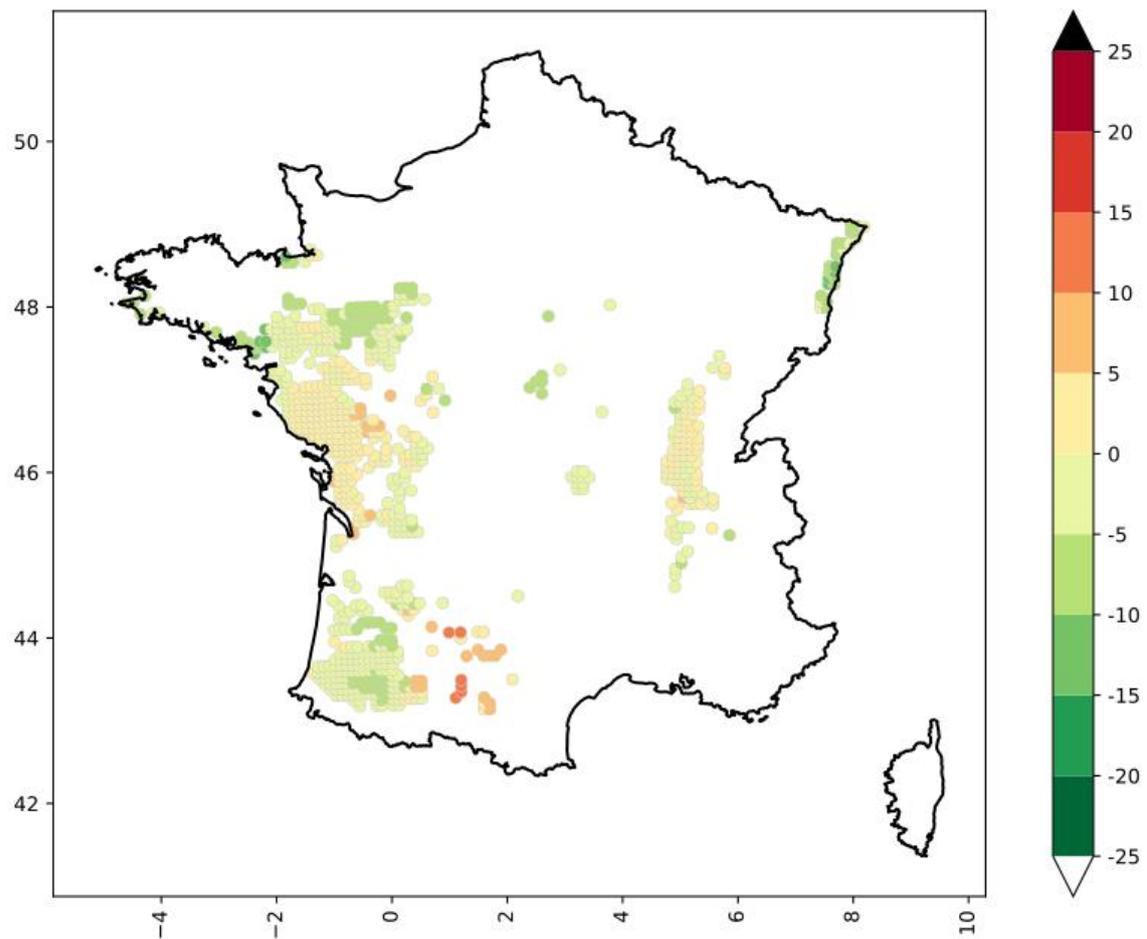
Les points de grille sélectionnés sont ceux pour lesquels au moins 1% de la surface totale du point de grille (8km x 8km = 64km²) est recouverte de parcelles de vigne (vigne raisins de cuve, vigne raisins de cave ou vignoble en restructuration) en 2019. Les principales régions de production mises en évidence sont entourées en rouge sur la carte ci-dessus :

1. la Champagne ;
2. la vallée de la Loire ;
3. l'Alsace ;
4. la Bourgogne ;
5. le Bordelais ;

