



HAL
open science

Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050 : Application à la gestion économique du risque

Dorothee Kapsambelis

► **To cite this version:**

Dorothee Kapsambelis. Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050 : Application à la gestion économique du risque. Economies et finances. Agrocampus Ouest, 2022. Français. NNT : 2022NSARE061 . tel-03953483

HAL Id: tel-03953483

<https://theses.hal.science/tel-03953483>

Submitted on 24 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat de

L'Institut Agro Rennes-Angers

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 597

Sciences Economiques et sciences De Gestion

Spécialité : « *Sciences de gestion* »

Par

Dorothee Kapsambelis

Titre de la thèse : Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050. Application à la gestion économique du risque

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 12 juillet 2022

Unité de recherche : SMART-LERECO

Thèse N° : E-61 2022-15

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Christophe Calvet
Geoffroy Enjolras

Directeur de Recherches CNRM, Toulouse
Professeur CERAG, Grenoble, IAE

Composition du Jury :

Président : Aude Ridier
Examinatrice : Nina Graveline

Professeure SMART UMR INRAE/IA, L'institut Agro-Rennes- Angers
Chercheuse INNOVATION, INRAE

Dir. de thèse : Jean Cordier

Professeur SMART UMR INRAE/IA, L'institut Agro-Rennes-Angers

Co-dir. de thèse : David Moncoulon Directeur Département R&D Modélisation, CCR

Titre : Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050. Application à la gestion économique du risque

Mots clés : Risques extrêmes systémiques, modélisation, horizon 2050, gestion des risques

Résumé : Les productions végétales sont très fortement exposées aux aléas climatiques. En France, depuis 2016, les pertes enregistrées par les agriculteurs ont atteint chaque année des niveaux qui n'étaient jusqu'à présent que rarement enregistrés. Est-ce que ces catastrophes en chaînes sont directement liées au changement climatique ? Si tel est le cas, comment une agriculture déjà fragilisée par des coûts de production élevés et des marges toujours plus faibles peut y faire face ?

Cette thèse vise à apporter des éléments tangibles sur cette problématique. La thèse se concentre sur les céréales à paille et les prairies. La méthodologie porte sur la conception d'un modèle d'impact des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur les pertes de récoltes, intégrant leur projection à horizon 2050. Il s'agit dans un premier temps de développer un nouvel indice climatique, le DOWKI, caractérisant ces événements climatiques extrêmes à une résolution de 8 x 8 km sur la France métropolitaine. La corrélation entre cet indice et les pertes de récoltes historiques issues d'AGRESTE a permis de construire un modèle de dommages. Enfin, le couplage des données climatiques prospectives issues d'ARPEGE-Climat pour le scénario RCP 8.5 du GIEC a été mis en place pour évaluer les conséquences de ces événements extrêmes, toutes choses égales par ailleurs, à horizon 2050.

Les résultats de cette étude montrent l'impact très significatif de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses extrêmes en 2050.

Pour les excès d'eau, l'impact n'est pas significatif : ces événements n'évoluent pas dans le futur.

L'évolution des sécheresses a un impact différent sur les céréales à paille et sur les prairies. Sur les premières, une sécheresse extrême est caractérisée par un grand nombre d'agriculteurs touchés pour des pertes de récolte modérées, on peut le caractériser de risque « horizontal ». Sur les prairies, a contrario, les agriculteurs touchés sont nombreux mais les pertes peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus élevés. On peut considérer ces risques comme à la fois « horizontaux et verticaux ».

Les systèmes de gestion des risques doivent être adaptés à ces différents profils de risques. Dans le système proposé par le député Descrozaille et adopté en 2022, le profil de risque « horizontal » sera surtout pris en charge par l'assurance. Les pertes extrêmes, dont la fréquence va augmenter, devront faire appel à une mutualisation internationale. Les pertes « horizontales et verticales », comme les prairies, vont clairement poser la question du provisionnement du Fond Public. L'ère des nouvelles technologies doit permettre un partage de l'information sur la nature du risque et ses conséquences à l'ensemble des acteurs de la gestion du risque de manière à mettre en place des stratégies adaptées au changement climatique. La gestion du risque doit prendre en compte l'adaptation au changement climatique à l'échelle individuelle de l'exploitation agricole pour permettre à l'agriculture française d'évoluer dans le bon sens, avec le défi du changement climatique

Title : Modelling extreme climate events on crop productions in 2050. Application for the economic risk management

Key Words : extreme droughts and excess of water, modelling, 2050, climate change, risk management

Abstract : Agricultural crops are highly exposed to climate hazards.

Since 2016, agricultural losses in France have reached levels that, until then, had seldom been reported.

Is this sequence of catastrophes directly linked to climate change?

If so, how can the agricultural sector face these events while it is already being undermined by rising production costs and decreasing benefits?

The present thesis aims to contribute to the reflection on this topic with tangible answers, using two examples (soft wheat and winter barley) for winter cereals on the one hand and grasslands on the other hand.

A model for the impacts of extreme drought and excess water events on crop yield losses was designed, and yields losses were projected in 2050. The first step was the development of a new climate index, called DOWKI, which characterizes these extreme weather events on an 8 x 8 km grid on mainland France. The correlation between this index and past observed yield losses from the AGRESTE database enabled the design of a damage model. Finally, prospective climate data from the ARPEGE-Climat model for IPCC scenario RCP 8.5 was plugged into the model to assess the consequences, other things being equal, of these extreme events in 2050.

The results show the highly significant impact of the increase in frequency and in intensity of droughts in 2050. As for excess water events, there is no notable impact: these events do not evolve in the future.

The evolution of droughts affects winter cereals and grasslands in different manners. On winter cereals, extreme drought events cause moderate crop yield losses to a large number of farmers. As for grasslands, fewer farmers are affected, but their losses can reach much higher levels. These risks can be considered as being “horizontal and vertical” at the same time.

Risk management systems must be adapted to these various risk profiles. In the system proposed by Deputy Descrozaille and adopted in 2022, the “horizontal” risk profile will mostly be borne by the insurance market. Extreme losses, the frequency of which will increase, will have to resort to international reinsurance in order to be mutualized. “Horizontal and vertical” losses, such as those affecting grasslands, will clearly challenge how the Public Fund provisions so that it can face significant losses.

New technologies must enable the sharing of information about the nature of risks and their consequences between all the entities involved in risk management so that strategies adapted to climate change can be rolled out. Risk management must take into account the adaptation of single farms to climate change so that the French agriculture can evolve in the right direction, along with the challenges posed by climate change.

REMERCIEMENTS

De nombreuses années ont passé depuis cette discussion à Noël, en 2014, avec mes parents sur la perspective de faire une thèse après mon diplôme d'ingénieur agronome. A l'époque, ma réaction avait été : « ah, non, surtout pas un doctorat ! ». Mais c'était sans compter la rencontre avec David Moncoulon, deux ans plus tard.

En 2018, à la fin de mon stage de fin d'études, David Moncoulon m'a proposé de poursuivre nos travaux de modélisation par un doctorat. C'est ainsi que cette thèse a vu le jour, dans l'enceinte de la Caisse Centrale de Réassurance. Ce projet naît avant tout d'une vision opportune sur les besoins futurs de la CCR en modélisation, vision éclairée de l'importance du sujet des conséquences du climat sur les pertes de récoltes. En effet, quatre ans plus tard, au moment de clôturer ce beau livre, la France est en pleine réforme sur sa politique de gestion des risques en agriculture.

Une fois le sujet défini, il a été nécessaire d'avoir un encadrement académique. La rencontre avec Jean Cordier a eu lieu lors du Comité de Validation des Indices Prairies et nous nous sommes immédiatement très bien entendus. Jean est un spécialiste des questions de l'assurance des récoltes, contribuant à de nombreux travaux auprès de la profession agricole et assurantielle et il est plus largement un spécialiste de l'étude des marchés agricoles. Ainsi, il apparaissait comme le directeur de thèse idéal pour comprendre les enjeux d'une modélisation des risques climatiques extrêmes dans un contexte opérationnel de la réforme de gestion des risques. Et c'est ainsi que la thèse a pu commencer, encadrée par David et Jean.

David a été la personne qui m'a le plus aidée, épaulée, appris, soutenue durant toutes ces années. Il m'a accordé une grande confiance et a toujours cru en nos travaux. Notre collaboration débute en 2016 où il était à l'époque mon maître de stage et elle se poursuit encore aujourd'hui. À ses côtés, j'ai appris rigueur méthodologique, rigueur de présentation et d'écriture, et toujours questionner les résultats obtenus sans jamais perdre de vue mon objectif. Il s'agit d'allier une dimension opérationnelle du travail de recherches à un travail de réflexion en profondeur. Il m'a également transmis sa passion pour la modélisation du changement climatique et ce, avec beaucoup de bienveillance et humour. Avidé d'apprendre, j'ai capté comme une éponge tout ce que j'ai pu durant nos séances de travail derrière le code du modèle et nos discussions. Je mesure la chance d'avoir eu, tout au long de mon doctorat, un encadrement très justement équilibré, entre une volonté de me transmettre un enseignement complet et une liberté d'organisation et de prise de décision. C'est également grâce à lui que j'ai pu me faire une place dans le monde professionnel. C'est toute ma carrière qui en sera marquée.

De son côté, Jean m'a apporté les lectures académiques, les discussions, parfois plus philosophiques. Il a toujours replacé les travaux de modélisation dans un contexte plus large de gestion des risques en

agriculture, ouvrant la discussion pour prendre du recul sur le travail réalisé. Les rencontres en trio, toujours ponctuées d'humour, enrichissaient à chaque pas ma réflexion, et me faisaient faire des sauts d'étapes vers mon but ultime.

Je remercie également les membres de mon jury de thèse, Aude Ridier, Nina Graveline et mes deux rapporteurs de thèse Jean-Christophe Calvet et Geoffroy Enjolras. La soutenance a été l'occasion d'un échange particulièrement riche. Leurs remarques et leurs suggestions ont contribué à améliorer la qualité de ce manuscrit de thèse et ma réflexion pour la poursuite des travaux.

Je remercie les deux membres de mon comité de thèse, Alexandre Gohin et Jean-Laurent Viviani pour leurs conseils de lectures mais aussi d'équilibre à trouver entre le langage des académiciens et celui du monde professionnel. Durant mes visites à Rennes, au sein du laboratoire SMART-LERECO, j'ai fait de nombreuses rencontres et j'adresse ma sympathie à l'ensemble des collègues de l'UMR, et particulièrement à Laurent Piet et à Maryline Huchet avec qui j'aurai beaucoup de plaisir à collaborer dans le futur. J'ai une pensée pour les doctorants Mika et Romain, à qui j'envoie toutes mes ondes positives pour leur fin de thèse. Au sein de l'institut Agro-Rennes, je tiens à remercier Françoise Prigent pour sa disponibilité pour toutes les démarches administratives et sa grande écoute.

Cette thèse n'aurait pu se faire sans l'appui de la direction générale de CCR, et ainsi, je tiens à remercier Messieurs Bertrand Labilloy et Laurent Montador. Je remercie également la direction de la Réassurance et des Fonds Publics de CCR, Antoine Quantin et Thierry Cohignac pour leur soutien et les échanges que j'ai pu avoir au cours de ses trois ans qui ont enrichi ma réflexion. Intégrée dans l'équipe de R&D Modélisation de CCR, j'ai pu être mise à l'épreuve en permanence sur des sujets divers et variés et avoir l'occasion de travailler avec chacun de mes collègues. Je les remercie tous pour leur disponibilité, leur bienveillance et leur soutien durant ces années de thèse : Jean-Philippe, Thomas, Léa, et Corentin avec qui nous avons longuement échangé sur nos thèses respectives. Mais surtout, je remercie Roxane, qui m'a apporté une aide précieuse sur l'élaboration de l'atlas sécheresse de ma thèse et sur les demandes du ministère de l'agriculture sur le suivi de développement de l'assurance récolte. Grâce à elle, et grâce à Stéphane Busson j'ai pu mener de front aussi bien cette mission que la rédaction de ma thèse et je les remercie pour leur aide. Je remercie également Daniel Benlolo avec qui les échanges sur l'assurance récolte ont toujours été particulièrement enrichissants et pour sa bonne humeur qui nous fait bien rire dans l'open-space. Durant ma thèse, j'ai eu la chance de pouvoir publier mes travaux dans des revues MDPI et de faire des présentations lors de conférences mais aussi de journées de séminaire de CCR. Cela n'aurait pu se faire sans le soutien de la Direction de Communication et je remercie chaleureusement Vincent Gros, Frédérique et Aurélia. Enfin, Je remercie également l'ensemble de mes collègues de la direction de la Réassurance et des Fonds Publics, qui ont, tous à leur façon, contribué à la réussite de ma thèse par le cadre de travail accueillant et chaleureux : Frédéric, Eric, Georges,

Christian, Nathalie, Geoffrey, Margot, Chadi, Joëlle, Monique, Aysegul, Nicolas, Elodie, Jeremy, Elsa, Lise, Olivier.

Je tiens à remercier les collègues de Météo-France et particulièrement Martine Veysseire et Jean-Michel Soubeyroux pour leurs conseils, leur disponibilité et leur bienveillance. Cette thèse n'aurait pu aboutir sans leur étroite collaboration.

En dernière année de thèse, j'ai eu la chance de pouvoir participer au concours « Ma thèse en 180 secondes ». Ce travail autour de la vulgarisation a été l'occasion de nouvelles rencontres, en particulier Camille et Charlène, avec qui nous avons partagé nos angoisses du concours, nos peurs, les voyages entre Paris et la Bretagne. Durant la préparation de ce concours, mon frère m'a énormément aidé et nous avons répété, échangé et beaucoup ri avec beaucoup de complicité. Je le remercie vivement pour ses conseils, sa disponibilité et son soutien.

Pour conclure, je dirai que le doctorant est une espèce capricieuse. Tantôt fort joyeux devant de nouveaux résultats, tantôt déprimé devant son modèle qui ne fonctionne pas, tantôt colérique devant sa rédaction qui n'avance pas. Mais s'il y a une chose qui ne change pas, c'est le soutien de la famille et des amis. Je souhaite dédier cette thèse à mes parents, pour leur soutien extraordinaire durant toutes ces années, et nos moments de famille où nous avons énormément ri, à mon frère avec qui j'ai tant partagé et à qui je promets d'être là pour sa fin de thèse, à mon professeur de chant et mes amis chanteurs qui ont contribué à me faire grandir sur scène et en répétition et avec qui, ces grands moments de complicité musicale sont et ont été des moments d'exception hors du temps, et à tous mes amis, en particulier les copines de SupAgro et mon amie Sarah pour leur soutien extraordinaire, leur écoute, leur disponibilité, m'avoir changé les idées au cours de soirées extras. J'ai une pensée chaleureuse pour mes amis qui ont eu le courage de relire le manuscrit pour m'apporter leurs conseils. Et j'ai une immense pensée pour toi Laure, présente jusqu'au bout et notamment ton soutien le jour de la soutenance : nous avons débuté notre thèse ensemble, nous la finissons ensemble et écrivons ainsi un nouveau chapitre de notre amitié depuis l'âge de nos six ans. Et enfin, je dédie cette thèse à mon copain, qui m'a soutenue à chaque instant, à chaque étape, qui a su me remotiver quand il le fallait, me changer les idées à d'autres moments et toujours me faire rire même dans les moments les plus difficiles de la rédaction. À toi qui m'as permis d'écrire ce beau chapitre de ma vie, avec un soutien sans faille et une compréhension infinie.

Finalement, en trois ans, c'est bien plus qu'un projet de recherche qui s'est construit.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	5
TABLES DES MATIERES	9
LISTE DES FIGURES.....	13
LISTE DES TABLEAUX	21
LISTE DES ACRONYMES	23
LISTE DES PUBLICATIONS	27
INTRODUCTION AU RISQUE EN AGRICULTURE ET OBJECTIFS DE LA THESE.....	31
I LE RISQUE EN AGRICULTURE	37
I.1 Définition générale	37
I.2 Les types de risques.....	38
I.3 Caractérisation des risques climatiques.....	40
I.4 Les différents risques climatiques et leurs impacts sur les productions végétales	45
I.5 Le changement climatique et ses conséquences sur l'agriculture	47
II OBJECTIFS DE LA THESE.....	50
II.1 Questions posées	50
II.2 Méthodologie générale	50
PARTIE I : DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D'ESTIMATION DES PERTES DE RECOLTES LIEES AUX ALEAS CLIMATIQUES.....	51
I ETAT DE L'ART.....	54
I.1 Le rendement agricole : sa définition, influence du cycle de développement et base de données existantes pour le calculer	54
I.2 Les méthodes d'études de l'impact du climat sur les rendements agricoles	64
I.3 Contraintes du projet et analyse comparative des indices	75
II METHODOLOGIE	78
II.1 Conception d'un indice agro-climatique	78
II.2 Calcul des pertes de récoltes.....	86
II.3 Relation indice/pertes de récoltes	91

III	RESULTATS	98
III.1	Résultats du calibrage.....	98
III.2	Simulation des valeurs de l'indice.....	104
III.3	Simulation des pertes de récoltes	118
IV	DISCUSSION	123
IV.1	Pistes d'améliorations du modèle.....	123
IV.2	Application de la prédiction des pertes de récoltes à l'échelle nationale	128
V	CONCLUSION	130
PARTIE II : ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PRODUCTIONS VEGETALES EN FRANCE.....		131
CHAPITRE 1 : MODELISATION A HORIZON 2050 DES RISQUES EXTREMES CLIMATIQUES ET LEURS CONSEQUENCES SUR LES PERTES DE RECOLTES		133
I	ETAT DE L'ART.....	135
I.1	Le changement climatique.....	135
I.2	Présentation des modèles d'étude du changement climatique.....	142
II	METHODOLOGIE	146
II.1	Le choix de l'année 2050 comme année cible.....	146
II.2	Le modèle ARPEGE-Climat	146
II.3	La modélisation des pertes de récoltes	149
III	LES EVENEMENTS EXTREMES DE SECHERESSE A HORIZON 2050.....	152
III.1	Validation des simulations à climat constant	152
III.2	Analyse sur la ferme France	153
III.3	Analyse géographique	165
IV	LES EVENEMENTS EXTREMES D'EXCÈS D'EAU A HORIZON 2050	173
IV.1	Analyse sur la Ferme France	173
IV.2	Analyse géographique	179
V	CORRELATION DES EVENEMENTS DE SECHERESSE ET D'EXCES D'EAU.....	183
V.1	Caractérisation de ces risques.....	183
V.2	Distribution des pertes de récoltes combinant sécheresse et excès d'eau.....	184
V.3	Cycles de sécheresse-excès d'eau extrêmes sur plusieurs années	186

VI	DISCUSSION	187
VI.1	Fiabilité de l'utilisation d'un seul modèle climatique	187
VI.2	Influence de la période de référence.....	191
VII	CONCLUSION	194
CHAPITRE II : APPLICATION A LA GESTION DES RISQUES EN AGRICULTURE		197
I	LES SYSTEMES DE GESTION DES RISQUES EN FRANCE	199
I.1	Perception du risque par l'agriculteur	199
I.2	Les systèmes de gestion des risques existants	201
I.3	La réforme de 2022 : système de gestion des risques en devenir.....	207
II	CHIFFRER LE RISQUE CLIMATIQUE EN TERMES DE COUTS ECONOMIQUES	210
II.1	Quantifier l'impact d'une baisse de production sur le revenu de l'exploitation agricole	210
II.2	Etat de l'art sur les simulations des rendements à l'échelle de l'exploitation agricole ...	214
III	METHODOLOGIE DE CALCUL DES PERTES ECONOMIQUES	216
III.1	Descente d'échelle : passage de données départementales à des données à l'échelle de l'exploitation agricole.....	216
III.2	Calcul de la répartition des dommages entre les acteurs de la gestion du risque	221
IV	RESULTATS	223
IV.1	Validation de la méthodologie.....	223
IV.2	Conséquences des événements extrêmes climatiques sur les pertes économiques des exploitations agricoles à l'échelle nationale.....	227
IV.3	Modélisation des pertes à l'échelle de l'exploitation agricole.....	229
V	DISCUSSION	237
V.1	Partage de l'information pour tous par les nouvelles technologies	237
V.2	Evolution des systèmes de gestion des risques.....	237
V.3	S'adapter grâce à la formation.....	238
V.4	Adaptation agronomique au risque de sécheresse	239
CONCLUSION GENERALE.....		243
BIBLIOGRAPHIE		250
ANNEXES.....		267
ANNEXE 1 : EQUATION DE L'ETP		268

ANNEXE 2 : ETUDE SUR LES TENDANCES DE RENDEMENT	269
ANNEXE 3 : EXTRAIT DE L'ATLAS	277
ANNEXE 4 : EQUATIONS POUR LE CHIFFRAGE DU MONTANT DES DOMMAGES PAR ACTEUR.....	279

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Classification des risques selon 3 composantes : fréquence du risque, gravité du risque et territoire impacté (Source : Dorothee Kapsambelis).....	41
Figure 2. Taux de diffusion de l'assurance récolte campagne 2019 pour (a) les céréales et fourrages, (b) la viticulture, (c) l'arboriculture, (d) les prairies (CCR 2020).....	43
Figure 3. Part de la superficie couverte par type de culture sur la France métropolitaine en 2018 (figure réalisée à partir de la base de données AGRESTE)	45
Figure 4. Part des indemnisations (%) du FNGRA par péril sur la période 1989-2018 et part des indemnisations (%) par péril pour chaque type de culture (Source : Dorothee Kapsambelis)	46
Figure 5. Part moyenne (%) sur la période 2016-2020 de la sinistralité pour chaque péril climatique sur les portefeuilles d'assurance récoltes (assurance MRC et assurance grêle) – Données Groupama, annexe du rapport de F. Descrozaille (Descrozaille 2021)	47
Figure 6. Cycle de développement d'une culture d'hiver (adaptation de (Henry et De Buyser 2000)).....	56
Figure 7. Illustration du bilan hydrique simplifié à l'échelle de la parcelle agricole (source : Dorothee Kapsambelis)	58
Figure 8. Principes de fonctionnement du modèle STICS (issu de INRA, STICS https://www6.paca.inrae.fr/stics/Qui-sommes-nous/Presentation-du-modele-Stics/Les-principes-de-fonctionnement)	65
Figure 9. Classement des indices satellitaires et agro-climatiques selon les 4 conditions de ce travail de thèse : (a) Universalité (b) Adapté à l'agriculture française et aux données de rendement (c) Adapté aux projections climatiques selon le modèle ARPEGE-Climat, (d) Simplicité de calcul. En rouge les indices qui ont été spécifiquement étudiés dans les paragraphes précédents.	76
Figure 10. Méthodologie générale du développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes dues aux aléas climatiques de sécheresse et d'excès d'eau	78
Figure 11. ERNCi,n sur la période historique 1989-2018 pour les départements du Cher et de la Haute-Garonne (Kapsambelis, Moncoulon, et Cordier 2019b)	82
Figure 12. Comparaison des valeurs du DOWKIsech départementales calculées sur les stations météorologiques (points bleus) et sur la grille de ré-analyse SAFRAN (traits noirs) pour l'année 2003 sur la période de vulnérabilité des céréales à paille. Les barres représentent la distribution des valeurs du DOWKI sur la grille SAFRAN, les limites correspondent aux quantiles 10-90.....	83

Figure 13. (a) Valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour l'année 2003 ; (b) zoom sur le département de l'Aveyron, le point bleu représente la localisation de la station météorologique ; (c) RPG zoomé sur la localisation de la station météorologique dans l'Aveyron ; (d) RPG de l'Aveyron	84
Figure 14. (a) Distribution des valeurs empiriques du $DOWKI_{sech}$ calculées sur la période 1989-2018 ; (b) Calcul de la corrélation des valeurs du $DOWKI_{sech}$ et du $DOWKI_{exces}$ sur la période 1989-2018 sur la période de vulnérabilité des céréales à paille.....	85
Figure 15. Pertes de récoltes moyennes (%) de 1989-2018 pour la France métropolitaine (a) sur blé tendre d'hiver, (b) sur l'orge d'hiver et (c) sur prairies.	89
Figure 16. Classification des événements historiques en fonction des pertes de récoltes (%) des prairies, du blé tendre d'hiver et de l'orge d'hiver	90
Figure 17. Méthodologie générale du calibrage du modèle agro-climatique	92
Figure 18. Méthodologie de croisement du RPG avec la grille de ré-analyse SAFRAN pour le calcul du $DOWKI$ à l'échelle départementale	93
Figure 19. Coefficient de corrélation entre les valeurs du $DOWKI_{sech}$ et les pertes de récoltes sur l'historique (a) $DOWKI$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN/pertes de récoltes prairies ; (b) $DOWKI$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN/pertes de récoltes blé tendre d'hiver.....	99
Figure 20. Analyse de sensibilité du modèle sur le blé tendre d'hiver : (a) Erreur moyenne (%) en fonction de la décade de début, (b) Erreur moyenne (%) en fonction de la décade de fin du modèle, (c) erreur moyenne (%) en fonction du seuil de $DOWKI_{sech}$, (d) erreur moyenne (%) en fonction de la surface (ha).	100
Figure 21. (a) Présentation du découpage Nord/Sud réalisé pour le calibrage du modèle pour le blé tendre d'hiver ; (b) Surface du blé tendre d'hiver (ha) en 2018	101
Figure 22. Modèle de dommages, moyenne de pertes de récoltes et quantiles 10-90, fréquence de sinistres (pertes de récoltes >0%) sur l'historique pour (a) le blé tendre d'hiver sur la moitié Nord ; (b) le blé tendre d'hiver pour la moitié Sud ; (c) l'orge d'hiver sur la France métropolitaine ; (d) les prairies sur la France métropolitaine	103
Figure 23. (a) Valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{sech}$ calculées sur la période de vulnérabilité des prairies et des céréales d'hiver ; (b) valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{exces}$ calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver	105
Figure 24. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2003 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN, (a) sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver ; (b) sur la période de vulnérabilité des prairies	108
Figure 25. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2003 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies.....	109

Figure 26. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{exces}$ pour l'année 2016 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver	110
Figure 27. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2016 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver	111
Figure 28. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2011 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN, (a) sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver ; (b) sur la période de vulnérabilité des prairies	112
Figure 29. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2011 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hier et (c) les prairies.....	113
Figure 30. Surface des prairies 2018 (a) par département.....	114
Figure 31. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{exces}$ pour l'année 2007 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver	115
Figure 32. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2007 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver	115
Figure 33. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2018 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver	116
Figure 34. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2018 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hier et (c) les prairies.....	117
Figure 35. Cartographie du $DOWKI_{exces}$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour l'année 2018.....	117
Figure 36. Moyenne des pertes de récoltes sur la France métropolitaine calculées sur AGRESTE et simulées par le modèle pour (a) le blé tendre d'hiver ; (b) l'orge d'hiver ; (c) les prairies. Les barres d'erreurs représentent les quantiles 10-90 calculés sur les pertes de récoltes départementales.....	119
Figure 37. Hypothèses de l'effet du changement climatique sur la distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$: focus sur les événements extrêmes.	138
Figure 38. Effets du changement climatique sur le rendement des céréales d'hiver (Source : Dorothee Kapsambelis)	142
Figure 39. Variation de la valeur moyenne des pertes de récoltes des prairies et de sa distribution (quantiles 10-90) calculée à l'échelle de la France métropolitaine sur les 400 années du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France sur le climat 2000 en fonction du nombre de simulations.....	151

Figure 40. Comparaison de la distribution des valeurs du DOWKIsech national entre le climat 2000 (valeurs calculées sur ARPEGE-Climat) et l’historique (valeurs calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN). Les extrémités du boxplot représentent les quantiles 10-90 et les barres d’erreurs représentent les quantiles 5-95.. 152

Figure 41. Distribution des valeurs annuelles moyennes du DOWKIsech calculées avec le modèle ARPEGE-Climat sur le climat 2000 et sur le climat 2050 (mm) et sur (a) sur la période de vulnérabilité des prairies et (b) la période de vulnérabilité des céréales d'hiver. En violet la moyenne (mm), les extrémités du boxplot représentent les valeurs décennales du DOWKIsech national, les extrémités des barres d’erreurs représentent les valeurs vingtennales du DOWKIsech national. 153

Figure 42. Distribution des valeurs du DOWKIsech moyen national sur le climat 2000 (400 valeurs) et sur le climat 2050 (400 valeurs). En abscisse les valeurs représentent des paliers, le premier palier est compris entre 220 mm et 200 mm, le dernier palier commence à -460 mm et va jusqu’à -480 mm. La valeur de la sécheresse la plus extrême se situe entre ces deux valeurs sur le climat 2050 et entre les valeurs -400 mm et -420 mm sur le climat 2000. 155

Figure 43. Durée des sécheresses extrêmes systémiques sur la France métropolitaine (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. En orange foncé, la valeur minimale de l’anomalie cumulée de bilan hydrique. En orange clair, les valeurs du DOWKIsech inférieures ou égales à -240 mm. Il est dénombré 31 sécheresses sur le climat 2000 et 57 sur le climat 2050. 157

Figure 44. Nombre de sécheresses en fonction des pertes de récoltes moyennes (sur 100 simulations) nationales par classe de valeurs sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (rouge) pour (a) le blé tendre d'hiver, (b), l'orge d'hiver, (c) les prairies..... 159

Figure 45. Période de retour des pertes de récoltes calculées sur France entière sur 100 simulations sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (rouge) pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies, d’après (Kapsambelis et al. 2022)..... 160

Figure 46. Classification des événements de sécheresses extrêmes en fonction de leur étendue spatiale (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 5%), de la moyenne nationale des pertes de récoltes et du caractère extrême local (nombre de départements dont les pertes sont supérieures à 25%), pour (a) le blé tendre d’hiver à climat 2000, (b) le blé tendre d’hiver à climat 2050, (c) l’orge d’hiver à climat 2000, (d) l’orge d’hiver à climat 2050, (e) les prairies à climat 2000 et (f) les prairies à climat 2050. Le diamètre des disques les plus petits correspond à un nombre de département compris entre 4 et 10 pour les céréales d’hiver. La taille intermédiaire correspond pour les céréales d’hiver à un nombre de département en moyenne de 15 et pour les prairies à un nombre de départements de 50 en moyenne. La taille maximale des disques est de 45 départements et 86 départements impactés respectivement et les prairies 164

Figure 47. Valeurs annuelles moyennes du DOWKIsech (mm) calculé sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution moyenne des valeurs du DOWKIsech (%) entre le climat 2000 et le climat 2050..... 166

Figure 48. Valeurs décennales du DOWKIsech (mm) calculées sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution de l'intensité des valeurs décennales du DOWKIsech entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5).....	167
Figure 49. Valeurs cinquantennales du DOWKIsech (mm) calculées sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution de l'intensité des valeurs cinquantennales du DOWKIsech entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)	168
Figure 50. Pertes de récoltes moyennes annuelles départementales sur le climat 2050 et évolution des pertes de récoltes annuelles moyennes entre le climat 2000 et le climat 2050 pour le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies.....	170
Figure 51. Période de retour en 2050 d'une perte de récolte moyenne départementale de 25% et évolution de cette perte de récolte entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5) pour le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies.....	171
Figure 52. Distribution des valeurs annuelles du DOWKIexces calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver (mm) sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et sur le climat 2050. En violet : la valeur annuelle moyenne.....	173
Figure 53. Distribution des valeurs du DOWKIexces moyen national sur le climat 2000 (400 valeurs) et sur le climat 2050 (400 valeurs). En abscisse les valeurs représentent des paliers, le premier palier est compris entre 340 mm et 360 mm, le dernier palier commence à -180 mm et va jusqu'à -200 mm. La valeur de l'excès d'eau le plus extrême se situe entre 340 et 360 mm sur le climat 2000 et entre 300 et 320 mm sur le climat 2050.	174
Figure 54. Distribution des pertes de récoltes moyennes nationales dues aux événements d'excès d'eau pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (bleu)	175
Figure 55. Pertes de récoltes liées à des événements d'excès d'eau en fonction de leur période de retour sur la France métropolitaine et simulées sur 100 simulations avec les quantiles 10-90 pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver.....	176
Figure 56. Classification des événements d'excès d'eau extrêmes en fonction de leur étendue spatiale (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 5%), de la moyenne nationale des pertes de récoltes et du caractère extrême local (nombre de départements dont les pertes sont supérieures à 25%) pour (a) le blé tendre d'hiver à climat 2000 (b) l'orge d'hiver à climat 2000, (c) le blé tendre d'hiver à climat 2050, (d) l'orge d'hiver à climat 2050.....	178
Figure 57. Valeurs annuelles moyennes du DOWKIexces calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver (mm) sur (a) le climat 2000, (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs moyennes annuelles entre le climat 2000 et le climat 2050.....	179

Figure 58. Valeurs décennales du DOWKIexces (mm) sur (a) le climat 2000 (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs décennales entre le climat 2000 et le climat 2050	180
Figure 59. Valeurs cinquantennales du DOWKIexces (mm) sur (a) le climat 2000 (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs décennales entre le climat 2000 et le climat 2050	181
Figure 60. Caractérisation des valeurs de l'aléa des événements extrêmes combinant sur le territoire métropolitain une sécheresse extrême et excès d'eau extrême sur le climat 2000 et sur le climat 2050.....	183
Figure 61. Pertes de récoltes sur la France métropolitaine dues aux événements combinés de sécheresse et d'excès d'eau en fonction de la période de retour pour(a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver.....	184
Figure 62. (a) Valeurs annuelles moyennes du DOWKIsech sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050 calculées avec 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution des valeurs du DOWKIsech sur 100 simulations de AREPGE-Climat, (b) évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 des valeurs annuelles moyennes calculées sur France métropolitaine de 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution de l'évolution sur 100 simulations d'ARPEGE-Climat	189
Figure 63. (a) Valeurs décennales du DOWKIsech sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050 calculées avec 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution des valeurs décennales du DOWKIsech sur 100 simulations de AREPGE-Climat, (b) évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 des valeurs décennales calculées sur France métropolitaine de 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution de l'évolution sur 100 simulations d'ARPEGE-Climat	190
Figure 64. Distribution des valeurs du DOWKIsech calculées sur la France métropolitaine et sur le périmètre des prairies sur le climat 2000 sur le climat 2050 selon le scénario médian et sur le climat 2050 selon le scénario pessimiste.....	192
Figure 65. Part des indemnisations du FNGRA (%) par type de péril de 1980 à 2018.....	203
Figure 66. Présentation du fonctionnement de l'assurance MRC.....	205
Figure 67. Fonctionnement du nouveau dispositif de gestion des risques en agriculture pour l'année 2023 à la suite de la réforme 2022 : Articulation entre le fonds de solidarité nationale (FSN) et l'assurance MRC.....	209
Figure 68. Evolution du prix de vente du blé sur les marchés à termes au code 2000 à 2020 (Source Euronext)	213
Figure 69. Distribution des pertes de récoltes par exploitation agricole du blé tendre d'hiver sur la période 2000-2016 calculée à partir des données RICA. En rouge : la moyenne des pertes de récoltes annuelle. Délimitation des boxplots : quantiles 10-90. Barres d'erreurs : quantiles 5-95.....	218
Figure 70. Relation entre la moyenne de pertes de récoltes (%) et l'écart-type des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole sur la période 2000-2016 pour la culture de blé tendre	219

Figure 71. Proportion d'exploitations agricoles (%) selon les pertes de récoltes sur la culture de blé tendre d'hiver sur la période 2000-2016.....	220
Figure 72. (a) Comparaison des moyennes annuelles de pertes de récoltes, (b) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant 0% de pertes de récoltes, (c) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes entre 0% et 10%, (d) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes comprises entre 10% et 25%, (e) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes comprises entre 25% et 50%, (f) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes supérieures à 50% calculées sur la base de données RICA (bleu), simulées à l'aide d'une loi normale (jaune), simulées à l'aide d'une loi Weibull (rouge) sur la période 2000-2016.	224
Figure 73. Pertes économiques brutes en fonction de leur période de retour sur le climat 2000 et sur le climat 2050 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver, (c) les prairies et (d) les trois cultures	227
Figure 74. Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, un événement décennal, un événement vingtenal et un événement cinquantenal sur le blé tendre d'hiver. Les seuils choisis sont ceux de l'intervention des différents acteurs de la réforme 2022 de la gestion en agriculture.....	230
Figure 75. Répartition du coût des dommages sur le blé tendre d'hiver à climat actuel et climat futur entre l'assurance MRC et le Fonds de Solidarité Nationale avec un taux de diffusion de 100%	231
Figure 76. Ecart relatif du montant des dommages économiques entre le climat 2000 et le climat 2050 pour les agriculteurs et pour l'assurance en fonction de la période de retour	232
Figure 77. Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, un événement décennal, un événement vingtenal et un événement cinquantenal sur les prairies.....	234
Figure 78. Coûts des dommages pour l'assurance MRC et pour l'Etat sur les prairies avec un taux de diffusion de 100% sur le climat 2000 et le climat 2050	235
Figure 79. Rendements (q/ha) du blé tendre d'hiver dans l'Eure-Et-Loir sur l'historique 1989-2018 (données : AGRESTE) et tendance (courbe en pointillée)	269
Figure 80. Calcul d'une tendance de rendements et étude de la corrélation (valeurs de R^2) pour le blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018 dans l'Eure-Et-Loir à partir de (a) la moyenne olympique calculée sur 5 ans, (b) la moyenne olympique calculée sur 10 ans, (c) la moyenne glissante calculée sur 5 ans, (d) la moyenne glissante calculée sur 10 ans, (e) la moyenne de seuil calculée sur 5 ans, (f) la moyenne de seuil calculée sur 10 ans	270
Figure 81. Etude de la corrélation (valeurs de R^2) de la tendance de rendement pour le blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018 pour chaque département à partir de (a) la moyenne olympique calculée sur 5 ans, (b) la moyenne olympique calculée sur 10 ans, (c) la moyenne glissante de rendement calculée sur 5 ans, (d) la moyenne	

glissante de rendement calculée sur 10 ans, (e) la moyenne de seuil de rendement calculée sur 5 ans, (f) la moyenne de seuil de rendement calculée sur 10 ans.....	271
Figure 82. Evolution des rendements du blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018.....	272
Figure 83. Tendence de rendement calculée par la moyenne de moyenne sur 10 ans sur les départements de l'Aquitaine pour le blé tendre d'hiver : (a) département de la Dordogne, (b) Gironde, (c) Landes, (d) Lot et Garonne, (e) Pyrénées Atlantiques.....	273
Figure 84. Tendence de rendement calculée par la moyenne de moyenne sur 10 ans du blé tendre d'hiver dans la région Aquitaine.....	274
Figure 85. Moyenne olympique glissante de rendement sur 5 ans et rendement de référence calculé à partir de l'équation de la courbe de la moyenne de seuil sur 10 ans.....	276

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Définition des modalités pour le classement des indices agro-climatiques et satellitaires dans la littérature.....	76
Tableau 2. Coefficient de corrélation calculés entre les pertes de récoltes et le DOWKI _{sech} France entière calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN.....	98
Tableau 3. Meilleurs paramètres utilisés pour la calibration du modèle par culture	102
Tableau 4. Erreur relative moyenne à l'échelle de la France métropolitaine et départementale entre les pertes de récoltes calculées sur AGRESTE et simulées par le modèle pour les prairies	120
Tableau 5. Erreur relative moyenne sur la France métropolitaine et à l'échelle départementale pour les sécheresses de 2003 et 2011 et l'excès d'eau de 2016 sur le blé tendre d'hiver.....	121
Tableau 6. Augmentation des températures annuelles moyennes (intervalle de confiance) selon le GIEC à horizon 2050 et horizon 2100 selon les différents scénarios RCP par rapport à la période de référence 1986-2005 (IPCC 2021)	136
Tableau 7. Les 12-couples GCM/RCM sélectionnés pour les 30 simulations du climat futur et 12 simulations historiques (issu de (J.-M. Soubeyroux et al. 2020). HISTO correspond à la période historique 1976-2005, et RCP aux différents scénarios du GIEC selon les concentrations de GES à horizon 2100. Les modèles globaux sont les modèles GCM. Dont le premier acronyme correspond au centre de recherche qui les a développés et les modèles RCM sont les modèles régionaux permettant la descente d'échelle.....	144
Tableau 8. Evolution (%) des valeurs du DOWKI _{sech} calculé sur la France métropolitaine entre le climat 2000 et le climat 2050.....	154
Tableau 9. Nombre de sécheresses extrêmes systémiques printanières et estivales sur le climat 2000 et le climat 2050	156
Tableau 10. Durée des sécheresses systémiques extrême sur le climat 2000 et le climat 2050	158
Tableau 11. Moyenne des pertes de récoltes annuelles par culture pour les 3 événements combinés sur le climat 2050	186
Tableau 12. Comparaison des scénarios pour le choix de la période de référence de calcul de la normalisation de l'indice DOWKI avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France	192
Tableau 13. Recettes du FNGRA (M€) de 2011 à 2018 (Source : CCR).....	202

Tableau 14. Taux de diffusion (%) de l'assurance MRC pour les exercices 2016 à 2019 par type de cultures ..	206
Tableau 15. Cotisations totales (M€), subvention (M€) et nombre d'exploitations assurées pour l'assurance MRC sur la période 2016 à 2019 (Données issues des notes de synthèses publiées par CCR sur le site du MAA)	206
Tableau 16. Valeurs des S/P par catégorie de culture de l'assurance MRC de 2017 à 2019	207
Tableau 17. Equations présentant la relation entre l'écart-type (ET) et la moyenne nationale (Mn) des pertes de récoltes pour les cultures de blé tendre d'hiver, orge d'hiver et colza d'hiver.....	219
Tableau 18. Typologie des exploitations agricoles utilisée dans le modèle : définition d'un rendement de référence et d'une surface moyenne de référence par exploitation agricole et par culture.	221
Tableau 19. Comparaison des indemnisations du FNGRA calculé par le modèle et simulées par le modèle.....	226
Tableau 20. Evolution du montant moyen des dommages annuels et des S/P de l'assurance MRC entre le climat 2000 et le climat 2050 sur le blé tendre d'hiver (taux de diffusion 100%)	233

LISTE DES ACRONYMES

AGRESTE : La statistique, l'évaluation et la prospective du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Ce sigle représente dans cette thèse les données de rendement et de surface utilisées à l'échelle départementale (et nationale).

AOGCM : modèles de système de circulation générale atmosphère-océan

APCA : Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture

ARID : Agricultural Reference Index for Drought

ARVALIS : Institut du Végétal

ASP : Agence de Services et de Paiement

Assurance MRC : Assurance multirisques climatique

BTPL : Bureau Technique de Promotion Laitière

CASD : Centre d'Accès Sécurisé aux Données

CCR : Caisse Centrale de Réassurance

CDE : Comité Départemental d'Expertise

CGAAER : Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux

CNIEL : Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

CODAR : Commission chargée de l'Orientation et du Développement des Assurances garantissant les dommages causés aux Récoltes

COP 21 : 21ème conférence des Parties à la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique. Cette conférence s'est tenue en 2015 à Paris.

DSAAT : Decision Support System for AgroTechnology

DOWKI : Drought and Overwhelmed Key Indicator. Indice agro-climatique développé dans cette thèse.

DOWKI_{excès} : Valeur annuelle de l'indice DOWKI pour représenter un événement d'excès d'eau

DOWKI_{sech} : Valeur annuelle de l'indice DOWKI pour représenter un événement de sécheresse

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement

EDI : Effective Drought Index

ESM : Earth-System Modèle (modèle de système Terre)

ET₀ : Evapotranspiration de référence

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

Euro-Cordex : Coordinated Downscaling Experiment – European Domain. Modèles de simulations des trajectoires climatiques en fonction de scénarios de GES sur le territoire Européen.