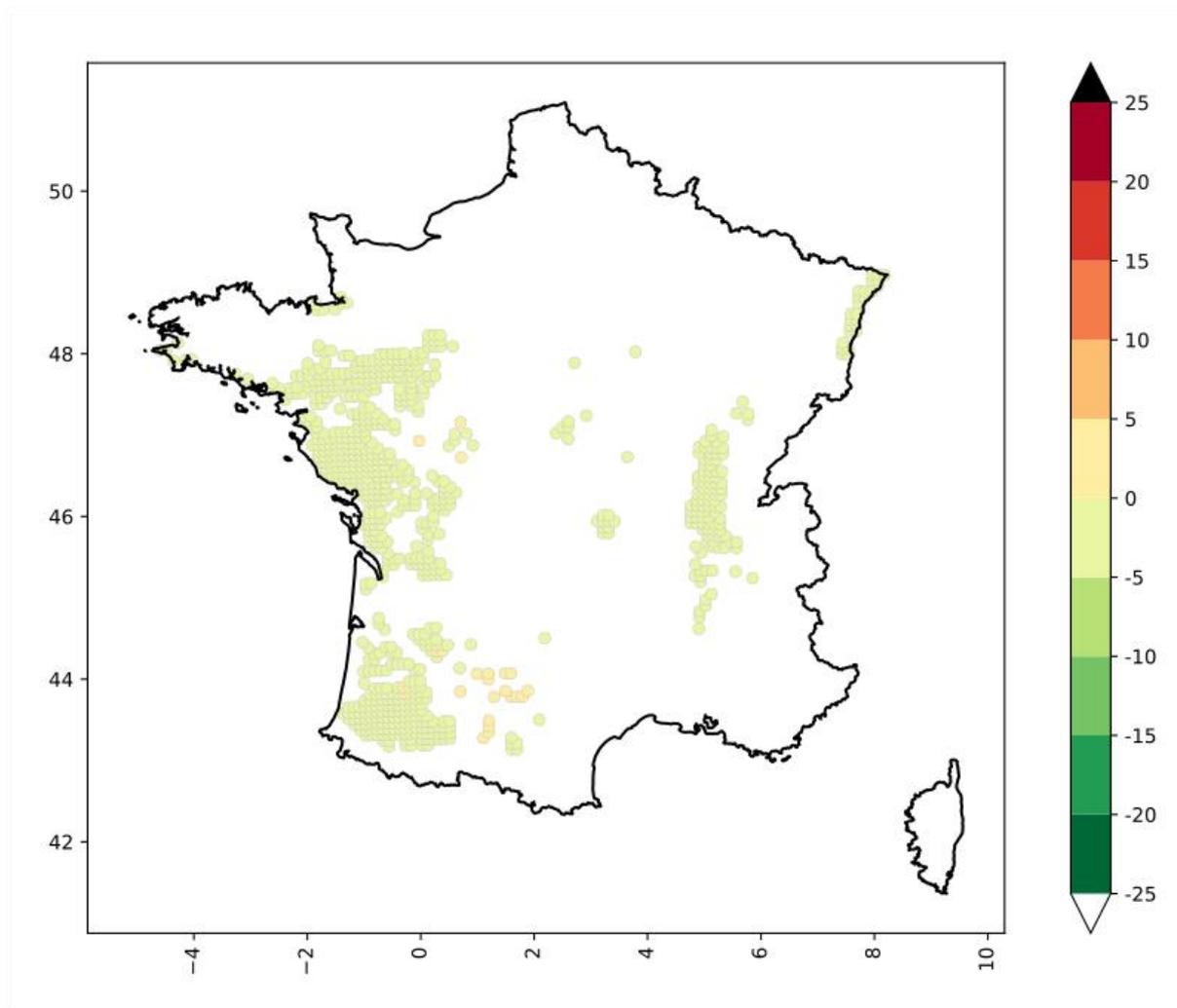
6. la région méditerranéenne.

Pour chacune de ces régions de production, seriez-vous en mesure de répondre à ces questions :

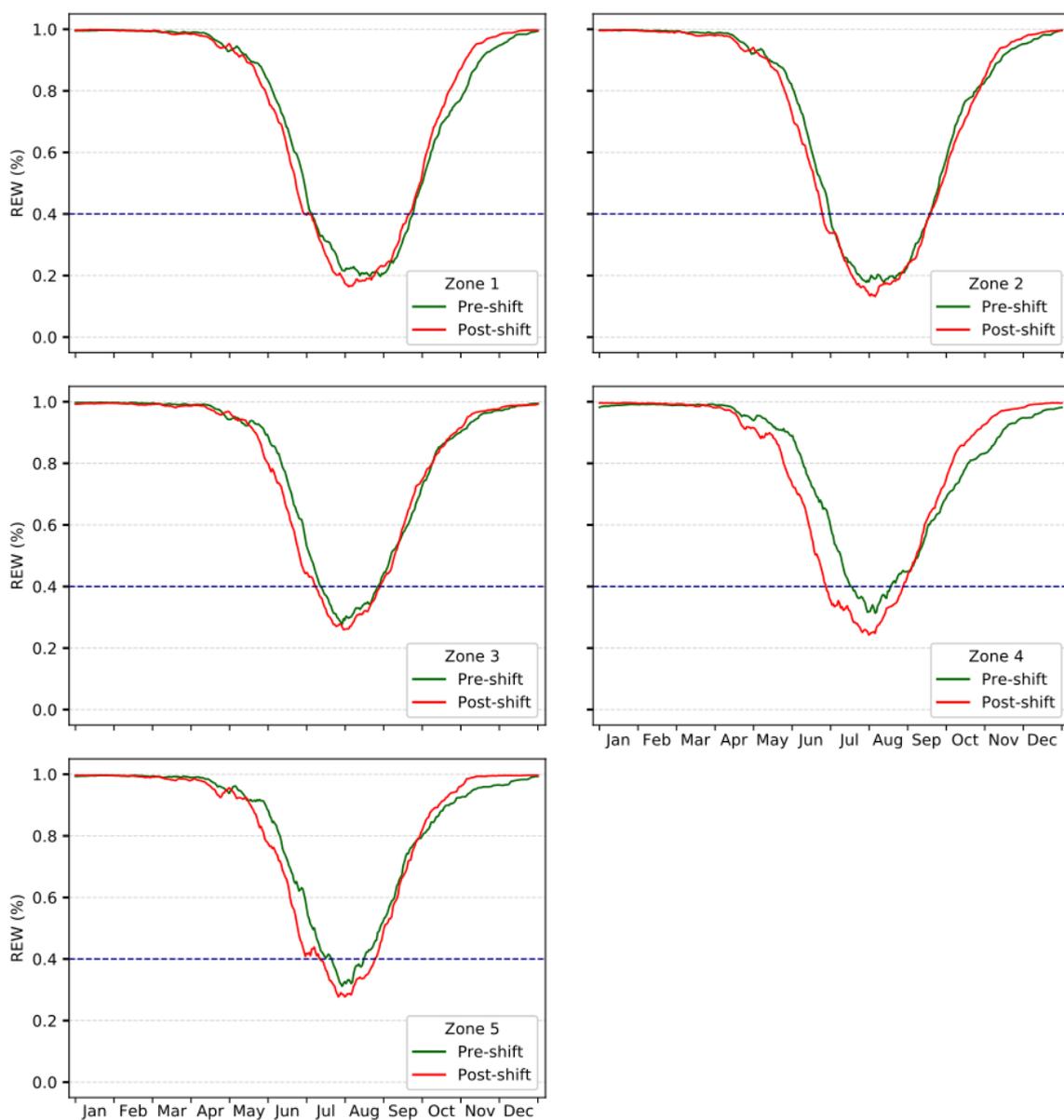
- a. Quels sont les cépages majoritaires de la région, selon quels pourcentages de surface approximatifs ?
- b. Les parcelles de vigne sont-elles irriguées ? Si oui, quel pourcentage approximatif de parcelles de vigne sont irriguées ? (si irrigation autorisée)
- c. Y a-t-il une part importante de conversion des exploitations vers l'agriculture biologique ou d'autres pratiques de réduction ou d'absence d'utilisation des intrants ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces en vigne sont concernées ?
- d. La pratique de l'enherbement est-elle utilisée dans la région ? Si oui, quel pourcentage approximatif des surfaces de vigne sont enherbées ?
- e. Pourquoi certaines parcelles de vigne sont irriguées et d'autres non ? Est-ce systématique ou suite à des problèmes de sécheresse ?
- f. Y a-t-il eu des sécheresses agricoles ayant affecté les rendements pour les parcelles de vigne non irriguées ? Quelles années ont été concernées ?