FAC : Fonds d'Allègement des Charges

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FEADER : Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

FNGRA : Fonds National de Gestion des risques en Agriculture

FSN : Fonds de Solidarité Nationale

GCM : Global Circulation Model

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IDELE : Institut de l'Elevage

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

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

IPP : Indice de Production des Prairies

ISBA : modèle Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère

JA : Jeunes Agriculteurs

LAI : Leaf Area Index ou indice de surface foliaire

LINTUL GRASS : Light INTerception and UtLiZation simulator GRASS)

MAA : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation

NDVI : Normal Difference Vegetation Index

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OMC : Organisation Mondiale du Commerce

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

ORCHIDEE : Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems

OTEX : Orientation Technico-Economique des exploitations agricoles classées dans le RICA

PAC : Politique Agricole Commune

PDR : Programme de Développement Rural

PDSI : Palmer Drought Severity Index

PTGE : Projet de Territoires pour la Gestion de l'Eau

RCM : Regional Climate Model

RCP : Representative Concentration Pathway. Scénario de forçage radiatif établi par le GIEC.

RDI : Reconnaissance Drought Index

RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole. Ce sigle représente dans cette thèse les données de surface et de rendement par culture utilisées à l'échelle de l'exploitation agricole.

RMSE : Root Mean Square Error ou erreur quadratique moyenne

RPG : Registre Parcellaire Graphique

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige. Dans la thèse, le sigle représente la grille de ré-analyse de 8kmx8km sur la France sur laquelle est calculée l'indice DOWKI.

Sécheresse RGA : Sécheresse Retrait-Gonflement des Argiles

SPEI : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

SPI : Standardized Precipitation Index

SSWI : Standardized Soil Water Index

STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standards

SURFEX : Surface Externalisée. Plateforme de modélisation de surface développée par Météo-France.

SVAT : Soil Vegetation Atmosphere Transfer

UE : Union Européenne

WOFOST : WOrld FOod STudies

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles scientifiques

Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2019. « An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index » *Climate* (7) (11): 125. <https://doi.org/10.3390/cli7110125>.

Ce premier article publié en 2019 présente la méthodologie développée dans la première partie de cette thèse soit le calcul de l'indice *DOWKI* (à la station météorologique) et le lien entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice par classe, soit le modèle de dommages développé dans cette thèse. Les résultats sont présentés sur la période historique 1989-2018. Des simulations stochastiques avec les copules gaussiennes sont également présentées dans cet article pour représenter un nombre important d'événements et calculer des périodes de retours des événements.

Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, Martine Veysseire, Jean-Michel Soubeyroux, et Jean Cordier. 2022. « Modeling the Impact of Extreme Droughts on Agriculture under Current and Future Climate Conditions Using a Spatialized Climatic Index ». *Applied Sciences* 12 (5): 2481. <https://doi.org/10.3390/app12052481>.

Ce deuxième article publié présente la méthodologie de calcul de l'indice sur la grille de réanalyse SAFRAN (8kmx8km sur la France métropolitaine) croisée avec le RPG. La méthodologie de simulations de projections climatiques à climat constant sur les années cibles 2000 et 2050 en utilisant le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France est également présentée. Les principaux résultats obtenus sur la fréquence et l'intensité des sécheresses extrêmes à horizon 2050 et leur impact sur les pertes de récoltes sont publiés dans cet article.

Articles de vulgarisation

Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2022. « Modélisation à horizon 2050 de l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes pour informer leur assurabilité ». In *La prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, La documentation française.

Cet article publié dans le dernier rapport de l'ONERC présente très succinctement l'intérêt des simulations à climat constant pour l'étude des événements extrêmes à horizon futur. Les principaux résultats sur l'indice (cartographie à la maille de 8kmx8km) et les pertes de récoltes à l'échelle nationale pour les événements décennaux de sécheresses et d'excès d'eau sont présentés et l'assurabilité des cultures est discutée en dernière partie.

Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2019a. « Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050 ». In *Rapport Scientifique CCR 2019*, 47-50. Paris, France

Ce premier article publié dans le rapport scientifique de CCR 2019 est un article court de 4 pages qui présente l'intérêt de modéliser l'impact des pertes de récoltes à partir d'un indice purement météorologique. Les résultats présentés montrent la comparaison entre les valeurs de l'indice climatique au département et les pertes de récoltes pour l'année de sécheresse 2003. Les résultats sur les simulations stochastiques avec l'utilisation des copules gaussiennes sont également présentés pour quelques départements de la France. La conclusion ouvre sur la poursuite des travaux : l'utilisation du modèle ARPEGE-Climat pour la simulation de l'impact du changement climatique sur les productions végétales à horizon futur.

Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2021. « Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050 ». In *Rapport Scientifique CCR 2021*, 62-66. Paris, France.

Cet article publié dans le rapport scientifique de CCR 2021 est un article court de 4 pages qui présente les résultats de la thèse sur le changement climatique, son impact sur l'évolution de la fréquence et l'intensité des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau et les conséquences sur les pertes de récoltes des trois cultures étudiées.

Divers

Cette thèse a été présentée au concours « Ma thèse en 180 secondes » jusqu'à la finale de Bretagne Loire 2021 dont la vidéo est disponible : <https://www.youtube.com/watch?v=MDBveyXUwh0>.

Ce concours a été présenté dans l'optique de toujours rechercher la vulgarisation des propos scientifiques, la recherche d'analogie simples et efficaces pour aider à la compréhension des travaux effectués. En effet, ce travail de recherche est effectué au sein de la CCR et ainsi, il était particulièrement important de pouvoir présenter les travaux aussi bien à des académiciens, que des souscripteurs de l'assurance et la réassurance, que des agriculteurs, que des institutions (Direction Générale de la Performance Economique des Entreprises du MAA et Direction Générale du Trésor du Ministère de l'Economie et des Finances).

Parallèlement à ce travail de recherche, j'ai effectué une mission du suivi du développement de l'assurance multirisques climatique pour le MAA durant ces années de thèse. CCR est en effet en convention avec le MAA pour effectuer des analyses sur l'évolution du portefeuille de l'assurance MRC. Ce travail a fait l'objet de la publication d'une note de synthèse du MAA pour chaque campagne. Durant

ce travail de thèse, 4 notes de synthèse ont donc été publiées pour les campagnes 2017, 2018, 2019, 2020.

La méthodologie employée pour réaliser ce travail ainsi que les différents indicateurs créés ont fait l'objet d'un article publié dans le rapport scientifique CCR 2021 :

Kapsambelis, Dorothee, Stéphane Busson, Roxane Marchal, et David Moncoulon. 2021. « Traitement des données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture ». In *Rapport Scientifique CCR 2021*, 84-87. Paris, France

**INTRODUCTION AU
RISQUE EN
AGRICULTURE ET
OBJECTIFS DE LA THESE**

Dans le registre paroissial d'Aubergenville de 1694¹, on trouve la citation suivante :

« L'année 1694 fut nommée l'année de la famine, les blés de la récolte de 1693 étaient de si mauvaise qualité que le pain ne nourrissait point comme à l'ordinaire. Peu de temps après avoir mangé, on était encore dévoré de la faim. C'est à cela qu'on doit la mortalité qui arriva alors ». Cette crise alimentaire commence dès 1692. À cette époque, l'hiver est rigoureux et il lui succède un printemps et un été fort pluvieux. La récolte est de mauvaise qualité et en moindre quantité, provoquant immédiatement la hausse des prix des grains. Les prières des paysans pour un climat plus doux l'année suivante ne sont pas entendues. En 1693, un épisode important de gel survient durant l'hiver et des inondations de grande ampleur ont lieu au printemps et sur une partie de l'été. L'état des cultures céréalières est catastrophique et la récolte est très basse, insuffisante pour nourrir toute la population comme l'illustrent les vers gravés sous l'estampe d'André Le Roux « Distribution du Pain du Roy au Louvre », exposée au musée Carnavalet à Paris :

« Chacun accourt au pain : c'est à qui en aura.

O Dieu ! la foule est si grande qu'on si tue :

La livre est à deux sols ; pour l'avoir il faudra

Risqué d'estre étouffé, cela continue ».

Pendant toute la période de l'Ancien-Régime, les famines, causées par de mauvaises conditions climatiques entraînant de faibles récoltes, se succèdent et la société entière mesure alors les conséquences du risque climatique. Les agriculteurs, eux, voient leur revenu et leur qualité de vie affectés. Les personnes les plus riches déplorent la hausse des prix du grain, due au caractère rare du produit. Les plus démunis, meurent dans les rues. On compte à la suite de la famine de 1692-1694, 1,3 millions de morts au total (soit 6,5% de la population). Le risque climatique est craint et perçu comme un fléau, un châtement de Dieu, un danger.

Aujourd'hui, le terme « risque » s'est installé dans notre utilisation quotidienne, fréquemment employé par tous les métiers (médias, politiques, santé, justice, sciences, commerce, banque et assurance, etc.). Il est devenu un mot clé et un concept à part entière dans les sciences de gestion. Dès le Moyen-Âge, le mot « risque » prend différents sens. Il est employé à la fois comme synonyme de péril, d'aventure, de danger, de fortune (au sens de destin ou chance), de hasard et d'opportunité. A partir de ce moment, la notion de risque évolue selon 4 concepts : le danger, l'opportunité, l'aléa, l'incertitude. Le risque est donc un potentiel, négatif (menace, péril, danger) ou positif (richesse, fortune, opportunité), lié à notre connaissance de l'avenir (hasard, sort, l'aléa) ou à sa méconnaissance (inconnu,

¹ Registre paroissial d'Aubergenville 1674-1720 collection communale, page 104, milieu bas gauche / site des archives en ligne départementales des Yvelines, côte de substitution du document : 5MI 1845 [2085563/4]

aventure, incertitude). Les définitions du mot risque sont nombreuses et dépendent du domaine dans lequel il est appliqué. En mathématiques, il est associé à une probabilité d'apparition (Savage 1954). Dans le domaine de l'assurance, il a un double sens : il est à la fois associé à la survenance d'un aléa engendrant des pertes (J. Cordier et al. 2008) mais aussi à la notion de bien assuré exposé à un aléa. Dans le domaine de la prévention, le risque porte sur la survenance de l'aléa dans des zones habitées (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale de la Prévention des Risques 2017). Ainsi, étudier le risque, revient à évaluer sa nature, son impact dans le temps et dans l'espace, sa perception par les acteurs et sa gestion.

Dans le domaine de l'agriculture, l'exploitant agricole a pris conscience très tôt des risques sur son activité et en particulier les risques climatiques et les risques de marché qui impactent directement son revenu. C'est d'ailleurs de ce caractère « risqué » de l'agriculture, que naît la Politique Agricole Commune (PAC), en 1957, avec le traité de Rome, dans lequel il apparaît qu'il faut « assurer un niveau de vie équitable à la population agricole », « stabiliser les marchés », « garantir la sécurité des approvisionnements », « assurer des prix raisonnables dans les livraisons aux consommateurs » (Séronie 2018). Ces termes, « assurer », « garantir », « stabiliser » apparaissent alors comme des réponses au risque, une forme de gestion et d'adaptation. La gestion du risque consiste alors à réduire son coût. En effet, le risque est toujours associé à l'évaluation des dommages. Le temps des famines est passé, et l'évaluation des dommages ne se compte pas en nombre de morts. Cependant, les risques climatiques sur les récoltes sont toujours présents et redoutés. En Europe, l'agriculture concentre la part la plus importante des pertes économiques liées à la sécheresse, soit 53%, ce qui représente 1,3 Md€ de pertes économiques annuelles (European Commission. Joint Research Centre. 2020). Or, ce montant des dommages peut être encore plus élevé lors d'un événement climatique extrême, comme la sécheresse de 2003 où le montant des pertes économiques est de 13 Md€ pour l'Union Européenne dont 4 Md€ pour la France (Létard, Flandre, et Lepeltier 2004). Ces événements sans précédents posent la question de l'adaptation de l'agriculture et de la gestion du risque climatique.

En Europe, la PAC soutient le revenu des agriculteurs. Elle est financée par le budget de l'Union Européenne, chaque pays contribuant à ce budget au prorata de son PIB. La France en est un des plus gros contributeurs (environ 19 Md€ en 2011) avec l'Allemagne (21,1 Md€) et l'Italie (14,5 Md€). La PAC représente environ 40% du budget de l'Union Européenne en 2020 soit environ 60 Md€ par an. La France est le premier bénéficiaire de la PAC avec environ 9,1Md€ par an sur la période 2014-2020. Au sein de chaque Etat Membre, les aides de la PAC bénéficient principalement aux agriculteurs, qui reçoivent, dans le cadre du premier pilier, des aides directes découplées (soutien au revenu), c'est-à-dire des subventions qui représentent environ 80% des dépenses et sont indépendantes de l'exposition au risque. De plus, 15% des dépenses de la PAC sont allouées aux aides au développement rural (pilier 2 de la PAC) et 5% pour l'Organisation Commune du Marché (Bureau et Thoyer 2014). La gestion des risques climatiques fait partie de la PAC et est intégrée au second pilier depuis 2014. En France, sur les

1,4 Md€ consacrés au second pilier, 400 M€ sont consacrés à la gestion des risques (dont fait partie la subvention à l'assurance récolte) ce qui représente donc moins de 5% sur le budget total annuel de la PAC. Les aides sur la gestion des risques sont très inférieures par rapport aux aides directes de soutien du revenu. Ainsi, lors d'un événement de grande ampleur, comme la sécheresse de 2003 mais également, plus récemment le gel de 2021, l'Etat met en place un plan d'action d'urgence pour maintenir le revenu des exploitations agricoles sinistrées en dotant le Fonds National de Gestion des Risques en Agriculture (FNGRA) d'une enveloppe exceptionnelle. **La question se pose alors de savoir si les aides allouées à la gestion des risques sont suffisantes étant donné d'une part, la faible proportion qu'elles représentent par rapport aux aides directes découplées dans la PAC, et d'autre part les situations d'événements climatiques extrêmes poussant l'Etat à intervenir de façon de plus en plus récurrente.**

Malgré tous les mécanismes de soutien mis en place, chaque année, les médias alertent sur les difficultés des agriculteurs à faire face aux risques climatiques. En effet, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le nombre d'événements climatiques n'a cessé de croître ces dernières années, augmentant alors les pertes économiques (FAO 2021). Cette augmentation de fréquence des événements extrêmes serait liée au changement climatique. Celui-ci est au cœur des préoccupations de l'agriculture et les experts du climat ne cessent d'alarmer sur l'augmentation accrue de l'exposition de nos territoires aux risques de sécheresses notamment (IPCC 2014; 2012). Le changement climatique ajouterait une nouvelle incertitude sur la survenance des aléas climatiques, sur leur fréquence et leur intensité.

Le risque climatique met au défi l'ensemble des acteurs de la gestion des risques, et en première ligne, les assureurs. En effet, lorsque ce risque est de grande ampleur (risque catastrophique) il ne permet pas de mutualisation et l'incertitude sur l'avenir liée au changement climatique amène à repenser les méthodes d'analyses existantes souvent basées sur l'historique pour anticiper les risques. Ainsi, lors de la clôture du Varenne de l'eau du 1^{er} février 2022, le ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation Julien Denormandie, qualifie les aléas climatiques extrêmes comme « une réalité quotidienne » et insiste sur l'action nationale pour ne pas considérer le changement climatique comme une fatalité, une « épée de Damoclès »². La Commission Européenne a fixé pour le prochain programme de la PAC (2023-2027) dix grands objectifs et parmi eux figure celui de la lutte contre le changement climatique. Chaque Etat Membre doit s'appuyer sur ces objectifs pour élaborer son propre plan stratégique. C'est dans ce sens que la concertation sur la question de l'eau et l'adaptation au changement climatique a été élaborée en France. Cette concertation, qui a débuté en 2019 avec le ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation Didier Guillaume puis reprise par le député Frédéric Descrozaille au printemps 2021 a pour objectif de proposer des solutions pour stabiliser le revenu des exploitations agricoles lors d'événements

² Discours de clôture du Ministre de l'Agriculture lors du Varenne de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, le 1^{er} février 2022

climatiques de grande ampleur. Sous forme de trois groupes de travail, la concertation s'est articulée à tous les niveaux de gestion des risques et à toutes les échelles : le système de gestion des risques en agriculture en particulier l'assurance multirisques climatique et son articulation avec le FNGRA ont été revus. Les questions de la gestion et de l'accès à la ressource en eau à l'échelle des territoires ont été abordées. Enfin, l'adaptation au changement climatique par la gestion de modes de cultures et de variétés résistantes a été étudiée (« Varenne agricole de l'eau et du changement climatique. Proposition d'un plan stratégique pour 2023-2030 pour la réforme des calamités agricoles et le développement des assurances récoltes » 2021; Descrozaille 2021). L'enjeu est de pouvoir caractériser le risque climatique, en termes de fréquence, d'intensité, et de son caractère systémique et ses conséquences sur les pertes de récoltes pour proposer une réforme des outils de gestion des risques adaptée au contexte du changement climatique. **Ainsi, il existe des besoins en chiffrage du coût des événements extrêmes climatiques sur la France métropolitaine afin de pouvoir quantifier l'allocation nécessaire du budget de l'Etat et les fonds propres requis des assureurs pour faire face aux risques climatiques futurs dans le contexte du changement climatique.**

La Caisse Centrale de Réassurance (CCR), société anonyme dont le capital est détenu par l'Etat, a trois piliers dans son plan stratégique : la réassurance publique pour les risques jugés non assurables par le marché privé, l'expertise et la modélisation de ces risques et enfin la prévention. CCR assure également la gestion comptable et financière du FNGRA et dispose à ce titre des données de sinistralités et indemnisations pour tous les périls et les cultures sur ce périmètre. En France, jusqu'à ce jour, la réassurance publique ne fait pas partie du système de gestion des risques en agriculture.

Ces travaux de thèse sont réalisés au sein du département R&D Modélisation de CCR qui développe depuis plus de 15 ans des modèles de simulation de l'aléa et ses conséquences en termes de dommages assurés ou économiques et partage son expertise avec ses clients, les collectivités locales et les pouvoirs publics afin de contribuer à la mise en œuvre de politique nationale de prévention. De plus, ce département est en charge du suivi et de l'expertise de l'assurance multirisques climatique sur récoltes (assurance récolte) depuis la campagne 2015 pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA). A ce titre, CCR assure la conception et la gestion d'une base de données géographique des polices d'assurance récolte et des sinistres (Kapsambelis et al. 2021). Ces analyses sont publiées pour chaque campagne sur le site du MAA³. Durant la concertation, depuis 2019, CCR a apporté un appui technique chiffré basé sur une modélisation des dommages sur les récoltes liés aux aléas climatiques. Ainsi, CCR a un rôle à jouer dans la réforme de la gestion des risques en agriculture, d'une part à travers son expertise de modélisation du risque climatique et d'autre part à travers sa mission d'intérêt général : accompagner l'Etat en matière de réflexion sur la gestion des risques extrêmes.

³ <https://agriculture.gouv.fr/la-gestion-des-risques-en-agriculture>

Cette thèse est co-dirigée par l'Institut Agro (Rennes) et CCR qui en est le financeur. Ces travaux scientifiques auront une application du fait du rôle institutionnel de CCR dans le cadre des réflexions en cours sur la réforme de la gestion des risques en agriculture.

Ce premier chapitre a pour objectif de décrire le contexte de ces travaux de thèse. Ainsi, la première partie étudie les différents risques en agriculture et leurs stratégies de gestion. La deuxième partie présente les objectifs de la thèse, les problématiques posées et la méthodologie générale mise en œuvre pour y répondre.

I LE RISQUE EN AGRICULTURE

I.1 Définition générale

Comme nous l'avons vu dans l'introduction de ce chapitre, la notion de risque a plusieurs significations selon le domaine dans lequel elle est étudiée. Les économistes se sont interrogés sur la différence entre le risque et l'incertitude et la définition de ces deux concepts. Le fondateur de l'école d'économie de Chicago, Frank Knight explique que le risque fait référence à une situation où la probabilité du résultat peut être déterminée ou calculée alors que l'incertitude ferait référence à un événement dont la probabilité ne peut être connue (Knight 1921). C'est également dans ce sens que (Robison et Barry 1987) définissent l'incertitude. Ils rappellent que « les événements incertains sont importants lorsque leurs finalités modifient le bien-être social ou matériel d'un décideur ». Ces auteurs notent qu'une application de cette définition du risque existe comme étant la probabilité de pertes économiques, ou du niveau de revenu.

La majorité des auteurs définit l'incertitude comme la connaissance imparfaite, et le risque comme l'exposition à des conséquences économiques incertaines et non favorables (Hardaker et al. 2004). Ces auteurs identifient différents types de risques en agriculture, qui sont exposés dans la section suivante, risques climatiques, risque de marché, risques institutionnels, risques personnels. Dans ces définitions, le risque perd son « potentiel positif » (chance, opportunité) comme défini au Moyen-Âge et n'est défini que par son « potentiel négatif ». De la même façon, (Chavas 2004) définit le risque en agriculture, comme « une incertitude qui peut engendrer la probabilité de perdre de l'argent, nuire à la santé humaine, affectant les ressources et tout autre type d'événement qui affecte le bien-être de l'agriculteur ».

Ces différentes définitions du risque mettent en évidence l'importance de savoir le quantifier et font une approche du risque par la perte. Cette approche est également présente dans le domaine de l'assurance, puisque tarifier le risque revient à décrire la probabilité d'occurrence du sinistre et le calcul de l'espérance moyenne de la perte qui correspond à la prime pure. Ainsi, quelle que soit la forme de gestion du risque, elle est associée à la description du risque en lui-même, de l'évaluation des dommages,

pour arriver soit à des formes de gestion, soit à des actions pour minimiser les pertes liées au risque. L'étude du risque peut alors être réalisée sous trois volets : l'agent du risque, l'objet du risque et la gestion du risque (Vinet 2002).

L'agent du risque est la description physique du risque. Dans le cas du risque climatique, l'agent du risque est l'aléa, donc par exemple la sécheresse. Il faut identifier son processus (par exemple mesurer une anomalie de bilan hydrique ou de température), calculer sa fréquence et son intensité, son impact dans le temps et dans l'espace. L'objet du risque, ce sont les biens vulnérables au risque étudié. Il convient alors d'évaluer la vulnérabilité des cultures à ce péril climatique, identifier les pertes et les enjeux, soit le coût des dommages. Enfin, le dernier volet est la gestion du risque à l'échelle micro-économique (au niveau de l'exploitation agricole) et à l'échelle macro-économique (au niveau de la ferme France⁴). Elle implique les différents acteurs (agriculteurs, assureurs, pouvoirs publics, réassureurs) et les modes de gestion sur l'exploitation agricole (souscription à des contrats d'assurance, mise en place de moyens de prévention et de protection, gestion de modes de culture, évolution des espèces cultivées pour résistance accrue au risque).