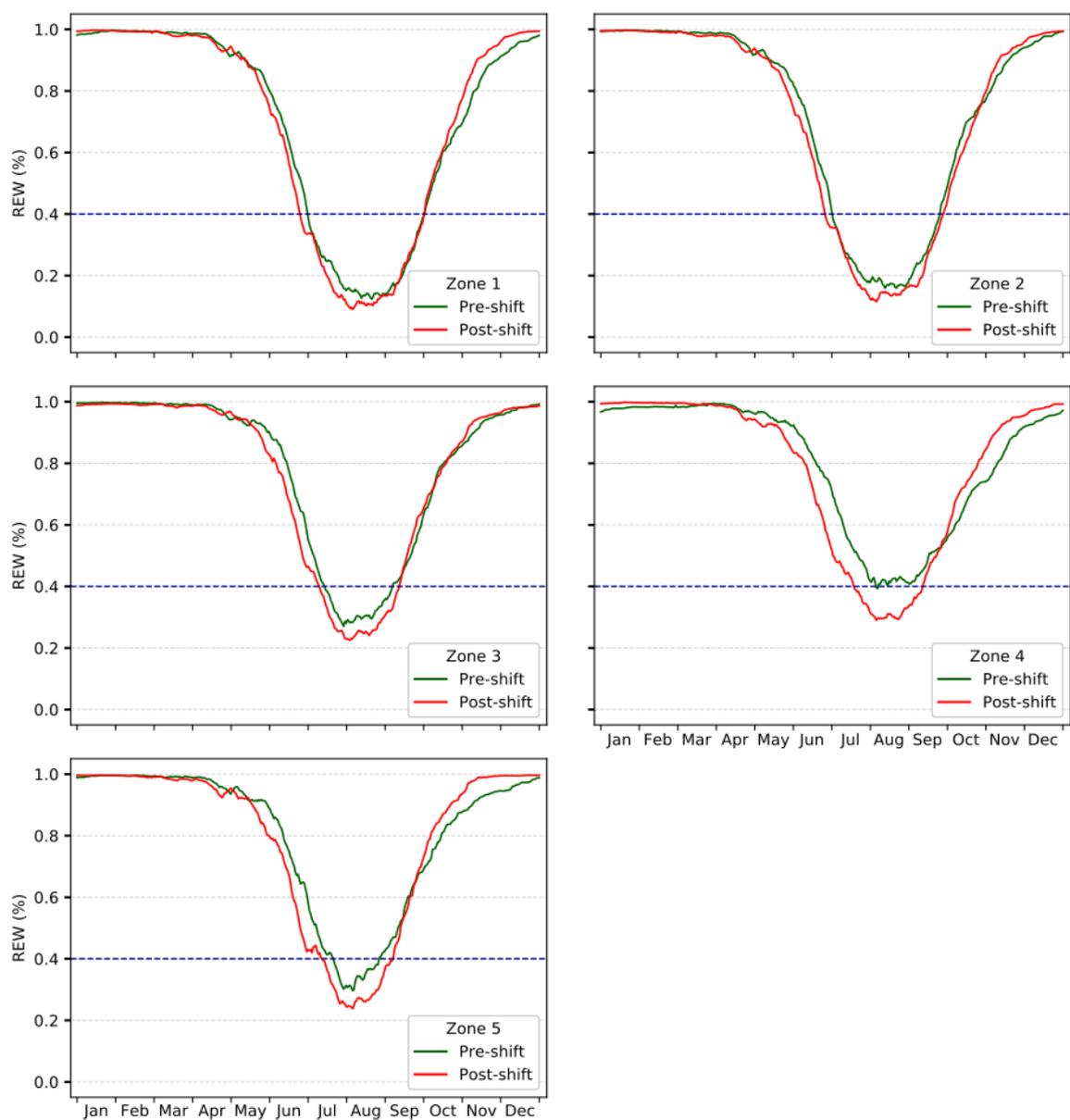
Annexe 6 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). Automne (SON).