Le risque climatique en agriculture peut être défini comme le croisement de l'aléa avec une parcelle agricole vulnérable comportant des enjeux économiques. Etudier le risque revient à décrire l'aléa (sa nature, son processus physique), son impact sur l'objet étudié et évaluer ses conséquences économiques.

I.2 Les types de risques

Ce travail de recherche s'intéresse particulièrement aux risques climatiques sur les productions végétales mais ce ne sont pas les seuls risques auxquels sont soumises les exploitations agricoles.

Les exploitations agricoles sont soumises aux risques suivants (J. Cordier et al. 2008; OCDE 2009; 2012):

- Le risque sur les productions qui affecte les productions agricoles en quantité et en qualité. Il s'agit des risques climatiques sur les récoltes mais aussi des risques sanitaires (maladies et ravageurs) et des risques de pollution ;
- Le risque de prix ou de marché lié à la variation des prix sur le marché et également du prix des intrants ;

⁴ Ferme France : on appelle ferme France les grandes caractéristiques de l'agriculture française en termes de surfaces cultivées, productions, nombre d'exploitations etc. Le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation donne une infographie actualisée chaque année de cette ferme France : <https://agriculture.gouv.fr/infographie-la-ferme-france>

- Le risque institutionnel et juridique lié aux modifications des politiques publiques et réglementations régionales, nationales et européennes et des législations environnementales. Ces modifications entraînent des changements de pratiques des exploitations agricoles ;
- Le risque financier lié à la variation des revenus agricoles par les fluctuations des taux de change et taux d'intérêt incluant également le risque de liquidité et de non-paiement ;
- Les risques humains et professionnels non spécifiques à l'agriculture mais existants pour toute activité d'entreprise. Il s'agit de risques tels que les maladies ou décès de personnel, la dégradation du matériel, le vol.

Ainsi, les risques climatiques entrent dans la catégorie des risques sur les productions agricoles mais ils sont en lien étroit avec d'autres risques et influencent ceux-ci positivement ou négativement.

En premier lieu, on note que les risques sanitaires sont liés aux risques climatiques. En effet, les conditions météorologiques peuvent créer un milieu favorable au développement de maladies ou de ravageurs. C'est le cas par exemple des printemps et été 2021 qui ont été particulièrement pluvieux et frais, permettant le développement du mildiou, maladie affectant notamment les vignes et conduisant à des baisses de productions (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2021). C'est aussi le cas pour l'excès d'eau de 2016, les conditions climatiques (printemps doux et humides) ayant favorisé l'apparition de nombreuses maladies pour les céréales (Ben-Ari et al. 2018).

Le risque de prix ou de marché est également lié au risque climatique au niveau macro-économique. En effet, les variations de prix des produits agricoles sont liées au rapport entre l'offre et la demande. La demande augmente d'année en année du fait de l'augmentation de la population mondiale mais elle est peu perceptible d'une année sur l'autre. L'augmentation n'est visible que sur une longue période (OCDE 2012). Ainsi, la volatilité des prix d'une année sur l'autre est liée surtout au paramètre de l'offre. Plus l'offre est importante et moins le prix est élevé. Or, ce qui fait, en partie, la valeur du produit est sa rareté. C'est pourquoi en 2003, malgré l'extrême sécheresse, les agriculteurs ont perçu une baisse de leur revenu moins importante que des années de sécheresse moins violentes (comme 2011). En effet, comme l'ensemble de l'Europe et des Etats-Unis a été impacté, le prix des productions agricoles comme les céréales a nettement augmenté ce qui a diminué légèrement l'effet de perte de quantité de production sur le revenu des agriculteurs (COPA COGECA 2003; Amigues et al. 2006). Cependant, l'ouverture des marchés et les échanges mondiaux des denrées alimentaires permet de stabiliser les prix en diminuant le caractère rare de l'offre. Ainsi, un événement climatique extrême survenant uniquement sur la France ne modifiera pas les prix des cultures. C'est pourquoi celui-ci est considéré comme indépendant (donc fixe) dans cette thèse.

Enfin, les risques institutionnels et climatiques sont en lien étroit et s'influencent mutuellement. En effet, la modification des politiques publiques de gestion des risques en agriculture peut faire changer les stratégies des agriculteurs sur la gestion du risque au niveau de l'exploitation agricole. Par exemple,

la PAC 2014-2020 met en place le paiement vert qui complète les aides directes et qui récompense les agriculteurs pour des pratiques respectueuses de l'environnement. Ainsi, subventionner les « bonnes pratiques » amène les agriculteurs à changer leur gestion culturale pour bénéficier de cette aide complémentaire. En France, l'assurance multirisques climatiques est subventionnée. Subventionner l'assurance est une forme d'incitation à y souscrire. De plus, les grandes cultures sont sorties du système du FNGRA depuis 2009 et la viticulture depuis 2010, car ces cultures sont considérées comme assurables. Cette décision entraîne une augmentation plus marquée des surfaces assurées et des contrats de 2011 à 2013 en viticulture et en grandes cultures (de Roince 2016). Cependant, les taux de diffusion sont relativement stables depuis plusieurs années (CCR 2020).

Plusieurs types de risques peuvent survenir sur une exploitation agricole et ne sont pas indépendants : les différents risques sur une exploitation agricole sont étroitement liés au risque climatique. Dans le cadre de cette thèse, seul le risque climatique et son impact sur les productions végétales est étudié. Il s'agit du premier risque qui impacte les productions végétales et donc les rendements des cultures.

I.3 Caractérisation des risques climatiques

L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) classe les risques climatiques en fonction de leur impact sur le revenu des exploitations agricoles (OCDE 2012) selon une approche croisée entre fréquence du risque et gravité. Cette classification est admise par de nombreux auteurs et on la retrouve notamment dans le nouveau schéma proposé pour le système de gestion des risques en agriculture par F. Descrozaille (voir partie II chapitre 2). La gravité du risque représente l'intensité du risque. Une gravité élevée est obtenue pour un risque engendrant un montant des dommages importants, soit des pertes de récoltes importantes à l'échelle de l'exploitation agricole. La fréquence du risque représente son occurrence de survenance sur l'exploitation agricole. Ainsi, trois types de risques sont définis : les risques normaux (fréquence élevée et gravité faible), les risques intermédiaires (fréquence et gravité moyennes) et les risques catastrophiques ou extrêmes (fréquence rare et gravité forte). Selon le degré du risque, l'agriculteur peut avoir recours à des stratégies personnelles de prévention et de maîtrise du risque sur son exploitation agricole auxquelles peuvent s'ajouter des politiques publiques d'intervention dans le cas de risques extrêmes.

Cependant, d'autres auteurs définissent également le risque en fonction du territoire impacté. Il s'agit alors de réfléchir non pas à l'échelle de l'exploitation agricole, mais à celle du territoire. Les auteurs définissent alors deux types de risques : le risque indépendant et le risque systémique (J. Cordier et al. 2008). Ce dernier impacte tous les agriculteurs au même moment. Dans le cas où le risque n'affecte qu'une région ou qu'une partie des agriculteurs, le risque est dit indépendant.

La Figure 1 propose une classification des risques climatiques selon les trois composantes : gravité, fréquence et territoire impacté. Cette classification s’inspire de celle de l’OCDE (OCDE 2012) mais intègre une troisième dimension (risque indépendant – risque systémique).

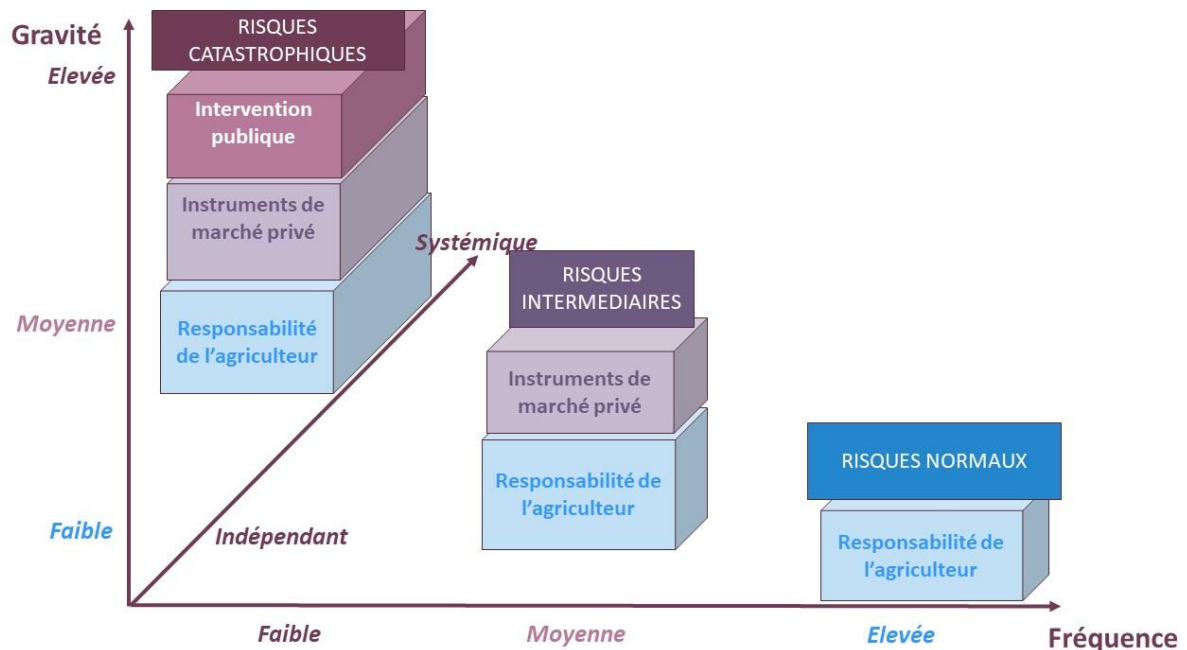


Figure 1. Classification des risques selon 3 composantes : fréquence du risque, gravité du risque et territoire impacté (Source : Dorothee Kapsambelis).

D’après la Figure 1, **les risques normaux** relèvent de la responsabilité de l’agriculteur. Ils ne requièrent pas l’intervention de l’Etat car ils sont jugés maîtrisables par la profession agricole. Ce sont des risques locaux, indépendants, peu intenses et d’une fréquence élevée. Ces risques sont par exemple, un épisode de vent peu intense. Ils font partie intégrante du métier même de l’agriculteur.

Les risques intermédiaires sont d’intensité et de fréquence moyenne et peuvent être pris en charge par des instruments de marché comme l’assurance. L’agriculteur transfère alors une partie de son risque à l’assureur. Les assureurs arrivent à supporter le risque grâce à une forme de mutualisation du risque sur leur portefeuille. Les risques intermédiaires sont par exemple, des excès d’eau qui n’ont pas impacté toute la France métropolitaine ou toutes les cultures et qui donc peuvent permettre une certaine forme de mutualisation de la part de l’assureur (mutualisation avec des contrats sur d’autres régions ou sur d’autres cultures par exemple). Si le risque couvre la totalité du portefeuille d’un assureur, celui-ci peut avoir recours à un réassureur pour supporter le risque. Dans ce cas, la mutualisation opère à une échelle plus large, le plus souvent internationale.

Les risques extrêmes, ou catastrophiques sont considérés comme non assurables, c’est-à-dire que les instruments du marché ne suffisent pas à porter le risque selon (OCDE 2012). A ce moment, la société attend de l’Etat qu’il intervienne comme cela a été le cas pour la sécheresse de 2003 ou lors du gel 2021

où l'Etat a mis en place un plan d'action pour soutenir le revenu des exploitations agricoles (enveloppe financière d'1 Md€). Ces risques extrêmes sont d'une intensité forte, c'est-à-dire que les pertes de récoltes engendrées sont particulièrement importantes et l'agriculteur ne peut pas supporter le risque seul. De plus, ces types de risques sont systémiques, c'est-à-dire qu'ils impactent l'ensemble du territoire ce qui ne permet pas aux assurances de mutualiser le risque et nécessite l'intervention de l'Etat. Or, aujourd'hui, du fait du changement climatique, leur fréquence est méconnue et leur intensité pourrait augmenter. Ces éléments posent également la question de la définition du niveau de risque assurable et du type de risque climatique assurable. Si, du fait du changement climatique, la composante systémique des risques climatiques augmente, alors la gestion du risque climatique doit évoluer pour correspondre au nouveau caractère du risque. C'est pourquoi, afin d'apporter des éléments chiffrés pour enrichir les réflexions de la gestion des risques en agriculture, il est nécessaire d'étudier ces risques extrêmes climatiques systémiques en intégrant l'impact du changement climatique.

Ce système, présenté en Figure 1, fonctionne dans le cas d'une bonne gouvernance, c'est-à-dire dans le cas où chaque acteur du risque a à sa disposition les informations nécessaires pour minimiser le risque. En France, l'assurance multirisques climatique (MRC) a été mise en place pour soutenir le revenu des exploitations agricoles en cas de risque climatique. Celle-ci couvre les risques suivants : gel, grêle, sécheresse, excès d'eau, tempête. Or, les derniers résultats de la campagne 2019 indiquent que cette assurance peine à se développer pour le secteur des prairies et de l'arboriculture (taux de diffusion inférieurs à 5%, voir chapitre 2 partie II pour les chiffres clés sur l'assurance MRC). Pour les grandes cultures et la viticulture, environ 30% des surfaces sont assurées. Du fait du faible nombre d'exploitations agricoles assurées, et d'une certaine régionalisation du portefeuille assuré, la mutualisation n'est pas toujours possible. La Figure 2 présente les taux de diffusion de l'assurance récolte pour la campagne 2019 pour les céréales et fourrages (a), la viticulture (b) et l'arboriculture (c) et les prairies (d).

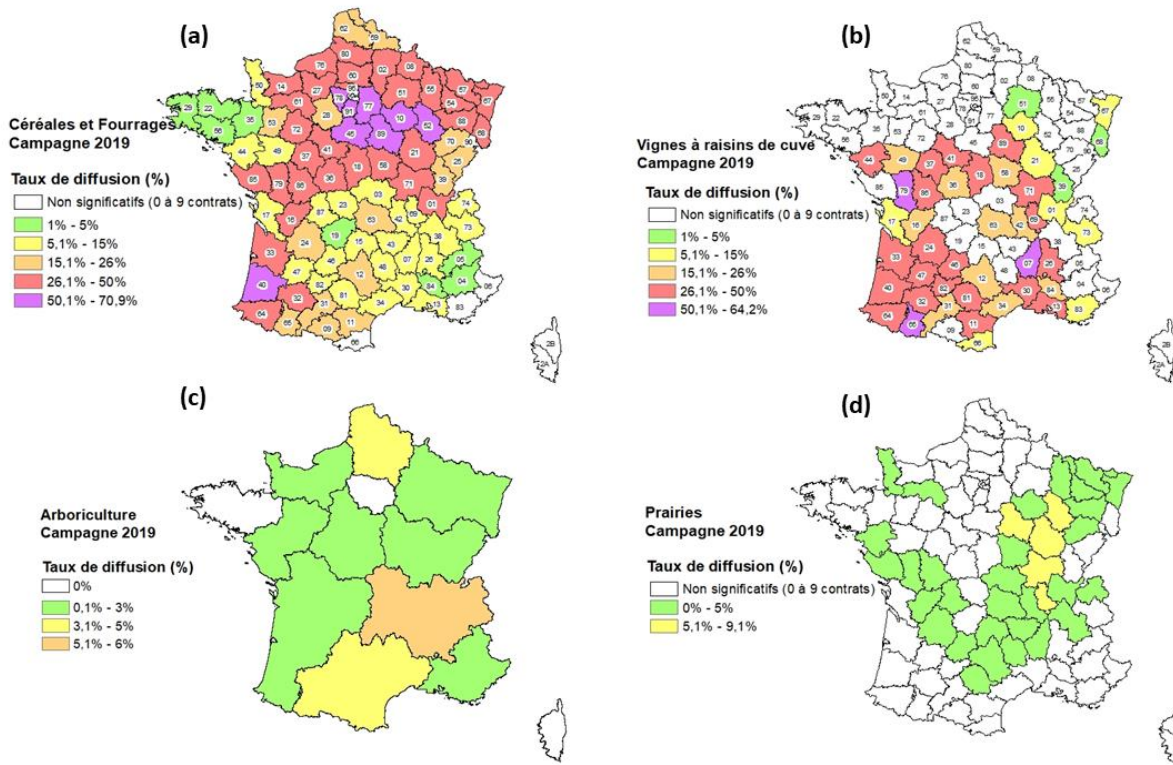


Figure 2. Taux de diffusion de l'assurance récolte campagne 2019 pour (a) les céréales et fourrages, (b) la viticulture, (c) l'arboriculture, (d) les prairies (CCR 2020)

A titre d'exemple, pour les prairies, les taux de diffusion sont plus importants dans le Nord-Est de la France, région fortement impactée par la sécheresse de 2018. Alors que cette sécheresse ne s'étend que sur ce territoire, du fait d'une faible diffusion du produit assurantiel et de sa concentration dans cette région, elle provoque des résultats négatifs pour l'assurance avec un ratio sinistre à primes (S/P)⁵ égal à 447%. Pour les céréales et fourrages, l'excès d'eau de 2016 est un événement extrême qui a conduit à des records de pertes de récoltes pour le blé tendre d'hiver. L'effet est encore plus marqué pour les assureurs. En effet, d'après Figure 2, les taux de diffusion sont nettement plus importants dans la moitié Nord de la France, particulièrement impactée par cet événement, ce qui a engendré un S/P de plus de 200% sur l'ensemble du portefeuille (Descrozaillaie 2021), alors qu'il aurait pu être plus bas si les taux de diffusion étaient homogènes sur le territoire métropolitain.

Dans le cas d'un faible développement de l'assurance et d'un risque climatique étendu, l'État assume sa fonction régaliennne : il intervient pour soutenir le revenu des agriculteurs et est alors face au dilemme du Samaritain (Bagnarosa, Cordier, et Gohin 2021b; Innes 2003). En effet, les mesures *ex post* de l'État réduisent l'efficacité des mesures *ex ante* de gestion du risque dont un exemple est l'assurance. En effet, les agriculteurs sachant que ce système existe, auraient tendance à ne pas souscrire à des contrats

⁵ Le ratio sinistre à primes (S/P) représente le montant de la sinistralité divisé par les cotisations payées à l'assurance par les agriculteurs

d'assurance MRC (Boyer 2008). En France, le FNGRA soutient le revenu des agriculteurs sur les cultures de prairies et l'arboriculture pour les mêmes risques que l'assurance récolte. Ce dispositif existe toujours pour ces deux types de cultures car l'assurance récolte ne s'est pas développée pour ces filières. La concurrence entre FNGRA et l'assurance récolte a notamment motivé la réforme du système de gestion des risques en agriculture. Ce n'est pas le seul dispositif que l'Etat met en place lors d'une crise climatique. Nous avons déjà parlé du plan gel, mais d'autres plans lui ont précédé, comme en 2007 où il y a eu l'Intervention du Fonds d'Allègement des Charges (FAC) pour les viticulteurs et les agriculteurs touchés par les orages, tempêtes et excès d'eau de printemps-été, un plan a également été mis en place pour la sécheresse 2011, de 2015 spécifiquement pour l'élevage (baisse de cotisations sociales et aides fiscales). Certains auteurs montrent que l'assurance, accompagnée d'investissements dans les moyens de prévention pourrait être un moyen de gestion des risques efficace pour soutenir le revenu des agriculteurs en cas d'aléa climatique (Boucher et al. 2019). C'est dans ce sens que la réforme de la gestion des risques, proposée par le député Descrozaille est présentée. Elle a notamment pour objectif d'inciter à la souscription à des contrats MRC avec une meilleure articulation de la part du risque prise en charge entre l'Etat, les assureurs et l'agriculteur.

Parmi les risques climatiques, ceux définis comme extrêmes et systémiques sont ceux dont la gestion est la plus complexe pour l'ensemble des acteurs. Leur caractère systémique ne permet pas une mutualisation pour les assureurs, dont l'équilibre financier repose sur la rareté de leur occurrence. Avec le changement climatique, l'augmentation de ces événements pourrait déséquilibrer mécaniquement le système et rendre nécessaire l'intervention de l'Etat. En effet, face à ces catastrophes, c'est l'ensemble de la production agricole qui est fragilisée. C'est pourquoi, étudier ces risques en intégrant le changement climatique et évaluer les pertes économiques engendrées, est nécessaire dans le cadre d'une nouvelle définition d'outils de gestion des risques en agriculture. Cette thèse s'intéressera donc particulièrement à ces risques extrêmes et systémiques.

I.4 Les différents risques climatiques et leurs impacts sur les productions végétales

En France, les principales surfaces cultivées sont les prairies et les céréales comme il est montré en Figure 3.

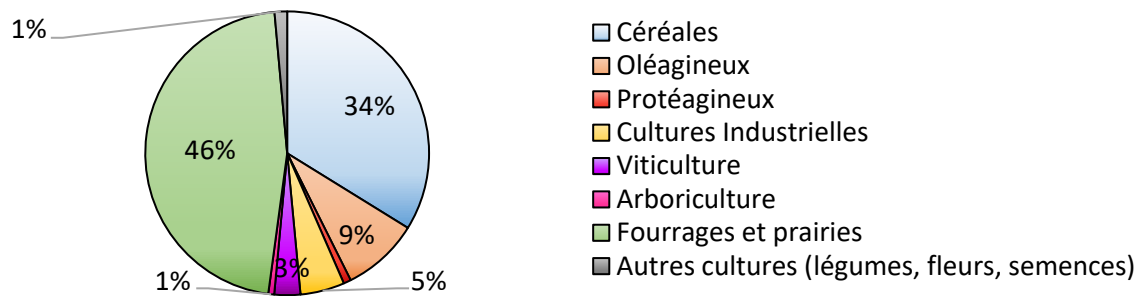


Figure 3. Part de la superficie couverte par type de culture sur la France métropolitaine en 2018 (figure réalisée à partir de la base de données AGRESTE)

En 2018, la surface de ces deux types de cultures représente 80% de la surface totale cultivée. La France est le premier pays producteur de céréales dans l'Union Européenne (UE) et sa production représente 26% de la production céréalière totale de l'UE en 2018 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018b). Ce sont des cultures à faible valeur ajoutée à l'hectare et qui nécessitent d'importantes surfaces cultivées à l'échelle de l'exploitation agricole. Les surfaces des prairies sont importantes, utilisées pour l'élevage. On les retrouve particulièrement sur tous les massifs montagneux français, régions qui sont souvent inaptes à la production d'autres cultures. La France a le premier cheptel bovin de l'Union Européenne, soit 18,6 millions de têtes et est le deuxième producteur de lait de vache en 2018 (après l'Allemagne), soit 24,6 millions de tonnes (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018b).

Les différentes cultures ne sont pas soumises aux mêmes périls climatiques. La Figure 4 présente la part des indemnités totales du FNGRA par péril climatique et par culture. D'après cette figure, les prairies représentent plus de 70% des indemnités du fonds. Les grandes cultures sont exclues de ce système en 2009 et il est donc normal qu'elles ne représentent pas une part importante des indemnités.

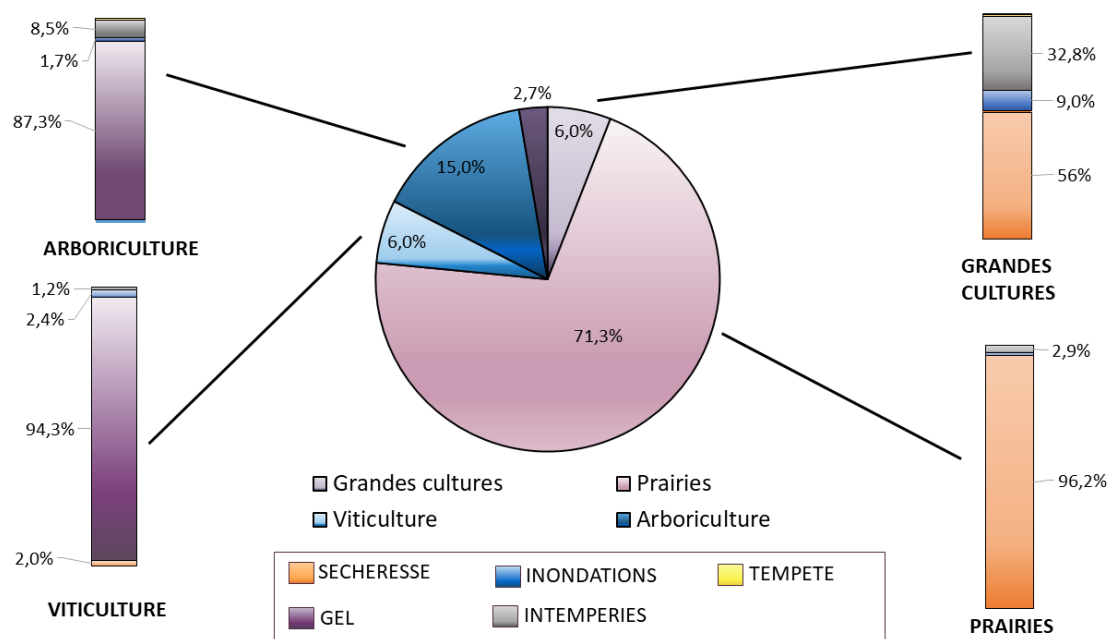


Figure 4. Part des indemnités (%) du FNGRA par péril sur la période 1989-2018 et part des indemnités (%) par péril pour chaque type de culture (Source : Dorothee Kapsambelis)

D'après la Figure 4, les prairies sont fortement impactées par la sécheresse qui représente plus de 95% des indemnités, les grandes cultures sont impactées par la sécheresse (56% des indemnités et par les inondations et intempéries, soit les excès d'eau qui représentent plus de 40% des indemnités). La viticulture et l'arboriculture sont surtout impactées par le gel qui représente respectivement 94,3% et 87,3% des indemnités. La grêle ne fait pas partie des périls couverts par le FNGRA car elle est considérée comme un risque assurable. Elle relève donc du système assurantiel. Le rapport entre le montant des indemnités du FNGRA (%) et la part de surface cultivée totale (%) est égal à 12,2% pour les grandes cultures, 15% pour l'arboriculture, 2% pour la viticulture, de 155% pour les prairies, ce qui signifie que même au prorata de leur surface, les prairies restent le type de culture avec la plus grande part d'indemnisation.

Il est intéressant de regarder le caractère récurrent ou non des périls climatiques. La Figure 5 présente la part moyenne (%) sur la période 2016-2020 de la sinistralité par péril climatique sur le portefeuille d'assurance des récoltes de Groupama (assurance MRC et assurance grêle) en France métropolitaine. Ce portefeuille représente environ 58% des contrats en assurance récolte.

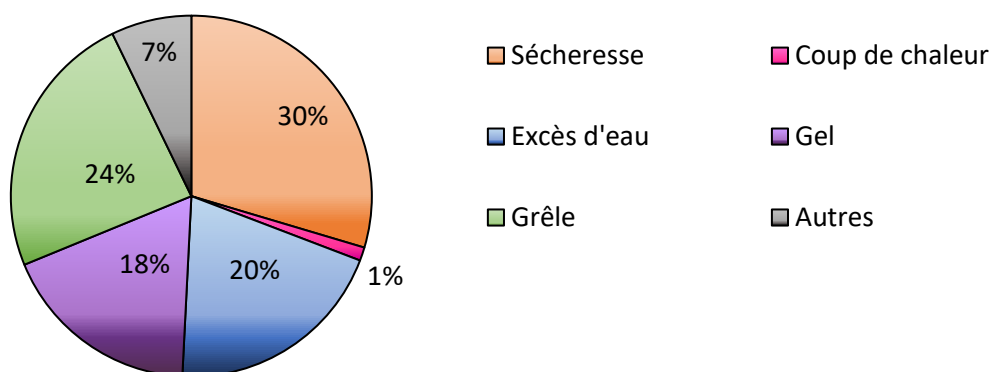


Figure 5. Part moyenne (%) sur la période 2016-2020 de la sinistralité pour chaque péril climatique sur les portefeuilles d'assurance récoltes (assurance MRC et assurance grêle) – Données Groupama, annexe du rapport de F. Descrozaille (Descrozaille 2021)

D'après la Figure 5, sur la période 2016-2020, les sécheresses et les excès d'eau représentent en moyenne 50% de la sinistralité de l'assurance. Certaines années sont particulièrement marquées par des événements extrêmes systémiques comme l'excès d'eau de 2016 et la sécheresse de 2018 qui engendrent plus de 50% de la sinistralité annuelle en 2016 et 2018 respectivement.

La très grande diversité des cultures et des périls a nécessité de restreindre le périmètre d'étude pour cette thèse. Le périmètre retenu concernera les prairies et les céréales qui représentent 80% de la surface cultivée en France. Les éléments ci-dessus montrent que ces cultures sont essentiellement affectées par les sécheresses et les excès d'eau. Ces deux risques seront donc traités dans cette thèse. Les céréales sont représentées par deux cultures : le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver (61% de la surface en céréales). Les prairies sont représentées par la surface toujours en herbe (75% de la surface en prairies).

I.5 Le changement climatique et ses conséquences sur l'agriculture

Les agriculteurs ont pris conscience très tôt de l'impact du risque climatique sur la quantité et la qualité des récoltes (Monteil 1877). Cependant, le changement climatique entraîne une nouvelle incertitude sur la fréquence et l'intensité de ces risques. Il est le résultat, en grande partie, des activités humaines et se traduit par une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (IPCC 2021). Le Groupement International d'Experts sur le Climat (GIEC) publie régulièrement des rapports qui caractérisent le réchauffement climatique et ses conséquences sur les différents domaines (sur les écosystèmes terrestres et marins, sur l'agriculture, sur la disponibilité de la ressource en eau, sur l'exposition aux risques des populations, etc.). Le GIEC établit plusieurs scénarios décrivant des voies différentes de développement en fonction des concentrations des GES à horizon

2100 (IPCC 2007). Les derniers rapports du GIEC (IPCC 2022; 2021) indiquent que le scénario le plus pessimiste, le scénario RCP 8.5 a une probabilité élevée de survenance alors que le scénario le plus optimiste (2.6) est sur le point d'être dépassé. Le scénario RCP 8.5 correspond à une augmentation progressive des émissions de GES à 8.5 W.m^{-2} (soit 1370 ppm équivalent CO_2) à horizon 2100. L'augmentation des températures se situe entre $3,3^\circ\text{C}$ et $5,7^\circ\text{C}$.

Les conséquences sont variées en ce qui concerne l'impact du changement climatique sur l'agriculture suivant les paramètres étudiés. De nombreux auteurs montrent que l'augmentation du dioxyde de carbone stimule la photosynthèse et pourrait donc conduire à une augmentation de la production agricole (Drake, González-Meler, et Long 1997; Downing et al. 2000; M. B. Jones, Jongen, et Doyle 1996). De plus, certains auteurs soulignent que l'augmentation du dioxyde de carbone a un effet antitranspirant, même si celui-ci est en partie compensé par l'augmentation de la surface foliaire (Calvet et al. 2008; Oliso, Huard, et Guilioni 2010). Ainsi, étudiant uniquement ce facteur, le changement climatique pourrait avoir des effets bénéfiques sur les cultures. Cependant, d'autres auteurs montrent au contraire, que l'augmentation des températures conduit à une augmentation de l'évapotranspiration des plantes ce qui entraîne une diminution des rendements et une demande accrue de l'eau pour les cultures (IPCC 2022; Olesen et Bindi 2002). De plus, l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) conduirait à une diminution de la recharge des nappes phréatiques (Ayphassorho et al. 2020). Plusieurs auteurs montrent l'importance d'étudier ce paramètre pour quantifier l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures, d'autant que l'ETP connaîtrait une très forte évolution dans le futur. Par ailleurs, l'augmentation des températures entraîneraient une diminution de la longueur du cycle de développement des cultures et réduirait en particulier le remplissage des grains ce qui entraînerait une diminution des rendements (Asseng et Milroy 2006; Rötter et Van de Geijn 1999; Fuhrer 2003). Enfin, les résultats sont différents selon les territoires et les cultures. Les différentes études de l'impact du changement climatique montrent que la Méditerranée serait particulièrement impactée par le changement climatique, avec une exposition accrue au risque de sécheresse (IPCC 2014).

De plus, le GIEC met en évidence une augmentation du risque extrême de sécheresse, en particulier les sécheresses estivales. Cela aurait pour conséquence une diminution très importante des rendements et une nécessité d'irriguer les cultures, qui seraient soumises à un stress hydrique récurrent de grande ampleur (IPCC 2022). En effet, en cas de risque extrême, la réduction de la disponibilité de l'eau pour les cultures et l'augmentation de la transpiration foliaire conduisent à une diminution des rendements, malgré l'effet fertilisant et antitranspirant du CO_2 (Olesen et Bindi 2002). L'augmentation du risque extrême de sécheresse pose la question de l'adaptation des cultures, et de la résilience des exploitations agricoles dans le futur.

Le GIEC met également en évidence une augmentation des précipitations hivernales dans certaines régions (en particulier la Méditerranée) ce qui a pour conséquences une augmentation du risque d'excès

d'eau pouvant conduire alors des baisses de rendement (par anoxie des racines ou par le développement de maladies favorisées par les nouvelles conditions climatiques) (ARVALIS 2015).

Enfin, l'augmentation des épisodes de vagues de chaleur extrêmes estivales mettrait également en difficulté la filière de l'élevage en particulier par la baisse de rendements des prairies et des cultures fourragères pour nourrir les troupeaux.

Les phénomènes extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau vont augmenter en fréquence dans le futur. Outre les effets directs sur les cultures, ces phénomènes fragilisent les sols (par l'érosion, les coulées de boue, l'accélération de la minéralisation de la matière organique, de la perte de la biodiversité) engendrant alors une diminution de la fertilité des sols, de la réserve utile ou encore des échanges cationiques. Ces effets secondaires s'ajoutent aux effets directs sur les cultures provoquant une diminution des rendements des cultures.

S'il existe aujourd'hui de nombreuses études sur l'impact du changement climatique sur les tendances de rendement dans le futur, ou encore les mécanismes physiques conduisant à la diminution de rendement, il n'existe pas de modèle économique global qui analyse la fréquence et l'intensité des sécheresses et excès d'eau extrêmes sur le territoire métropolitain et leur conséquence en termes de pertes de récoltes sur les principales cultures. Or ce sont précisément les risques extrêmes qui fragilisent l'économie agricole et qui ont conduit à la réforme de la gestion des risques climatiques en agriculture actuellement en réflexion et discussion. Il est donc nécessaire d'apporter des éléments chiffrés sur les conséquences de ces risques extrêmes climatiques en intégrant le changement climatique pour mettre en place des outils de gestion des risques efficaces dans le futur.

II OBJECTIFS DE LA THESE

II.1 Questions posées

Cette thèse a pour objectif de mesurer l'impact du changement climatique sur les productions végétales. Elle se réduit au périmètre des sécheresses et excès d'eau extrêmes systémiques et leurs conséquences sur les pertes de récoltes et pertes économiques des prairies et céréales à paille. Cette thèse a pour application la gestion des risques en agriculture.

Les questions posées par cette thèse sont donc les suivantes :

- **Peut-on prévoir, caractériser et quantifier, en termes de pertes économiques, l'impact des événements climatiques extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur les productions végétales en France métropolitaine aujourd'hui et à horizon 2050 ?**
- **Comment intégrer ces données économiques prévisionnelles dans des scénarios de gestion des risques afin d'éclairer la réflexion nationale sur l'évolution des politiques de gestion des risques en France pour faire face au changement climatique ?**

II.2 Méthodologie générale

Pour répondre à la problématique de la thèse, la méthodologie générale repose sur la conception d'un outil de simulation des conséquences des événements extrêmes climatiques sur les pertes de récoltes dans un contexte de changement climatique, et son application à la gestion des risques. Pour ce faire, trois étapes ont été nécessaires :

- Le développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes à partir de données météorologiques sur les cultures et les périls sélectionnés. Ce modèle est organisé en trois parties : l'aléa, les pertes de récoltes et le modèle de dommages sur une période historique. Ce modèle est présenté en première partie de cette thèse.
- La projection de ces pertes à horizon 2050 en utilisant le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Elle permet d'analyser la fréquence et l'intensité des sécheresses et excès d'eau extrêmes et leur impact sur les productions végétales. Cette analyse est présentée dans le premier chapitre de la deuxième partie de cette thèse.
- Un modèle de descente d'échelle à l'exploitation agricole afin de pouvoir quantifier la répartition des coûts des dommages des événements extrêmes entre les acteurs de la gestion des risques en agriculture. Cette méthodologie et les résultats obtenus sont présentés dans le deuxième chapitre de la deuxième partie de cette thèse.

La chaîne de modélisation mise en place permet d'analyser l'ensemble du processus du risque : l'analyse de l'aléa, son impact et sa gestion.

PARTIE I :

DEVELOPPEMENT D'UN

MODELE D'ESTIMATION

DES PERTES DE

RECOLTES LIEES AUX

ALEAS CLIMATIQUES

Dans le passé, de nombreux événements climatiques ont impacté les productions agricoles conduisant alors à des réductions des quantités mondiales comme lors de la sécheresse de 2003. Malgré l'étude et la connaissance des événements météorologiques et l'analyse des pertes de récoltes des cultures, le lien direct entre les paramètres climatiques et les pertes de production reste encore très difficile à élucider. En effet, certaines productions végétales ne sont pas présentes au champ pendant toute la campagne de production et l'impact d'un événement peut alors avoir des conséquences très variées suivant les variétés cultivées et selon le moment où il a lieu. De plus, l'agriculteur peut modifier les conséquences du risque climatique sur les cultures par ses pratiques, comme les décalages de date de semis ou les mesures de prévention telles que l'irrigation, qui modifient la vulnérabilité aux risques climatiques des cultures. Enfin, les données de rendements agricoles sur un vaste territoire sont généralement annuelles : elles dépendent donc d'un ensemble de facteurs qui a pu impacter la culture au cours de la campagne. Ainsi, il n'est pas aisé d'identifier les pertes de récoltes liées à un seul aléa climatique. Pourtant, cette question est fondamentale lorsque l'on s'intéresse à la gestion du risque climatique en agriculture. Les questions posées dans ce chapitre sont :

- **Peut-on expliquer les pertes de récoltes historiques par des aléas climatiques ?**
- **Comment simuler les pertes de récoltes à partir de paramètres météorologiques caractérisant ces aléas climatiques ?**

Ce chapitre a donc pour objectif le développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes dues aux aléas climatiques extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur une période historique à partir de données météorologiques. Pour ce faire, la première partie du chapitre présente un état de l'art sur la vulnérabilité des cultures aux risques climatiques de la plante et les bases de données existantes sur les rendements agricoles. Cette première partie présente ensuite une revue de la littérature sur les types de modèles d'impact du climat sur l'agriculture et en fait une synthèse en relation étroite avec les contraintes de ce projet de thèse.

La deuxième partie du chapitre présente la méthodologie établie pour l'estimation des pertes de récoltes dues aux aléas climatiques. Cette partie présente successivement la conception d'un nouvel indice agro-climatique caractérisant les aléas extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau, la méthode de calcul des pertes de récoltes, et enfin l'établissement de la relation entre les valeurs de l'indice et celles des pertes de récoltes. C'est une étape clé du développement du modèle. En effet, une fois la relation construite, il est possible de simuler les pertes de récoltes à partir des valeurs de l'indice en tenant compte des incertitudes. Il est donc nécessaire d'obtenir une relation de bonne qualité entre l'indice et les pertes de récoltes.

Les résultats du modèle de dommages sont présentés en troisième partie. La quatrième partie de ce chapitre propose une discussion sur la simulation des pertes de récoltes à partir des valeurs de l'indice agro-climatique.

I ETAT DE L'ART

I.1 Le rendement agricole : sa définition, influence du cycle de développement et base de données existantes pour le calculer

I.1.1 Définition du rendement des cultures

La notion de rendement est définie selon la Banque Mondiale comme l'un des indicateurs essentiels pour mesurer le développement agricole (World Bank 2010). Le risque étudié dans cette thèse est le risque de production en quantité. La production agricole est le résultat du produit du rendement des cultures (q/ha) et de la surface (ha). L'estimation du rendement des cultures consiste donc à estimer les surfaces cultivées et les quantités produites. Or, ces estimations ne sont pas simples et plusieurs approches existent dans le concept du rendement selon la discipline dans laquelle il est appliqué (économique, agronomique, écologique, etc.) (Fermont et Benson 2011).

Par exemple, les sociologues définissent le rendement agricole par trois concepts :

- Le rendement brut (rendement théorique qui ne tient pas compte des pertes qui peuvent survenir au cours de la saison culturale) ;
- Le rendement récolté (différence entre le rendement brut et les pertes) ;
- Le rendement économique (la quantité que l'agriculteur va effectivement utiliser (pour la vente ou sa propre consommation) après déduction des pertes post récoltes dues aux opérations de nettoyage, battage, vannage, séchage (Casley et Kumar 1988).

Les agronomes définissent également trois niveaux de rendements basés sur les besoins essentiels pour le développement de la culture :

- Le rendement théorique qui est le rendement maximum qui peut être atteint. Celui-ci est considéré comme dépendant des paramètres de température, CO₂, rayonnement solaire et des caractéristiques de la culture ;
- Le rendement atteignable lors d'une saison culturale, qui tient compte des facteurs limitants la croissance pour le développement de la culture tels que les carences en éléments nutritifs ou le stress hydrique ;
- Le rendement réel qui prend en compte la conduite culturale et le choix de l'agriculteur dans la lutte contre les mauvaises herbes, les parasites, les maladies et les polluants (Rabbinge 1993).

Il existe des similarités importantes entre les différentes définitions de rendement présentées. Quels que soient les facteurs pris en compte, il s'agit à chaque fois de faire la distinction entre un rendement théorique ou espéré et un rendement réel ou obtenu après les événements survenus au cours de la saison culturale. Ce rendement peut être supérieur au rendement théorique lorsque les conditions climatiques sont favorables et les conduites culturales bien exécutées ou il peut être également inférieur (mauvaises conditions climatiques, sanitaires, choix de conduite culturales non optimaux). Ainsi, ces définitions introduisent le concept de pertes de récoltes quel que soit son origine et insistent sur le fait de comparer le rendement réel à un rendement théorique.

1.1.2 Vulnérabilité des cultures aux risques climatiques

Dans le premier chapitre, le risque climatique est défini comme la réalisation d'un aléa climatique sur une production végétale vulnérable. Cette notion de vulnérabilité est essentielle car si la culture est vulnérable, alors des pertes de récoltes vont être observées. Elle introduit un paramètre de temporalité, c'est-à-dire que des pertes de récoltes sont observées si le moment où la culture est vulnérable coïncide avec celui où survient l'aléa. Selon les différentes cultures, ce paramètre temporel est différent. En effet, les cultures sont semées et récoltées, elles sont présentes au champ seulement pendant une période bien définie. Ainsi, l'aléa climatique va directement influencer le milieu du produit vivant, en modifiant ses caractéristiques ce qui peut agir sur la croissance des végétaux et donc sur les rendements.

Céréales d'hiver

Dans notre étude, deux céréales d'hiver sont étudiées : le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. Leur cycle de développement est présenté en Figure 6.