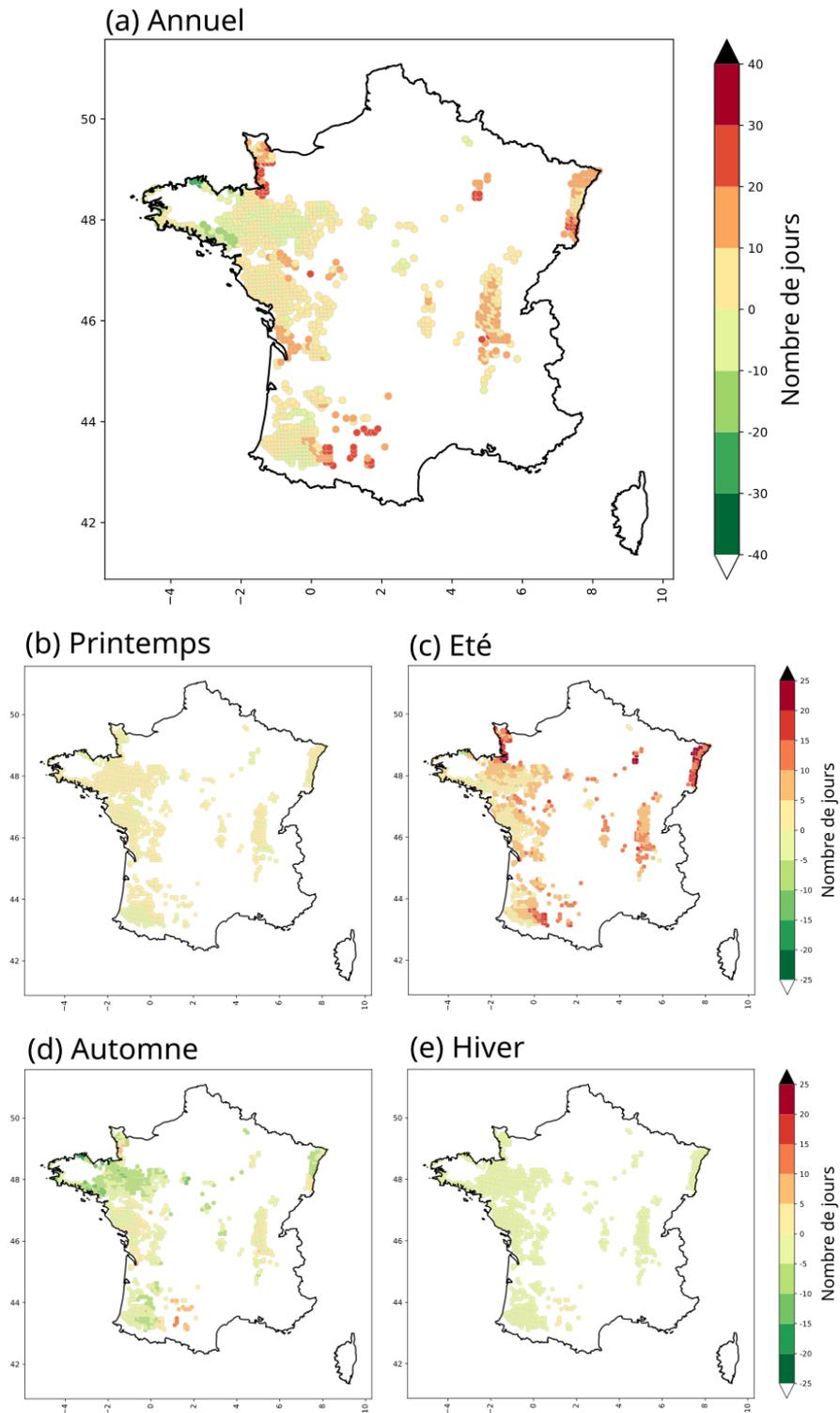
Annexe 7 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle moyen (Furio). Hiver (DJF).