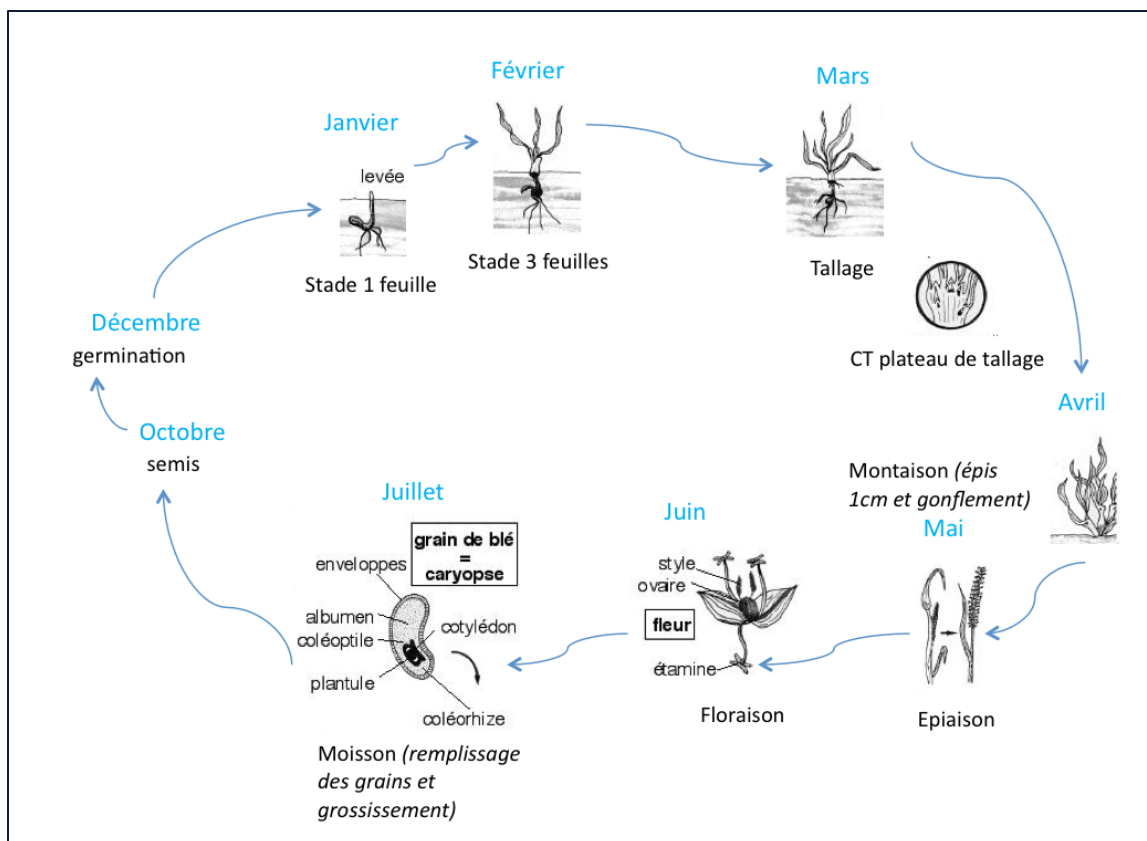


Figure 6. Cycle de développement d'une culture d'hiver (adaptation de (Henry et De Buyser 2000))

Les cultures d'hiver sont semées à l'automne (octobre-novembre) et récoltées durant l'été de l'année suivante (fin juillet-début août). Le cycle est constitué de deux périodes : la phase végétative et la phase reproductrice. Au début du cycle de développement (d'octobre à janvier), la culture est une graine, enfouie dans la terre et donc protégée par celle-ci. En janvier, au moment de la levée, le nombre de plantes au mètre carré est déterminé et la croissance de la plante commence. A partir du stade trois feuilles, une nouvelle tige croît : le maître brin. Ensuite, l'émergence de la première talle⁶ de la première feuille marque le début du tallage⁷ (mars) (Gate 1995). L'apparition des talles est synchronisée avec la formation des feuilles (à partir du maître brin) qui dépend de la durée du jour, du rayonnement et de la température (Jamieson et al. 1995). Le tallage s'arrête lorsque les tiges entrent en compétition pour l'eau, l'azote ou la lumière (Masle-Meynard 1980; 1981). Ensuite, la montaison commence avec le stade épis 1cm (distance entre le sommet de l'épis du maître brin et le plateau de tallage). Au cours de ce stade, le nombre d'épis par plante est déterminé. Puis, vient le stade d'épiaison lorsque le sommet de l'épi se dégage de la dernière graine. On parle du stade de floraison lorsque les sacs polliniques se libèrent. À ce moment-là, la tige et l'épi ont presque atteint leur croissance définitive (Gate 1995). Certaines composantes du rendement comme le nombre d'épillets par épis et le nombre de grains par épillets sont déterminées pendant ces stades (Masle-Meynard 1980). Ensuite, c'est la phase de

⁶ Talle : pousse qui se développe au pied de la tige principale

⁷ Tallage : Emission de talles issues de bourgeons axillaires formant une touffe herbacée

remplissage de grains (la moisson) : une étape clé pour la détermination du rendement. Cette étape détermine le poids du grain (sa teneur en eau et en protéines). Le stockage maximal des réserves s'effectue au moment où la quantité d'eau dans le grain est stable. Le grain atteint alors sa taille définitive, et entame la phase de dessiccation (maturité de la récolte) jusqu'à la récolte.

Ce cycle de développement détaillé permet de proposer une équation du rendement exprimé en gramme par mètre carré qui prend en compte tous ces paramètres :

$$\text{Rendement} \left(\frac{g}{m^2} \right) = nb \frac{\text{épis}}{m^2} \times nb \frac{\text{épillets}}{\text{épis}} \times nb \frac{\text{grains}}{\text{épillets}} \times \text{poids moyen du grain}$$

De nombreux facteurs, dépendant donc de l'environnement, peuvent intervenir pour réduire ces différentes composantes du rendement. Dans la littérature, (Gate 2007; Gate et al. 2008) caractérisent l'impact du changement climatique sur le rendement du blé en France en s'intéressant au nombre de grains par épillets et au poids moyen du grain. Pour étudier l'impact du climat sur le nombre de grains par épillets, ils étudient le déficit hydrique cumulé sur la période de floraison et de montaison. Pour analyser l'impact du climat sur le poids moyen du grain, ils réalisent une régression linéaire en combinant l'effet des fortes températures (>25°C) et du déficit hydrique cumulé durant la période de remplissage de grain.

(Lengrand 2017) distingue les facteurs limitants la croissance comme l'eau et les nutriments, de ceux qui la réduisent comme les maladies. Le stress hydrique est souvent considéré comme le facteur limitant la croissance des céréales en France (Lorgeou et al. 2012). L'excès d'eau est également mentionné comme provoquant une asphyxie des racines provoquant une diminution du nombre de tiges. De plus, lors d'un excès d'eau, la culture peut rentrer en anoxie (défaut d'oxygène) et bloque son métabolisme ce qui arrête la croissance et peut entraîner une diminution des rendements. L'institut du Végétal ARVALIS souligne aussi qu'en début de période, le gel peut également avoir un impact négatif sur les rendements du blé par deux facteurs : les températures négatives qui affectent les brins et le manque d'eau pour la croissance (l'eau gelée n'est pas disponible pour la plante) (Lorgeou et al. 2012).

Prairies

Pour les prairies, des études réalisées par INRAE affirment que l'essentiel de leur croissance s'effectue au printemps (Mollier et Carrère 2019) même si une partie non négligeable (les regains) a lieu à l'automne. La température idéale de croissance pour les prairies serait de 25°C. Au-delà de 30°C, la croissance s'arrête. En effet, en réponse à une importante chaleur avec un faible apport en eau, la plante ferme ses stomates ce qui ralentit son développement car la photosynthèse n'est plus assurée (J.-L. Durand 2007; Volaire, Norton, et Lelièvre 2009). De plus, en période de sécheresse, la nutrition azotée est réduite ce qui conduit, en plus du manque d'eau à une diminution des rendements (Lemaire et

Pflimlin 2007; J.-L. Durand 2007). Des expériences réalisées dans le Jura et le Massif Central sur les prairies montrent que les sécheresses affectent la quantité de fourrage produite mais également la qualité (réduction de la teneur en protéines, en fibres et/ou en sucre) (Meisser et al. 2013; Signarbieux et Feller 2012). D'autres études réalisées en Suisse indiquent que l'apport en eau lors d'une sécheresse permet de limiter les pertes de rendement (Sinaj 2013). Si la croissance des prairies survient essentiellement au printemps, elles restent fortement vulnérables aux sécheresses estivales, d'une part car les surfaces en zone de montagne sont importantes et la croissance est décalée dans ces régions et d'autre part car elles sont sensibles aux températures élevées.

Calcul du bilan hydrique pour les parcelles agricoles

Une façon simplifiée de calculer le bilan hydrique (Franquin et Forest 1977) au sein de la parcelle agricole est représentée en Figure 7. Entre deux dates, la variation du stock d'eau dans le sol disponible pour la culture est égale aux quantités d'eau apportées (principalement par les précipitations mais également l'irrigation quand elle a lieu) dont il est soustrait les pertes d'eau par drainage, ruissellement (flux horizontaux de l'eau) et évapotranspiration réelle.

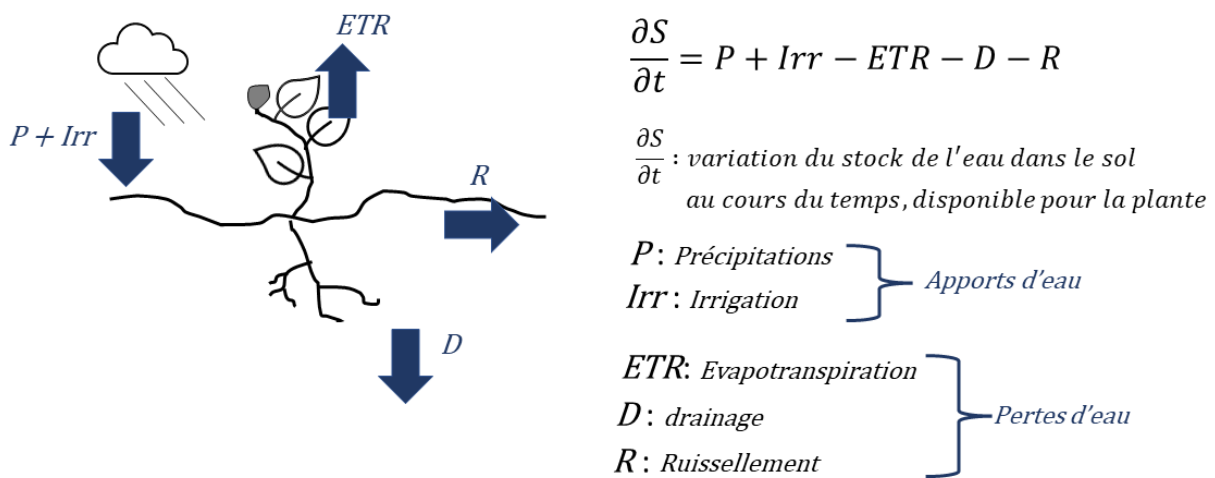


Figure 7. Illustration du bilan hydrique simplifié à l'échelle de la parcelle agricole (source : Dorothée Kapsambelis)

L'évapotranspiration correspond à la lame d'eau perdue par transpiration de la végétation et par évaporation de l'eau contenue dans le sol. Elle dépend de la demande évaporative de l'atmosphère, de la disponibilité de l'eau dans le sol et du stade de développement du couvert végétal. L'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) à partir des surfaces couvertes par les végétaux est une problématique bien connue des agronomes, météorologues et hydrologues. L'approche la plus utilisée pour l'estimer est la mesure du taux de saturation moyen de la zone racinaire et du taux d'évapotranspiration potentiel. Si la disponibilité en eau du sol est suffisante pour satisfaire la demande évaporative de l'atmosphère, alors, l'évapotranspiration réelle est équivalente l'évapotranspiration potentielle (ETP) du couvert

végétal. Ainsi, une approche simplifiée permet donc de considérer que l'ETR est égale à l'ETP. Pour le calcul de l'ETP, l'équation de Penman-Monteith est une référence pour la communauté scientifique, et est recommandée par la FAO (Allen et al. 1998). Dans cette équation, le paramètre de température est pris en compte pour le calcul de l'ETP. Cette équation sera donc utilisée dans la suite de ce travail. Elle est présentée en Annexe 1.

Cette approche agronomique du rendement met en évidence l'importance de s'intéresser à la quantité d'eau disponible pour la croissance de la plante lors de périodes clés de son cycle de développement (fin avril à fin juillet pour les céréales et printemps et été pour les prairies). Il sera alors construit un indice climatique capable de mesurer le bilan hydrique de la plante. Comme énoncé précédemment, la température est un paramètre important dans le développement des cultures et l'estimation des rendements. C'est pourquoi l'estimation de l'ETP dans cette thèse est réalisée en prenant comme équation celle de Penman-Monteith qui permet de prendre en compte ce paramètre de température. Cette analyse permet de cibler les événements climatiques étudiés : systémiques et présentant une anomalie du bilan hydrique (positive pour l'excès d'eau et négative pour la sécheresse).

1.1.3 Les bases de données de rendement agricole

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les productions végétales, une base de données sur les rendements et les surfaces par culture est requise pour estimer la production. L'objectif de ce travail de recherche est de donner des éléments chiffrés sur les pertes de productions sur l'ensemble de la ferme France. Ainsi, il est nécessaire de disposer de ces informations sur l'ensemble du territoire métropolitain et non uniquement sur un échantillon de données. Ce travail est spécifiquement réalisé sur les événements extrêmes. Il est donc nécessaire que la base de données choisie ait un nombre important de données (profondeur historique longue) pour qu'elles contiennent des extrêmes, données qui sont rares par définition. Enfin, afin d'éviter le plus possible des erreurs du modèle, il est appréciable que la base de données choisie soit à une échelle géographique la plus fine possible et que ses données puissent être directement intégrées dans le modèle sans avoir recours à une agrégation préalable en raison de la protection des données (anonymat, données confidentielles, etc.). Cette base de données doit donc répondre aux critères suivants :

- Disposer des données de rendement et de surface par culture ;
- Être représentative de la ferme France ;
- Disposer d'une profondeur historique longue pour que la période contienne des événements climatiques extrêmes ;
- Disposer d'une échelle géographique suffisamment fine ;
- Permettre l'intégration des données directement dans le modèle.

Une fois ces contraintes explicitées, les différentes bases de données sont étudiées afin de sélectionner la plus performante pour cette thèse.

FAOSTAT

La base de données FAOSTAT est dédiée à la statistique sur l'alimentation, l'agriculture, la pêche, la sylviculture, la gestion des ressources naturelles et la nutrition. Les données de surfaces et de rendement sont disponibles par culture à l'échelle du pays de 1961 à 2019⁸. Les cultures d'hiver et de printemps ne sont pas distinctes. Les données sont enregistrées pour 173 cultures, couvrant ainsi les grandes cultures, l'arboriculture, les légumes et la viticulture. L'objectif est de couvrir de manière exhaustive la production de toutes les cultures primaires pour tous les pays du monde. En revanche, les cultures servant à l'alimentation animale comme les prairies sont exclues. Les données ne sont pas toujours homogènes d'un pays à l'autre.

EUROSTAT

La base de données EUROSTAT référence les statistiques sur les pays de l'Union Européenne concernant tout type de sujet dont l'agriculture⁹. Concernant ce domaine, sont indiqués les structures des exploitations agricoles, les comptes économiques de l'agriculture, les prix et indices de prix agricoles, les données sur la production agricole. Les données de surface et de production récoltée en humidité standard sont accessibles à l'échelle du pays de l'Union Européenne, sur l'historique 2010-2020 par catégorie de cultures. Il est possible de disposer de ces données à l'échelle du département pour la France (descente d'échelle NUTS 3). Le détail est donné pour les cultures de blé et d'orge (sans distinction de cultures d'hiver et de printemps) mais il n'y a pas d'information sur les prairies (l'analyse est réalisée sur la collecte de lait de vache, la production de fromage, de lait à la ferme, etc.).

AGRESTE

En France, le site du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation sur la statistique, l'évaluation et la prospective de l'agriculture est riche d'informations sur les productions végétales et les exploitations agricoles, l'économie agricole et agro-alimentaire, les pratiques agricoles, la population agricole, les ressources naturelles, etc. Les informations de rendement et de surface sont disponibles par culture (avec distinction des cultures d'hiver et de printemps) à l'échelle du département et sont représentatives de la ferme France¹⁰. Les surfaces et les rendements en prairies sont également référencés. La dernière mise à jour du site (octobre 2022) présente les données à partir de 2000 jusqu'en 2020. Nous disposons des données pour les grandes cultures depuis 1989 par un ancien téléchargement et jusqu'en 2018. Dans la littérature, de nombreux auteurs utilisent la base de données AGRESTE pour calculer des pertes de

⁸ <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL>

⁹ https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/apro_cpsh1/default/table?lang=fr

¹⁰ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/>

rendements lorsque leur périmètre d'étude est la France métropolitaine (Ben-Ari et al. 2016; 2018; Schauburger et al. 2018; 2021; Brisson et al. 2010; Ceglar et al. 2016; Gouache et al. 2015).

Recensement Agricole

Le site du ministère recense également le nombre d'exploitations agricoles par département et par canton (sous forme de cartes interactives) suite aux recensements agricoles. Il est également possible d'avoir le nombre d'exploitations agricoles cultivant une culture par département. Les recensements agricoles ont lieu tous les 10 ans. Le dernier disponible en date est celui de 2010, celui de 2020 sera disponible courant 2022 en intégralité.

RICA public et RICA détaillé

Deux autres bases de données dont la gestion revient au MAA sont disponibles : la base de données RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) publique¹¹ et détaillée.

La base de données publique a été mise en œuvre en France en 1968 et repose sur une enquête annuelle, réalisée dans tous les Etats Membres de l'Union Européenne selon des règles et des principes communs. Les exploitations agricoles répertoriées ont une production brute standard d'au moins 25 000 euros en France métropolitaine (SSP - SDSSR - BSPCA 2015). Les informations sur le statut de l'exploitation agricole, les données économiques, les cultures cultivées, les aides spécifiques de la PAC sont indiquées pour chaque exploitation agricole. Le RICA français est construit de façon à ce que l'échantillon soit représentatif d'un ensemble d'exploitations agricoles et est constitué d'environ 7000 exploitations agricoles par année. Les données sont anonymes afin que l'identification d'une exploitation agricole du réseau soit impossible et c'est pourquoi, en termes de localisation de l'exploitation agricole, l'échelle la plus fine donnée est la région administrative. De plus, par exploitation agricole et pour chaque culture, la production en quintaux est indiquée ainsi que la surface (en hectares). Cependant, cette dernière est donnée par classe (intervalle de surface dans lequel est comprise la surface de la culture) ce qui ne permet donc pas de calculer directement un rendement par culture, qui doit être estimé. Les informations sont disponibles sur l'historique de 2000 à 2019. Les données de production ne sont pas disponibles sur les prairies.

Le RICA détaillé contient les données individuelles des exploitations agricoles non anonymes. Cette base de données est accessible uniquement dans certains cas particuliers après demande auprès du Centre d'accès sécurisé aux données (CASD) et après passage devant le Comité du Secret (la procédure dure environ 6 mois). Afin de garder l'anonymat des exploitations agricoles, seules des données agrégées peuvent être sorties de cette base de données, elles ne peuvent donc pas être directement téléchargées et implémentées dans un modèle.

¹¹ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/S-RICA/methodon/>

Après des échanges avec le CASD, il ne nous a pas été possible d’y accéder. En effet, les conditions d’utilisation du RICA non anonymisé sont très strictes et nécessitent des conditions de travail qui ne sont pas compatibles avec cette thèse.

Registre Parcellaire Graphique (RPG)

Le Registre Parcellaire Graphique est également une base de données disponible, au format de shapefile (fichiers de cartographies) produit par l’Institut National de l’Information Géographique et Forestière (IGN)¹². Cette institution a pour vocation de décrire d’un point de vue géométrique et physique la surface du territoire nationale et l’occupation du sol. Cette base de données sert de référence à l’instruction des aides de la PAC. Il existe une version anonymisée publique, qui contient les données de parcelle par culture principale sur le territoire français. Ces données sont produites par l’Agence de Services et de Paiement (ASP) depuis 2007. Elles sont disponibles chaque année de 2010 à 2020. Elles ne donnent que la localisation des parcelles (pas de données de rendement ni d’appartenance des parcelles à des exploitations agricoles).

Base de données FNGRA et MRC de CCR

Enfin, CCR dispose de deux bases de données : celle du FNGRA et celle de l’assurance MRC. La base de données FNGRA recense le montant des indemnités par péril, par culture et à l’échelle du département depuis 1980 par le Fonds des Calamités Agricoles. Cette base de données permet de vérifier la nature des périls impactant les types de catégories de cultures. En revanche, elle ne donne pas d’information sur la surface et le rendement des cultures. De plus, cette base de données n’est pas homogène dans le temps puisqu’à partir de 2009 et 2010, les grandes cultures et la viticulture respectivement sont considérées comme assurables et sortent de ce système d’indemnisation.

La base de données de l’assurance MRC recense les données de surface, capital assuré, cotisations subventionnables et totales, par culture et par exploitation agricole depuis 2015 jusqu’à 2020. Les données de sinistralité (c’est-à-dire les pertes de récoltes traduites en coûts monétaires) ne sont disponibles qu’à l’échelle du département par type de culture : grandes cultures, arboriculture, viticulture, prairies à partir de l’exercice 2017. Cette base de données n’est pas représentative de la Ferme France puisqu’elle concerne uniquement les agriculteurs assurés et n’est disponible que sur très peu d’années.

¹² <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

Cette première analyse sur les bases de données de productions végétales disponibles montre que peu de bases de données remplissent tous les critères définis. La base de données FAOSTAT est éliminée car son échelle géographique est trop large. La base de données EUROSTAT est écartée de l'étude car elle ne dispose pas de données sur les prairies et sa profondeur historique est relativement courte. Les bases de données du FNGRA et de l'assurance MRC sont utiles pour valider les résultats obtenus mais ne peuvent être utilisées directement dans le modèle. En effet, la base de données FNGRA n'est pas homogène dans le temps et ne possède pas les données de rendement ni de surface ; la base de données MRC n'est pas représentative de la Ferme France et est disponible uniquement sur un historique de 6 années.

Le RPG va être utilisé dans ce travail de thèse comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre pour situer les parcelles agricoles mais ne peut être utilisé seul car il ne comprend pas des données de rendement des cultures. Ainsi, il reste deux bases de données exploitables : AGRESTE et le RICA public. La base de données AGRESTE répond mieux aux critères d'échelle (données disponibles au département et non à la région administrative) et d'exhaustivité (données de rendement sur les prairies). C'est pourquoi, cette base de données a été sélectionnée. Dans le dernier chapitre, une méthode de descente d'échelle en couplant cette base de données avec le RICA public est présentée de façon à estimer les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole. L'analyse sur les limites des bases de données est indispensable avant de construire le modèle car de la précision de la base de données dépend la qualité et la robustesse du modèle développé. Afin de s'affranchir au maximum de chacune des limites des bases de données, une méthodologie de couplage des informations sur les bases de données RPG-AGRESTE-RICA public est utilisée.