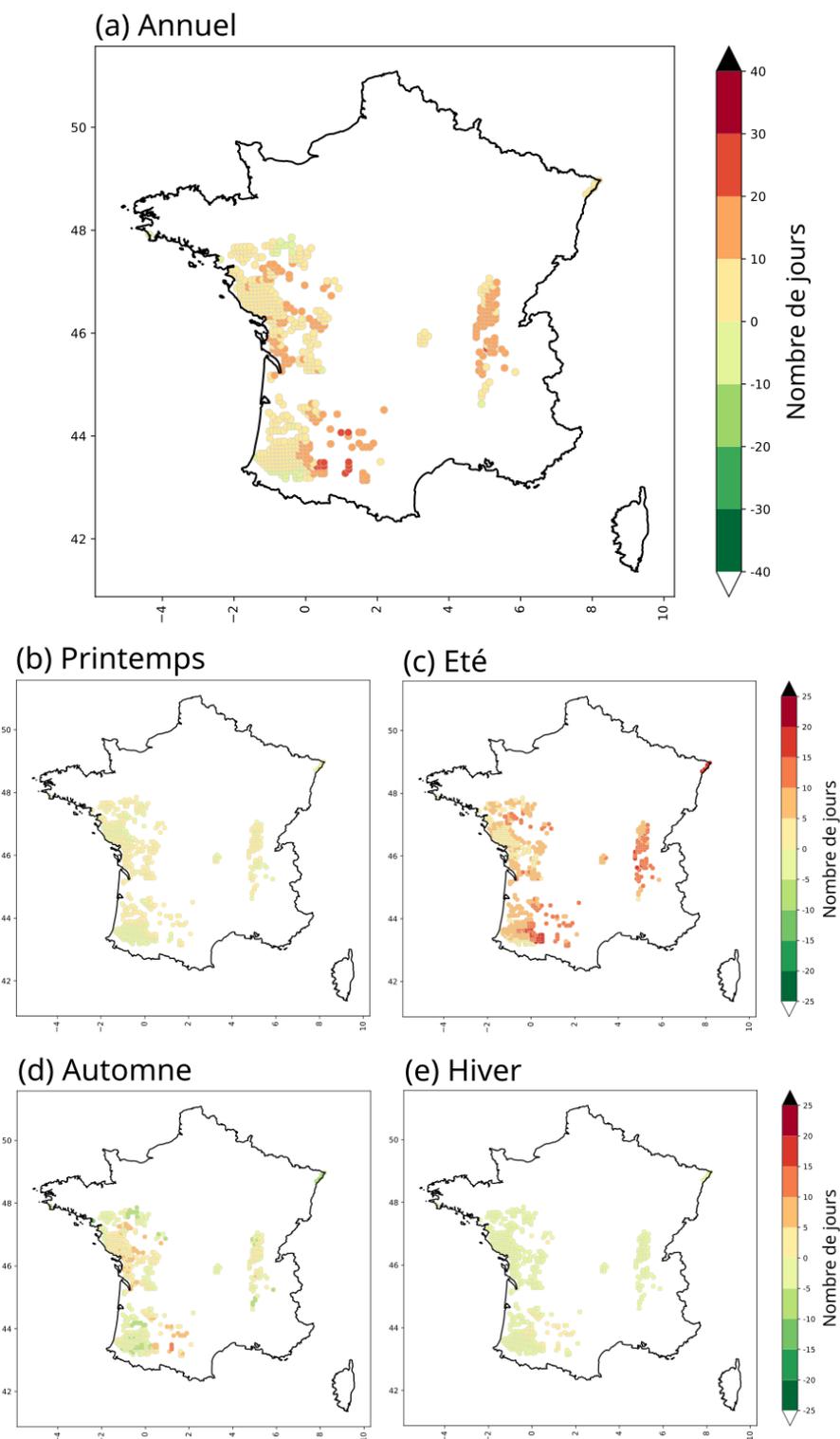
Annexe 8 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire du maïs, pour la variété de cycle court (Meribel). En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2020. Ligne bleue pointillée : seuil de stress hydrique (40%). Zones 1, 2, 3, 4 et 5 respectivement les bassins de production de Bretagne, des Pays de la Loire, Aquitain, d'Alsace et de la vallée du Rhône.



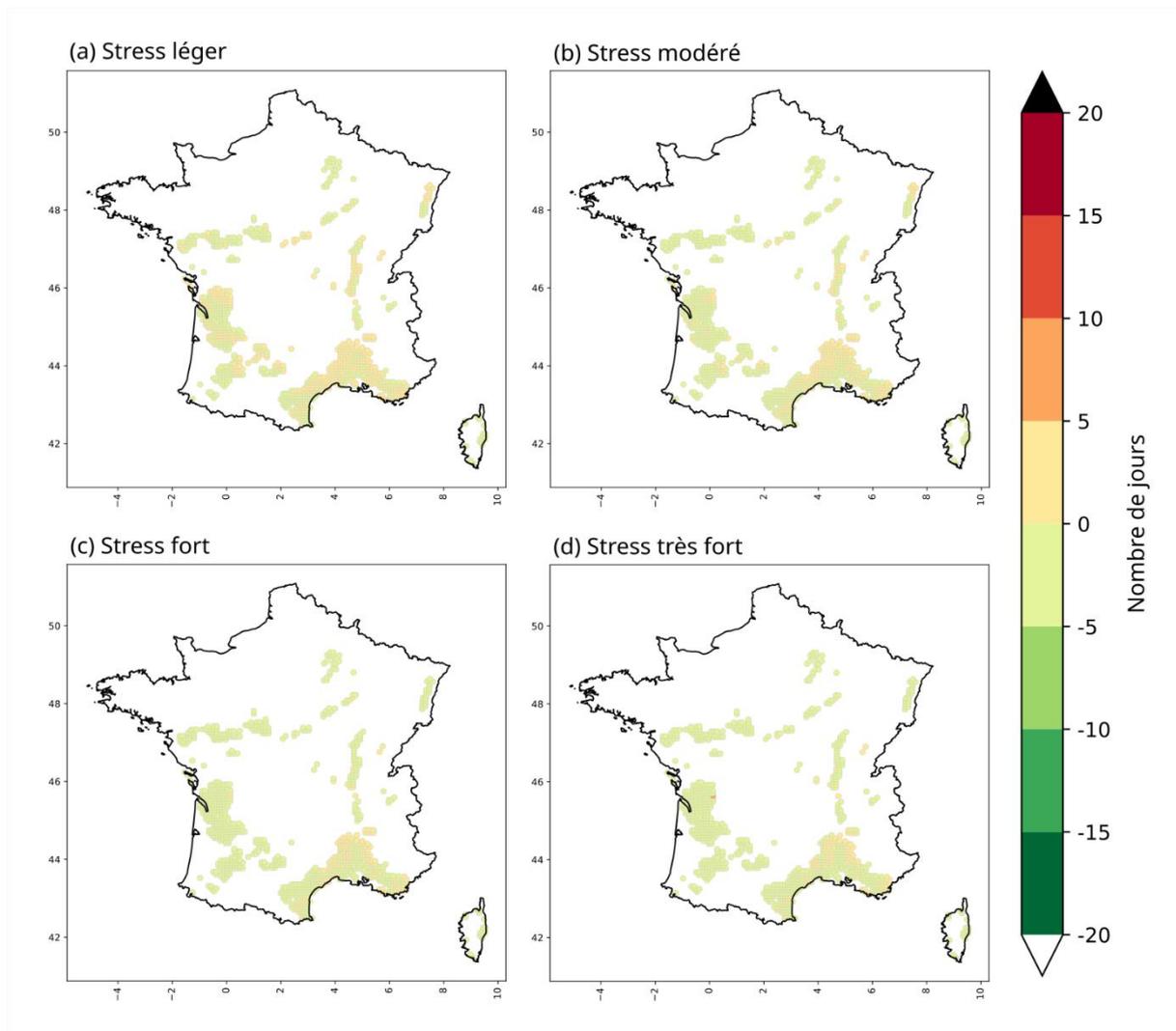
Annexe 9 : Cycle annuel moyen du bilan hydrique pour chaque bassin de production majoritaire du maïs, pour la variété de cycle long (Cecilia). En vert : moyenne quotidienne pour la période 1960-1987 ; en rouge : moyenne quotidienne pour la période 1988-2020. Ligne bleue pointillée : seuil de stress hydrique (40%). Zones 1, 2, 3, 4 et 5 respectivement les bassins de production de Bretagne, des Pays de la Loire, Aquitain, d'Alsace et de la vallée du Rhône.



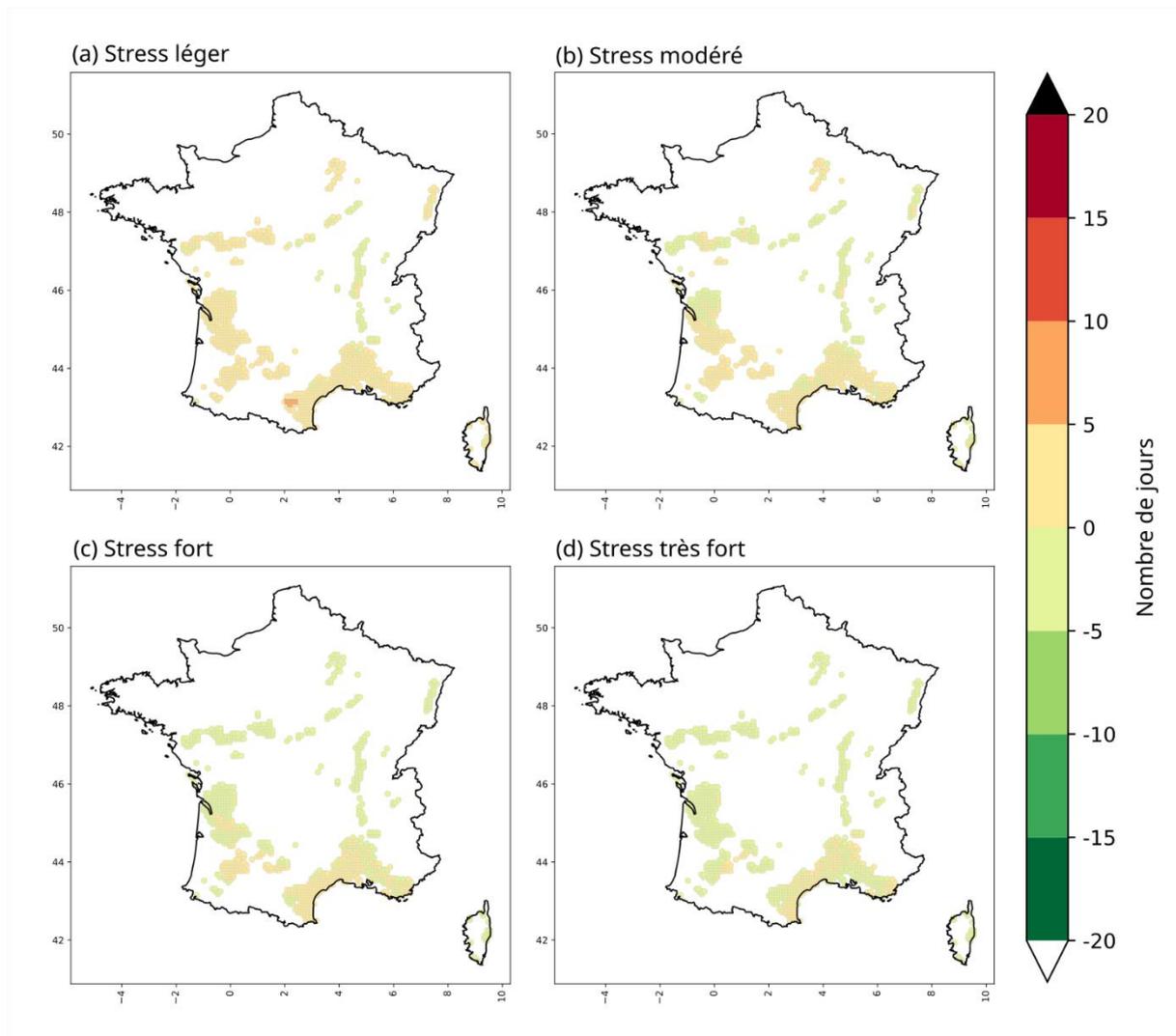
Annexe 10 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle court (Meribel). (a) Échelle annuelle, (b) printemps (MAM), (c) été (JJA), (d) automne (SON), (e) hiver (DJF).