I.2 Les méthodes d'études de l'impact du climat sur les rendements agricoles

Un modèle est une représentation simplifiée d'un phénomène et répond à un enjeu, ou un usage. Dans la littérature, une définition du modèle est donnée comme « une approximation » (Box et Draper 1987).

Dans la littérature, deux grands types de modèles sont couramment utilisés pour étudier l'impact du climat sur les rendements agricoles : les modèles mécanistes et les modèles statistiques. Ces types de modèles sont décrits dans les paragraphes suivants.

I.2.1 Les modèles mécanistes

Les modèles mécanistes permettent de comprendre les paramètres météorologiques qui influencent les variabilités du rendement et intègrent l'ensemble des caractéristiques du milieu des cultures (le type de sol, la conduite culturale, etc.). Ces modèles sont généralement utilisés à l'échelle locale (parcelle agricole) et ont pour objectif d'expliquer toute la variabilité des rendements agricoles (Hoogenboom 2000; J. W. Jones et al. 2003).

Ces modèles répondent donc à la question « Comment » et cherchent à comprendre l'interaction sol-plante-atmosphère. Ce sont donc des représentations informatisées de la croissance des plantes modélisée par des équations physiques intégrant les caractéristiques des sols, du climat, la gestion des cultures. Ils sont également utilisés pour estimer les conséquences de la variation inter-annuelle du climat sur l'agriculture (A. Challinor et Wheeler 2008; Paz et al. 2007; Semenov et Doblans-Reyes 2007; Ben-Ari et Makowski 2014). Certains modèles sont aussi utilisés pour aider les agriculteurs dans leur gestion culturale, par exemple, déterminer quand il faut irriguer ou fertiliser (modèle Yield prophet mais également les modèles créés dans certaines entreprises comme ITK). Les paragraphes suivants décrivent les principaux modèles mécanistes existants en agriculture.

Le modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard)

Ce modèle a été créé en 1996, par l'INRA (l'Institut National de Recherche Agronomique) à l'initiative de Nadine Brisson et avec l'appui de Dominique Ripoche. Ce modèle regroupe plusieurs modèles existants : GOA (plante), BYM (eau), LIXIM (azote). Dans sa forme originale, STICS simule les rendements agricoles sur deux cultures : le blé et le maïs. Le modèle STICS a beaucoup évolué au cours du temps pour intégrer plus de processus (bilan H₂O et N, fixation symbiotique, décisions de semis et de récolte, etc.) et de caractéristiques des sols et des conduites culturales. Aujourd'hui, le modèle est adapté pour une vingtaine d'espèces cultivées, de différents types (annuelles, pérennes, herbacées et ligneuses).

Le modèle STICS est au pas de temps journalier et simule la croissance du couvert végétal reposant sur le fonctionnement carboné des plantes sur le territoire français à l'échelle de la parcelle agricole. Il est structuré en plusieurs modules qui intègrent chaque partie du fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère comme présenté en Figure 8. Il utilise comme données d'entrées des données climatiques (rayonnement, température, précipitations), les caractéristiques du milieu (RUE potentielle, nature du sol, humidité au point de flétrissement du sol, teneur en eau et en nutriments du sol), et la gestion culturale (calendrier de l'irrigation, date de semis, doses et nature de fertilisation).

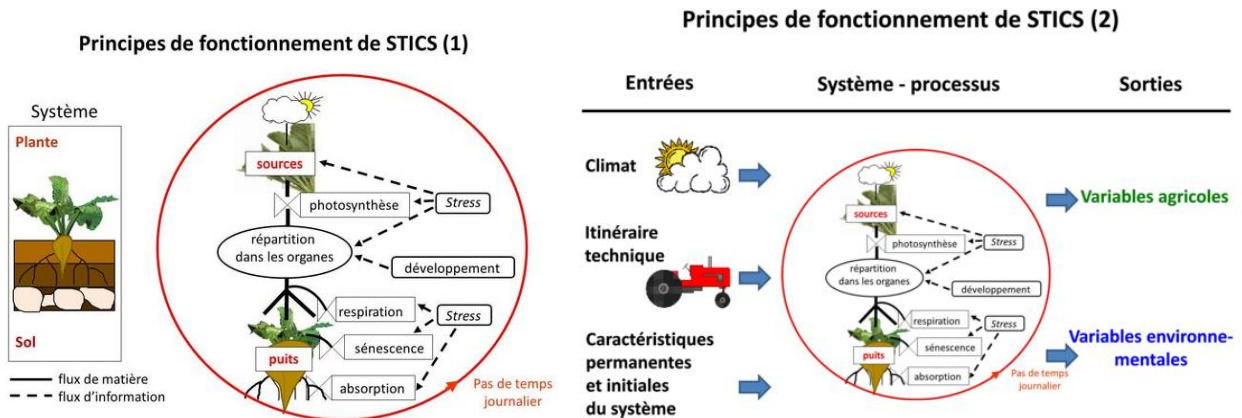


Figure 8. Principes de fonctionnement du modèle STICS (issu de INRA, STICS <https://www6.paca.inrae.fr/stics/Qui-sommes-nous/Presentation-du-modele-Stics/Les-principes-de-fonctionnement>)

Le modèle ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems) et le modèle ORCHIDEE-Crop

Il correspond à un modèle de surface continentale développé par l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) depuis 1980 et fait partie des modèles du GCM (Global Circulation Model). Ce modèle décrit l'ensemble des interactions physiques du système terrestre, soit les bilans d'eau et d'énergie, la phénologie des plantes et leur cycle de carbone (Krinner et al. 2005). Ce modèle est forcé par des données climatiques à l'échelle globale ou régionale et, couplé avec des modèles simulant l'atmosphère (LMDZ-GCM), il peut être utilisé pour étudier l'évolution du climat. Trois modules informatiques permettent de décrire notamment la mosaïque de végétation :

- Le module SECHIBA (Schématisation des EChanges Hydriques à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmosphère) simule les échanges biophysiques de l'eau et de l'énergie entre l'atmosphère et la surface terrestre¹³. Initialement, ce module a été développé par (Ducoudré, Laval, et Perrier 1993). Le pas de temps de ce module est de 30 minutes. Au niveau de la végétation, il intègre également le calcul de la photosynthèse, la croissance des cultures, la transpiration et la respiration des plantes.

¹³ <https://www6.inra.fr/basc/Recherche/Modeles/ORCHIDEE>

- Le module STOMATE (Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems) développé par (Viovy 1996). Ce module est au pas de temps journalier et calcule la phénologie de la plante, l'allocation du carbone, la respiration du sol. Les modules SECHIBA et STOMATE fonctionnent ensemble : Le module STOMATE fournit au module SECHIBA les informations sur l'état de la végétation (indice foliaire LAI, rugosité de l'albédo) et il reçoit de SECHIBA les informations sur l'état du milieu qui influence la croissance des plantes comme par exemple la température, le stress hydrique, la composition du sol).
- Le module LPJ décrit la distribution de la végétation, c'est-à-dire, l'évolution d'un type de végétation par rapport à un autre dans le temps et l'espace, la compétition entre différentes espèces pour la lumière, le rôle des feux. Son pas de temps est annuel (Ngo-Duc et al. 2007).

Le modèle ORCHIDEE-Crop est un modèle biogéochimique qui intègre un paramétrage simple de la fertilisation azotée et de la surface du sol du modèle ORCHIDEE et un module de phénologie des cultures et des récoltes issu de STICS. Il permet alors de simuler les stades de développement des cultures, le rendement des cultures, la productivité et les interactions biophysiques et biochimiques dans les terres cultivées (X. Wu et al. 2016). Dans ce type d'approche, l'effet de la concentration du CO₂ sur les rendements des cultures est modélisé.

Le modèle WOFOST (World Food Studies)

Ce modèle est développé par le Centre d'Etudes de l'Alimentation aux Pays-Bas en partenariat avec l'université de l'agriculture et le centre de recherche d'agro-biologie. Il simule la croissance d'une plante en calculant la photosynthèse brute et potentielle. Il permet d'évaluer notamment les éléments essentiels au développement des plantes tels que la température, la lumière, l'eau, les ions minéraux. Le pas de temps est journalier et le modèle décrit le développement de la plante et le bilan hydrique du sol (Diepen et al. 1989).

Le modèle DSAAT (Decision Support System for AgroTechnology)

Ce modèle est un ensemble de modules informatiques qui simulent la croissance de la plante. À l'origine, il a été développé par un réseau international de scientifiques, coopérant à l'International Benchmark Réseau de Sites pour le projet de transfert d'agro-technologies (J. W. Jones et al. 2003; 1998). Initialement, le modèle a été créé pour l'aide à la décision des agriculteurs dans leur choix de conduite culturale, en intégrant des connaissances sur le climat et sur les caractéristiques des sols (J. W. Jones et al. 2003). Il intègre ainsi des modèles de 16 cultures différentes dont le CERES-Maïze développé initialement par (C. A. Jones, Kiniry, et Dyke 1986) et le CERES- Wheat développé par (Ritchie et Otter 1985), SOYGRO (modèle pour le soja) développé par (Wilkerson et al. 1983). Il a été adapté aux conditions météorologiques de plus de 100 pays différents de l'Amérique et de l'Afrique (P. G. Jones et Thornton 2003). Il est utilisé pour aider les agriculteurs dans leur gestion des cultures (Thorp

et al. 2008). Il a été couplé à un autre modèle climatique (modèle IMPACT) pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture et les mesures d'adaptation possibles à l'échelle de l'exploitation agricole pour quelques cultures et sur plusieurs pays, mais hors pays de l'Europe (Robinson, s. d.). Les différents modules informatiques sont structurés par la relation de la plante avec son milieu en fonction du continuum sol-plante-atmosphère. Ainsi, il existe un module pour le sol, un module pour les conditions météorologiques, un module qui permet de passer d'une culture à l'autre, un module qui évalue les facteurs limitants de la croissance de la plante comme l'étude de production de matière organique en fonction de l'eau, de la lumière (J. W. Jones et al. 2003), de l'évapotranspiration (Meng et Quiring 2008; C. H. Porter et al. 2010; Gijsman, Jagtap, et Jones 2002).

Le modèle LINTUL GRASS (Light INTerception and Utilization simulator GRASS)

Ce modèle est un modèle de croissance des prairies. Il est développé pour prédire le développement du ray-grass (herbe utilisée pour l'alimentation animale pour sa forte valeur ajoutée fourragère) en Europe notamment dans des conditions de stress hydrique (A. Schapendonk et al. 1998). Pour ce faire, le modèle simule l'utilisation de la lumière par les prairies, la formation et l'allongement des feuilles, le tallage, l'utilisation du carbone. En 1996, le modèle a été inséré dans le projet CGMS (Crop Growth Monitoring System) pour prédire les rendements des prairies à travers l'Europe (Vossen, European Commission, et Rijks 1995; A. H. C. M. Schapendonk et al. 1996).

En conclusion, les modèles mécanistes permettent de bien comprendre les interactions entre la plante et son milieu, prenant en compte de nombreux paramètres pour expliquer l'intégralité de la variabilité des rendements. Ils sont spécifiques à une localisation précise et ne sont pas adaptés à une extrapolation à grande échelle (Olesen, Bøcher, et Jensen 2000). Ces modèles requièrent un nombre important d'informations et donc un temps de paramétrage et de simulation conséquent.

1.2.2 Les modèles statistiques

Les modèles statistiques quant à eux sont utilisés pour estimer l'impact du climat sur les rendements agricoles à grande échelle. Ces modèles sont basés sur l'analyse de données historiques en intégrant peu de données du milieu et requièrent moins d'information sur la croissance des végétaux. Ainsi, les modèles statistiques n'expliquent qu'une partie de la variabilité des rendements agricoles. Ces modèles sont généralement basés sur des régressions statistiques (Sultan et al. 2010). Ils simulent les rendements agricoles à partir de paramètres climatiques simples et le calibrage du modèle consiste alors à retrouver les valeurs de rendements sur une période historique à partir des données météorologiques. Ces modèles

ne cherchent pas à comprendre l'effet d'un phénomène sur les cultures mais plutôt à le reproduire pour en analyser les conséquences à grande échelle. Ils nécessitent des bases de données les plus exhaustives possibles avec un historique de grande ampleur. En effet, plus les bases de données seront complètes, plus il existera un panel de données représentatif des événements à simuler souhaités. La qualité des données et leurs limites doit faire l'objet d'un examen minutieux pour évaluer les limites du modèle. Les relations statistiques obtenues sur l'examen des données historiques permettent ensuite de réaliser des prédictions.

Ces modèles ont l'avantage de nécessiter un faible temps de calcul et une demande de variables d'entrées réduite. Ils ont l'inconvénient de négliger de nombreux paramètres et ne sont pas adaptés pour aider les agriculteurs dans leur conduite culturale. En pratique, les modèles statistiques sont très utilisés aujourd'hui pour étudier l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles. Il existe plusieurs approches pour simuler le climat : il peut s'agir d'utiliser une combinaison de variables climatiques (températures, précipitations, etc.), de construire un indice agro-climatique représentatif des événements climatiques que l'on souhaite modéliser, ou encore d'utiliser des indices satellitaires pour représenter l'effet du climat sur l'agriculture. Pour ces modèles, il a été prouvé que l'augmentation du nombre de paramètres d'entrée dégrade les résultats du modèle (Ben-Ari et al. 2016).

Pour répondre à la question de thèse, les modèles statistiques sont les plus appropriés. En effet, ce travail de recherche est réalisé sur un vaste territoire (France métropolitaine) et l'objectif est de pouvoir adapter la méthodologie établie à différents types de cultures et différentes localisations géographiques (différents pays, différentes échelles spatiales). De plus, ce travail ne cherche pas à répondre à la question « Comment le climat impacte les rendements des cultures » mais s'intéresse à chiffrer cet impact en termes de pertes de récoltes. Enfin, les modèles statistiques répondent à l'objectif de cette étude, soit l'analyse de l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes à horizon futur. L'approche indicielle et satellitaire sont présentées dans les paragraphes suivants.

1.2.3 Les indices satellitaires pour représenter le climat

Il existe de nombreuses méthodes qui permettent de caractériser l'évolution du climat dans le temps. La télédétection est une « technique d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre, principalement fondée sur l'analyse d'images obtenues dans différentes gammes de longueur d'ondes à partir d'aéronefs ou de satellites »¹⁴. Les données obtenues par la télédétection sont enregistrées à partir de satellites, c'est pourquoi on parle d'indices de végétation satellitaires. Ces indices sont souvent utilisés pour surveiller la croissance de la végétation et évaluer l'utilisation des terres (Gao et al. 2013;

¹⁴ Définition du Larousse de la langue française.

Friedl et al. 1994; Wei 2010). L'analyse est basée sur l'absorption de longueurs d'onde de la lumière solaire. La chlorophylle, pigment contenu dans les cellules des plantes absorbe les longueurs d'ondes bleues et rouges, la longueur d'onde verte étant réfléchi. Le proche-infrarouge est réfléchi par la structure interne de la feuille. Celui-ci traverse l'épiderme de la feuille et lorsqu'il atteint le mésophylle il est dispersé vers le haut (rayonnement réfléchi) et vers le bas (rayonnement transmis). Le comportement des rayonnements du proche-infrarouge dépend aussi de l'indice de surface foliaire (LAI), de la turgescence cellulaire, de la quantité d'air et d'eau que contiennent les feuilles. Les cultures en bonne santé vont donc montrer de fortes valeurs de réflectivité dans le proche infra-rouge alors qu'au contraire, pour les cultures en mauvaise santé liée par exemple à un déficit hydrique, la réflectivité du proche-infrarouge sera moins importante.

Plusieurs indices de végétation existent pour mesurer le développement de la plante grâce à ses propriétés de réflectivité. Par exemple, le NDVI (Normal Difference Vegetation Index) met en valeur la bande visible du rouge et celle de l'infrarouge. Plusieurs études ont montré que les valeurs du NDVI sont corrélées aux rendements des cultures (Doraiswamy et Cook 1995; Doraiswamy et al. 2003; Groten 1993). D'autres approches utilisent des modèles de transfert radiatif pour le couvert végétal, comme le fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation).

Le rendement des prairies est lié à la surface des feuilles et une bonne corrélation est observée entre les valeurs des indices satellitaires et les rendements. Cependant, la corrélation est moins évidente pour les céréales en raison notamment des pratiques de prévention telles que l'irrigation qui ne sont pas intégrées dans les modèles et conduisent à des faux négatifs (Jakubauskas, Legates, et Kastens 2002; Moriondo, Maselli, et Bindi 2007). Aujourd'hui dans l'assurance multirisques climatique en France, l'indice de production prairies (IPP) est utilisé pour estimer les variations de productions fourragère en cas d'événement climatique (Roumiguié et al. 2015). Cet indice développé par AIRBUS utilise à la fois une variable issue de données satellitaires décrivant l'état du couvert végétal (le fCover) et des données météorologiques (température et stress hydrique) (Roumiguié et al. 2017).

Les indices satellitaires permettent d'estimer les rendements des cultures en se basant sur les propriétés de réflectivité des longueurs d'ondes de la plante. Ils sont plus adaptés pour estimer les rendements pour les prairies que pour les cultures céréalières et ne sont pas projetables dans le futur en intégrant le changement climatique car ils ne possèdent pas les données climatiques simulées selon les modèles de projection. C'est pourquoi, ces indices ne sont pas utilisés dans ce travail de thèse.

1.2.4 Les indices agro-climatiques pour représenter le climat

Une large littérature existe sur l'analyse de la corrélation entre les indices climatiques, la caractérisation des aléas climatiques et l'impact sur l'agriculture. Les indices les plus utilisés ont l'avantage d'être simples à calculer (peu de données d'entrées nécessaires) et conformes à des contextes géographiques très différents (c'est-à-dire facilement transposables d'un milieu à l'autre). (Sivakumar et al. 2010) recense l'ensemble des indices caractérisant les sécheresses agricoles utilisés et adaptés notamment au contexte climatique européen. L'indice de sécheresse est défini comme un indice lié à certains des effets cumulatifs d'un manque d'humidité prolongé et anormal. D'autres auteurs ont recensé les indices existants en les classant selon l'aléa étudié, la localisation géographique et les méthodes de calcul utilisées pour représenter l'impact sur l'agriculture (Abdi et al. 2022). Les auteurs soulignent également qu'il n'existe pas un indice universel mais que le choix de l'indice dépend des caractéristiques du milieu étudié et des objectifs de l'étude (travail sur les extrêmes, type de culture étudiée, échelle de calcul souhaitée, etc.). La complexité des indices dépend du nombre de paramètres pris en compte pour les calculer et ainsi une grande diversité d'indices existe. L'OMM souligne qu'un paramètre important pour caractériser une sécheresse agricole est l'évapotranspiration et que l'équation de Penman-Monteith fournit des résultats plus précis (Sivakumar et al. 2010). La suite des paragraphes présente les indices les plus utilisés.

PDSI (Palmer Drought Severity Index)

Cet indice a été développé par (Palmer 1965) et est basé sur le bilan hydrique du sol. Il mesure l'humidité avec des valeurs positives et la sécheresse avec des valeurs négatives mais est très influencé par la période de calibration et son utilisation est limitée dans les zones utilisées pour le calibrage (Karl 1983; 1986; Alley 1984; Guttman 1998). Ces limites ont en partie été résolues par le développement de la version standardisée de l'indice : sc-PDSI (Wells, Goddard, et Hayes 2004). Néanmoins, les valeurs de l'indice restent difficilement comparables dans des localités où les climats sont très différents. Son équation est donnée ci-après.

$$PDSI(i) = 0,897 PDSI(i - 1) + \frac{Z(i)}{3}$$

Où (i) représente le mois et $Z(i)$ est l'anomalie d'humidité calculée selon l'équation suivante :

$$Z(i) = K_i \times \left(P - \left(\frac{\overline{ET}_i}{\overline{PE}_i} \times PE + \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i} \times PR + \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i} \times PRO - \frac{\overline{L}_i}{\overline{PL}_i} \times PL \right) \right)$$

Où K_i est le facteur de pondération pour le mois i pour ajuster les différentes zones sur lesquelles sont calculées l'indice de façon à ce qu'elles soient comparables, P sont les précipitations, ET l'évapotranspiration, PE l'évapotranspiration potentielle, R la recharge en eau du sol, PR la recharge

potentielle en eau du sol, RO le ruissellement, PRO le ruissellement potentiel, L la perte en eau du sol, PL la perte potentielle d'eau du sol.

Plusieurs études ont été réalisées en Chine, aux Etats-Unis, en Europe comparant les indices SPEI, PDSI, SPI pour la détection de sécheresses agricoles (Liu et al. 2016; Tian, Yuan, et Quiring 2018). Les meilleures corrélations sont obtenues avec le SPEI (indice présenté dans les paragraphes suivants). En effet, d'après une étude réalisée dans 4 pays du Centre-Sud des Etats-Unis étudiant la corrélation entre les rendements du blé tendre d'hiver et ces indices, la plus mauvaise relation est obtenue avec le PDSI car le pas de temps sur lequel il est calculé n'est pas approprié pour représenter l'influence du climat sur les rendements (Tian, Yuan, et Quiring 2018). De plus, au Canada, une étude a été réalisée pour étudier la corrélation entre les pertes sur les prairies liées à des sécheresses et certains indices agro-climatiques (PDSI, SPI, Z et NDI). Les résultats indiquent que les coefficients de détermination restent très faibles avec tous les indices ($\leq 0,47$) (Quiring et Papakryiakou 2003).

SPI (Standardized Precipitation Index) et EDI (Effective Drought Index)

SPI a été développé par (McKee, Doesken, et Kleist 1993) et est calculé selon une approche probabiliste, soit la probabilité de survenance de précipitations. Cet indice est très utilisé pour réaliser le suivi des sécheresses météorologiques au niveau international (Etats-Unis¹⁵ et Europe du Sud-Est¹⁶). L'équation de l'indice est la suivante :

$$SPI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 - d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

avec $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$ si $P \leq 0,5$ et si $P > 0,5$ P est remplacé par $(1-P)$

Où P est la probabilité de dépasser un seuil de précipitation. Les variables $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ sont des constantes.