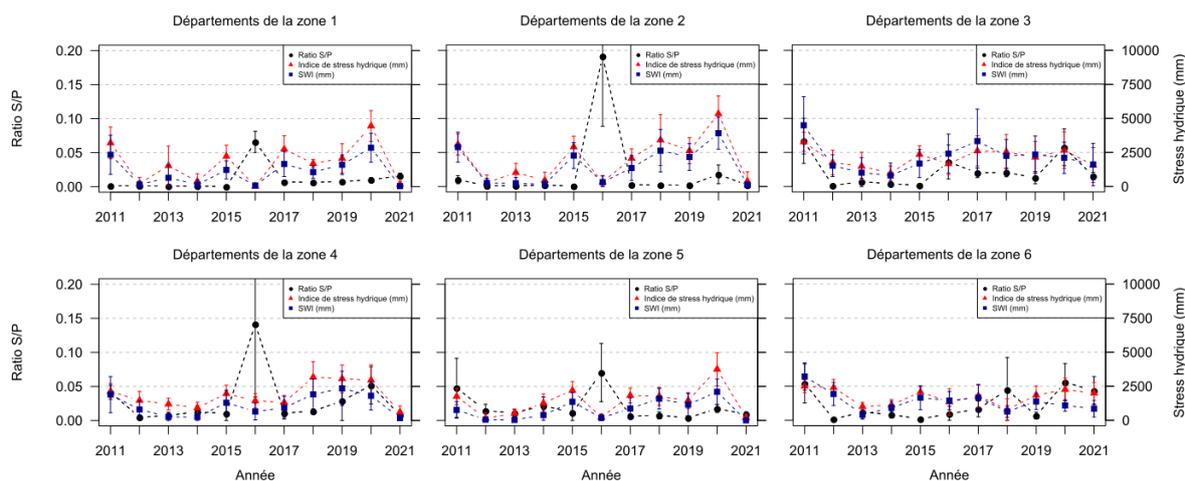
Annexe 11 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (40%) (période 1988-2020 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 10% de la surface est couverte par des parcelles de maïs, pour la variété de cycle long (Cecilia). (a) Échelle annuelle, (b) printemps (MAM), (c) été (JJA), (d) automne (SON), (e) hiver (DJF).



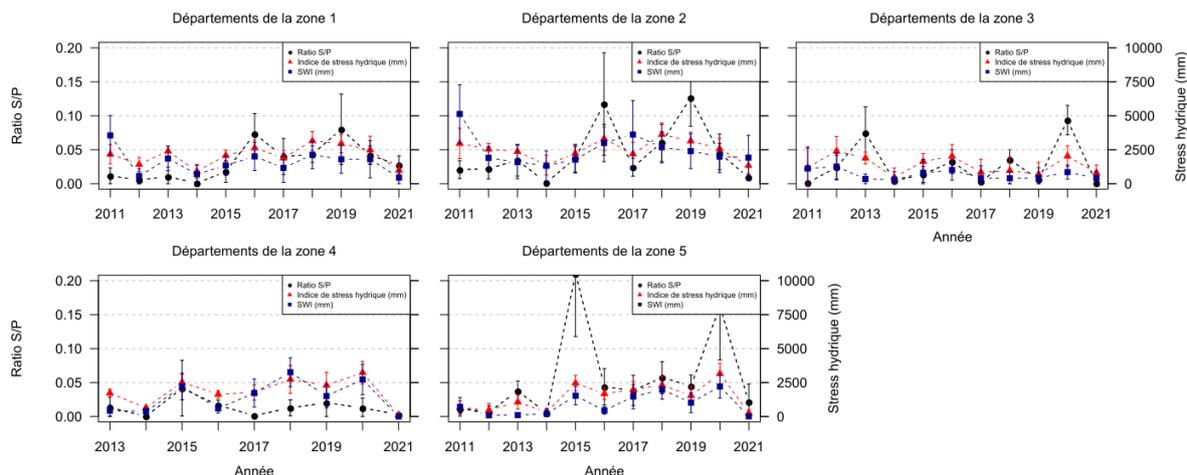
Annexe 12 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, printemps (MAM). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%).



Annexe 13 : Différence du nombre de jours sous seuil de stress hydrique (période 1988-2021 – période 1960-1987) pour chaque point de grille dont au moins 1% de la surface est couverte par des parcelles de vigne, hiver (DJF). (a) Stress léger (FTSW < 36%), (b) modéré (FTSW < 21%), (c) fort (FTSW < 7%), (d) très fort (FTSW < 1%).



Annexe 14 : Évolutions annuelles du ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama (en noir), de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l'indice de stress hydrique calculé pour le blé (en rouge). Départements de la zone 1 (bassin de production Nord-Pas-de-Calais) : Nord, Pas-de-Calais ; départements de la zone 2 (bassin de production Parisien) : Aisne, Eure, Eure-et-Loir, Loiret, Oise, Seine-et-Marne, Yonne ; départements de la zone 3 (bassin de production Poitou-Charentes) : Charente, Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne ; départements de la zone 4 (bassin de production Centre) : Allier, Cher, Indre, Nièvre, Puy-de-Dôme ; départements de la zone 5 (bassin de production Bourgogne/Rhône-Alpes) : Ain, Côte d'Or, Rhône et Saône-et-Loire ; départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne.



Annexe 15 : Évolutions annuelles du ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama (en noir), de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) (en bleu) et de l'indice de stress hydrique calculé pour le maïs (en rouge). Départements de la zone 1 (bassin de production Bretagne) : Calvados, Côtes d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Mayenne, Morbihan ; départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée ; départements de la zone 3 (bassin de production Aquitain) : Gers, Landes, Pyrénées Atlantiques, Hautes Pyrénées ; départements de la zone 4 (bassin de production Plaine d'Alsace) : Bas-Rhin, Haut-Rhin ; départements de la zone 5 (bassin de production vallée du Rhône) : Ain, Ardèche, Loire, Rhône et Saône-et-Loire.

| | | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Zone 6 |
|--|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S/P – indice de stress SWI | Coefficient de corrélation | -0.310 | -0.222 | 0.728 | 0.0655 | -0.256 | 0.103 |
| | p-value | 0.354 | 0.512 | 0.0111 | 0.848 | 0.447 | 0.764 |
| S/P – indice de stress hydrique blé | Coefficient de corrélation | -0.362 | -0.269 | 0.668 | 0.0964 | -0.204 | 0.193 |
| | p-value | 0.273 | 0.424 | 0.0246 | 0.778 | 0.547 | 0.570 |

Annexe 16 : Coefficients de corrélation de Pearson entre le ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama et de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) et entre le ratio S/P du blé des contrats MRC de Groupama et l'indice de stress hydrique calculé pour le blé. Départements de la zone 1 (bassin de production Nord-Pas-de-Calais) : Nord, Pas-de-Calais ; départements de la zone 2 (bassin de production Parisien) : Aisne, Eure, Eure-et-Loir, Loiret, Oise, Seine-et-Marne, Yonne ; départements de la zone 3 (bassin de production Poitou-Charentes) : Charente, Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée, Vienne ; départements de la zone 4 (bassin de production Centre) : Allier, Cher, Indre, Nièvre, Puy-de-Dôme ; départements de la zone 5 (bassin de production Bourgogne/Rhône-Alpes) : Ain, Côte d'Or, Rhône et Saône-et-Loire ; départements de la zone 6 (bassin de production Aquitain) : Haute-Garonne, Gers, Lot-et-Garonne, Tarn, Tarn-et-Garonne.

| | | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 |
|---|----------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| S/P – indice de stress SWI | Coefficient de corrélation | 0.210 | 0.0961 | 0.0753 | 0.366 | 0.678 |
| | p-value | 0.534 | 0.779 | 0.826 | 0.333 | 0.0217 |
| S/P – indice de stress hydrique maïs | Coefficient de corrélation | 0.656 | 0.720 | 0.625 | 0.542 | 0.796 |
| | p-value | 0.0284 | 0.0125 | 0.0400 | 0.132 | 0.00340 |

Annexe 17 : Coefficients de corrélation de Pearson entre le ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama et de l'indice de stress hydrique tiré de l'indice d'humidité du sol (Soil Water Index en anglais, SWI) et entre le ratio S/P du maïs des contrats MRC de Groupama et l'indice de stress hydrique calculé pour le maïs. Départements de la zone 1 (bassin de production Bretagne) : Calvados, Côtes d'Armor, Finistère, Ille-et-Vilaine, Loire-Atlantique, Maine-et-Loire, Mayenne, Morbihan ; départements de la zone 2 (bassin de production Pays de la Loire) : Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Vendée ; départements de la zone 3 (bassin de production Aquitain) : Gers, Landes, Pyrénées Atlantiques, Hautes Pyrénées ; départements de la zone 4 (bassin de production Plaine d'Alsace) : Bas-Rhin, Haut-Rhin ; départements de la zone 5 (bassin de production vallée du Rhône) : Ain, Ardèche, Loire, Rhône et Saône-et-Loire.