L'indice EDI est utilisé pour déterminer la période exacte (début et fin) de la sécheresse ainsi que sa durée à partir de données quotidiennes. C'est également un indice de précipitation, mais contrairement au SPI il utilise uniquement des données empiriques. Son équation est donnée ci-après.

$$EDI = \frac{EP - \overline{EP}}{DS(EP - \overline{EP})}$$

Où DS est la déviation standard et $EP = \sum_{n=1}^i \left[\frac{\sum_{m=1}^n P_m}{n} \right]$ où i représente le nombre de jours représentant la durée de la sécheresse et P_m la précipitation du jour m .

¹⁵ US Drought Monitor: www.drought.unl.edu/dm/

¹⁶ Drought Management Center for Southeastern Europe: <http://www.dmcsee.org/>

Ces deux indices sont calculés en prenant en compte uniquement des données de précipitations. Ainsi, SPI et EDI ne prennent pas en compte des variables telles que la température, l'évapotranspiration ou l'humidité du sol qui sont importants pour caractériser des sécheresses agricoles (Mathieu et Aires 2018; Lobell et al. 2013; Iizumi et Ramankutty 2016; Teixeira et al. 2013). En effet, des études ont montré que la variable de précipitations seule n'est pas suffisante pour étudier l'impact de la sécheresse sur les rendements des cultures (Beguería et al. 2014; Ayanlade et al. 2018; Rebetez et al. 2006; Potop, Možný, et Soukup 2012). Par exemple, la sécheresse de 2003 a enregistré des températures extrêmes en France et en Europe qui ont provoqué l'augmentation des taux d'évapotranspiration (Rebetez et al. 2006) causant ainsi des pertes de récoltes importantes. De plus, ce type d'indice est largement utilisé dans les zones arides où son efficacité pour identifier les événements de sécheresse a été prouvée (Ayanlade et al. 2018) mais elle semble insuffisante pour d'autres types de climat.

RDI (Reconnaissance Drought Index)

Cet indice est développé par (Tsakiris et Vangelis 2005) et est basé sur le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration pour différentes échelles de temps. Cet indice a l'inconvénient qu'il exclut les valeurs nulles d'ETP, du fait de sa méthode de calcul, conduisant ainsi à des données incomplètes dans le temps. Son équation est donnée ci-après :

$$RDI_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{i,j}}{\sum_{j=1}^k ETP_{i,j}}$$

Où $RDI_{i,k}$ est la valeur de RDI calculée pour la i ème année sur une base temporelle de k -mois consécutifs, $P_{i,j}$ et $ETP_{i,j}$ sont respectivement les précipitations et l'évapotranspiration du j ème mois sur la i ème année.

SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

Cet indice est développé par (S. Vicente-Serrano, Beguería, et Lopez-Moreno 2010) et est basé sur la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration de référence (ET_0). Les valeurs de l'indice sont ajustées pour sa normalisation selon une loi de distribution de probabilité log-normale. L'équation de l'indice est donnée ci-après.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 - d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

Avec $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$ si $P \leq 0,5$ et si $P > 0,5$ P est remplacé par $(1-P)$

Où P est la probabilité de dépasser D_i avec $D_i = P_i - ETP_i$ et i représente le mois. Les variables $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ sont des constantes.

L'indice s'applique à tous types de climats et est fortement utilisé pour prédire les événements climatiques. Son pas de temps est mensuel. Une étude explorant la relation entre les rendements agricoles des cultures maraîchères et les valeurs de l'indice SPEI a été réalisée dans le bassin d'Elbeland (République Tchèque) (Potop, Možný, et Soukup 2012). Les résultats montrent une bonne corrélation avec les rendements de ces cultures. Plusieurs améliorations de l'indice ont été proposées mais elles n'ont pas été testées pour estimer les rendements agricoles. En particulier, l'utilisation de l'équation mathématiques de Thornwaite pour calculer l' ET_0 est discutée car elle conduit à une surestimation de ce paramètre avec l'augmentation de la température de l'air, ce qui pose des problèmes pour prédire les épisodes de sécheresses dans le futur en utilisant l'indice (Donohue, McVicar, et Roderick 2010). De plus, la méthode de calcul de l'indice peut générer des erreurs en raison de l'estimation des paramètres de la loi log-normale. En effet, la normalisation de l'indice utilisant une loi paramétrique suppose plusieurs hypothèses difficiles à vérifier dans le contexte du changement climatique (où les données extrêmes sont inconnues). Une étude menée en Iran compare l'efficacité des indices RDI, SPEI et EDI dans la détection des épisodes de sécheresse et montre le rôle déterminant de SPEI pour détecter et caractériser les sécheresses extrêmes (Banimahd et Khalili 2013). Enfin, le pas de temps mensuel pourrait être insuffisant pour caractériser certaines sécheresses particulièrement courtes dans le temps mais qui surviennent à des périodes clés du cycle de développement des cultures (X. Zhang et al. 2021).

SPEI est aujourd'hui l'indice le plus utilisé pour analyser les conséquences des sécheresses sur les productions végétales.

ARID (Agricultural Reference Index for Drought) and FU

Cet indice a été élaboré aux Etats-Unis et allie le calcul du stress hydrique avec des modèles de croissance des plantes (comme le modèle CERES-Maïze) (Woli et al. 2012). Son pas de temps est journalier. Son équation est donnée ci-après.

$$ARID_i = 1 - \frac{T_i}{ET0_i}$$

Avec i le jour, T_i la transpiration journalière, et $ET0_i$ l'Evapotranspiration de référence journalière.

L'indice FU développé par (Fu 1981) et décrit dans (L. Zhang et al. 2008) suppose que le bilan hydrique d'équilibre est contrôlé par la disponibilité en eau et la demande atmosphérique sur une période de temps donné. Il utilise en donnée d'entrée les précipitations et l'évapotranspiration de référence.

Une étude réalisée en France et en Espagne compare l'efficacité des indices ARID, FU, TU ainsi que des variables météorologiques (Températures maximales mensuelles, précipitations, etc.) à prédire les faibles rendements agricoles pour le blé et le maïs non irrigué sur la période 1976-2013. Les résultats permettent de classer les indices en fonction d'un score quantifiant leur capacité à détecter des événements extrêmes (Ben-Ari et al. 2016). Les résultats indiquent qu'il n'existe pas a priori un indice

qui soit meilleur qu'un autre sur toutes les régions étudiées et adaptés à des climats différents. Par exemple, l'indice FU moyenné sur la période végétative du blé semble performant en Espagne et beaucoup moins en France. Une autre étude menée aux Etats-Unis pour prédire les rendements du maïs à partir de données météorologiques, indique que les deux meilleurs indicateurs semblent être la température et le SPEI calculé au mois de juillet. Par ailleurs, cette étude montre que l'utilisation d'indices agro-climatiques, combinant plusieurs paramètres météorologiques peut améliorer significativement la modélisation du rendement des cultures par rapport à l'utilisation de paramètres climatiques simples (Mathieu et Aires 2018).

SSWI (Standardized Soil Water Index)

Cet indice climatique est développé par Météo-France et mesure la teneur en eau du sol normalisé allant de 0 (teneur en eau au point de flétrissement) à 1 (teneur en eau à la capacité au champ). Le SSWI est spécifiquement développé pour représenter et évaluer les sécheresses agricoles en France (J.-M. Soubeyrou et al. 2012). Il est issu du SWI (Soil Water Index) qui mesure la variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol avec le modèle hydrologique Isba. Son équation est donnée ci-après. Le SWI est moyenné sur n mois ($1 \leq n \leq 24$) ce qui permet de considérer des déficits hydriques du sol sur des périodes différentes. Cette variable est ensuite projetée selon une distribution normale centrée réduite pour chaque mois de l'année pour obtenir le SSWI. Le SSWI est calculé sur la maille de la grille de ré-analyse SAFRAN (8kmx8km) sur toute la France métropolitaine et le calage des distributions statistiques est réalisé maille par maille en utilisant la méthodologie d'estimateurs de noyaux gaussiens (J. M. Soubeyrou et al. 2011).

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}}$$

Où w représente la teneur en eau du sol, w_{wilt} la teneur en eau au point de flétrissement et w_{fc} la teneur en eau à la capacité au champ.

De nombreux indices ont été développés pour représenter l'aléa de sécheresse et ses conséquences sur l'agriculture. Il n'existe pas a priori un indice qui soit meilleur qu'un autre. Les performances des indices et le choix de l'utilisation d'un indice plutôt qu'un autre dépendent de la localisation géographique de l'étude, des cultures agricoles, du type d'étude réalisé (tendances de rendement, études sur les événements extrêmes, projections climatiques).

I.3 Contraintes du projet et analyse comparative des indices

La première partie de ce chapitre a mis en évidence l'eau comme facteur limitant du développement des cultures. Il a également été montré que l'eau est absorbée au niveau des racines et rejetée au niveau des feuilles par évapotranspiration. Ainsi, pour mesurer le bilan hydrique dans une plante il est important de prendre en compte la différence entre la quantité d'eau absorbée et celle rejetée. Calculer le bilan hydrique d'une plante revient alors à effectuer la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration. Ces deux paramètres météorologiques sont nécessaires à cette étude.

Dans le cadre de ce travail, pour répondre à la question de thèse, il est nécessaire de créer un modèle qui répond aux quatre critères suivants :

- Adapté à l'agriculture française. En effet, il est nécessaire que les paramètres climatiques calculés soient cohérents avec les cultures étudiées.
- Adapté aux projections climatiques avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Les données utilisées pour calculer l'indice climatique doivent être en sortie du modèle ARPEGE-Climat, soit purement météorologiques.
- Simple à calculer. La demande de CCR est de créer un modèle opérationnel, avec un indice dont les paramètres utilisent des données météorologiques gratuites sur un vaste territoire. En effet, le périmètre de la thèse est la France métropolitaine mais la méthodologie appliquée doit être reproductible sur d'autres pays.
- Être universel, c'est-à-dire pouvoir représenter les différents climats en France, les événements de sécheresse et d'excès d'eau et également être corrélé aux pertes de rendements de toutes les différentes cultures françaises. Ainsi, un modèle spécifique à une culture comme certains modèles existants ne sera pas adéquat.

Il est important de noter que les deux premiers critères (adapté à l'agriculture française et au modèle ARPEGE-Climat de Météo-France) sont définis par le périmètre de ce travail. Les deux autres critères (simplicité et universalité de l'indice) répondent à des demandes opérationnelles du fait du contexte de la création de cette thèse (travail financé par la société de réassurance publique CCR). De plus, au-delà de ces quatre critères qui conditionnent la façon de calculer l'indice, il est souhaitable que l'indice ait une réalité physique, c'est-à-dire que les valeurs de l'indice représentent l'aléa étudié.

Un classement de l'ensemble des indices existants (indices satellitaires et indices agro-climatiques) a été réalisé à partir de ces quatre critères. Ceux-ci sont étudiés suivants des modalités présentées dans le Tableau 1. L'indice obtient un score de 0 s'il ne respecte pas la modalité, et 1 dans le cas contraire. Par exemple, un indice avec beaucoup de paramètres d'entrée aura un score de 0 sur la modalité « faible nombre de paramètres » mais s'il est construit avec seulement 2 paramètres, il aura un score de 1. Les

modalités sont ensuite regroupées selon les 4 conditions explicitées ci-dessus et pour chacune d'elles, il est calculé une note correspondant à la moyenne des scores obtenus dans les modalités.

Tableau 1. Définition des modalités pour le classement des indices agro-climatiques et satellitaires dans la littérature

Critères	Universalité		Adapté à l'agriculture française et aux données de rendement			Projetable selon ARPEGE-Climat	Simplicité de calcul	
	Toutes cultures	Multi-périels	Adapté à l'agriculture	Développé pour la France	Utilisable sur grande échelle avec une approche départementale	Données d'entrée en sortie du modèle ARPEGE-Climat	Faible nombre de paramètres	Facile à calculer

Les résultats pour tous les indices sont présentés en Figure 9 par critère. Chaque indice étudié est noté sur le tour du cercle. Quand un indice a un score maximal (égal à 1) dans un critère, le trait qui représente le score est égal au rayon du cercle. Dans le cas contraire, il est inférieur au rayon.

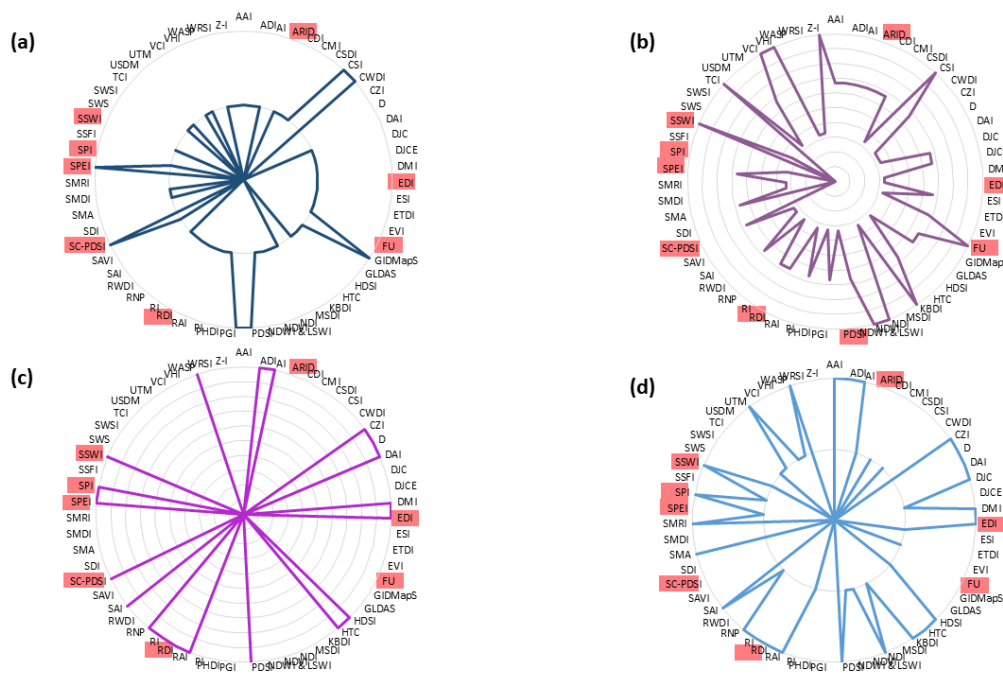


Figure 9. Classement des indices satellitaires et agro-climatiques selon les 4 conditions de ce travail de thèse : (a) Universalité (b) Adapté à l'agriculture française et aux données de rendement (c) Adapté aux projections climatiques selon le modèle ARPEGE-Climat, (d) Simplicité de calcul. En rouge les indices qui ont été spécifiquement étudiés dans les paragraphes précédents.

D'après cette figure, aucun des indices étudiés ne satisfait exactement les 4 conditions. Cependant, certains indices semblent être plus performants que d'autres comme le SSWI et le SPEI qui satisfont presque toutes les conditions. Cependant, nous avons vu que le SPEI n'est pas adapté aux projections

climatiques du fait de sa méthode de calcul et le SSWI est adapté pour la France métropolitaine mais son calcul sur d'autres pays est plus difficile, en particulier sur des projections futures (du fait d'un manque de précision dans les données) et ne répond donc pas à la commande de la CCR.

De plus, certains critères ont un caractère éliminatoire. Par exemple, si un indice représente bien les sécheresses extrêmes et est adapté à certaines cultures étudiées (les céréales mais non les prairies) il pourrait être utilisé dans ce travail de recherche si on le combine à d'autres indices qui complètent le périmètre de travail (excès d'eau et prairies). En revanche, un indice qui n'est pas projetable selon le modèle ARPEGE-Climat n'est pas utilisable car il ne permet pas de répondre à la problématique de la thèse.

L'analyse et la recherche des indices agro-climatiques existants a conduit à l'élaboration d'un nouvel indice climatique, adapté à la France métropolitaine pour les trois cultures étudiées et caractérisant les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau. Cet indice utilise en données d'entrées uniquement des variables qui sont en sorties du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. De plus, ces variables météorologiques peuvent être obtenues gratuitement sur d'autres territoires. Il est fortement inspiré du SPEI mais propose une méthodologie de calcul plus simple.

II METHODOLOGIE

La Figure 10 présente la méthodologie générale appliquée dans ce chapitre de thèse. Elle consiste en :

- L'élaboration d'un module d'aléa sur l'historique, soit la conception d'un nouvel indice climatique ;
- Un module sur les productions végétales soit le calcul des pertes de récoltes par culture ;
- Un calibrage du modèle : l'élaboration de la relation entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice ;
- Enfin, la simulation des pertes de récoltes à partir des valeurs de l'indice.

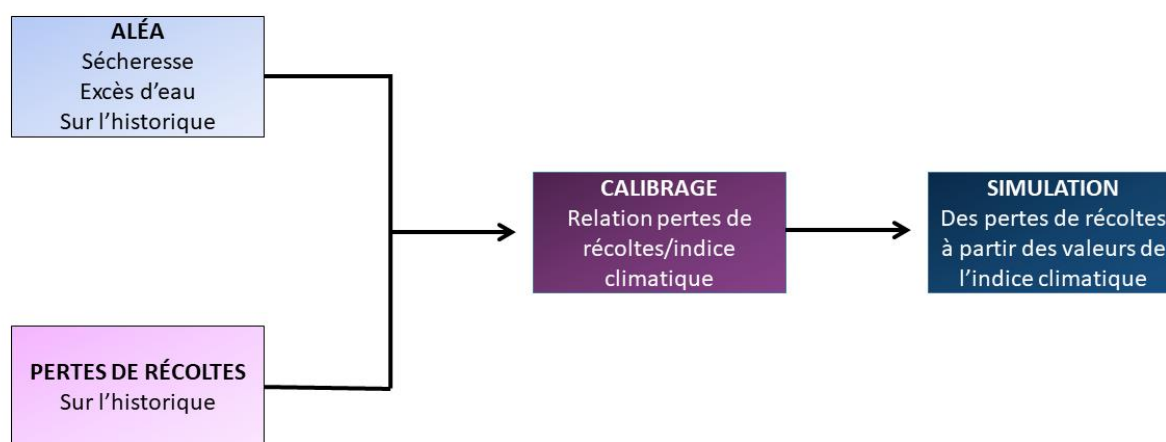


Figure 10. Méthodologie générale du développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes dues aux aléas climatiques de sécheresse et d'excès d'eau

Les paragraphes suivants décrivent chacun de ces modules.

II.1 Conception d'un indice agro-climatique

L'indice créé est appelé « Drought and Overwhelmed Key Indicator » ou *DOWKI*. Il est basé sur l'anomalie du bilan hydrique cumulée décadaire¹⁷ (calculé avec les données de précipitations et évapotranspiration potentielle). Une seule valeur de l'indice est retenue par an pour pouvoir être comparée aux données de pertes de récoltes annuelles. La période sur laquelle est calculée la valeur annuelle de l'indice est déterminée par un plan d'expérience, pour chaque culture séparément, afin de prendre en compte la période de vulnérabilité de chacune d'elle.

¹⁷ Décadaire : 10 jours consécutifs. Il y a 36 décades dans une année

II.1.1 Les données météorologiques

Les données aux stations météorologiques

Les données météorologiques utilisées pour calculer l'indice sont les données décennales de précipitation (P) et évapotranspiration potentielle (ETP) mesurées sur les stations météorologiques de type 0 et 1 de Météo-France, c'est-à-dire des stations qui effectuent des observations quotidiennes régulières par du personnel spécialisé (type 0) et non spécialisé (type 1). Ce sont 79 stations de type 0 ou 1 qui ont été choisies sur la France métropolitaine, en considérant une station par département. La profondeur historique est la période 1989-2018 qui correspond à l'historique des données sur les rendements agricoles.

Le calcul de l'indice sur les stations météorologiques est intégré dans une première version du modèle agro-climatique mais celle-ci sera optimisée par la suite en utilisant la grille de ré-analyse SAFRAN qui possède la même échelle spatiale que les sorties désagrégées du modèle ARPEGE-Climat.

Les données de ré-analyse SAFRAN

Le système SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) été développé à l'origine pour la prévision d'avalanches dans les Alpes (Y. Durand et al. 2009). Il a ensuite été étendu à l'ensemble du territoire français afin d'alimenter les modèles sol-plante-atmosphère (Le Moigne 2002). Le modèle SAFRAN permet de reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiques homogènes (zones dont la surface est inférieure à 1000km² où les gradients climatiques horizontaux comme les précipitations sont faibles), en utilisant des données d'observations du sol et des paramètres de modèles de circulation générale à grande échelle. Les profils sont ensuite projetés sur une grille de 8kmx8km sur la France. Le développement sur tout le territoire français a fait l'objet d'une validation, en particulier pour les variables suivantes : température et humidité de l'air, vitesse du vent, précipitations, rayonnement (Quintana-Seguí et al. 2008). SAFRAN utilise une méthode d'interpolation optimale pour analyser la majorité des variables. Pour chaque zone climatique, le modèle estime une valeur de chaque variable à plusieurs niveaux d'altitude. Un contrôle de la qualité des données est réalisé en comparant les valeurs des données au lieu d'observation. Les zones climatiques sont identiques à celles utilisées par Météo-France pour produire des prévisions météorologiques automatiques. Les zones sont déterminées par les experts localement et sont homogènes météorologiquement. Elles sont au nombre de 612. Les variables (température, humidité, vitesse du vent, précipitations, rayonnement) sont calculées toutes les 6h. Toutes les valeurs analysées sont interpolées au pas de temps horaire.

SAFRAN permet d'obtenir des données de précipitations et d'évapotranspiration de manière homogène sur la France et constitue aujourd'hui une base de référence pour étudier les variables climatiques sur une grille de 8 km par 8 km sur le territoire métropolitain. Une étude a été menée pour

valider les données climatiques de SAFRAN en comparant les données issues des stations météorologiques de Météo-France et des données issues de SAFRAN sur la période 2004-2005 sur le territoire métropolitain (Quintana-Seguí et al. 2008). SAFRAN sous-estime les pluies cumulées sur des périodes courtes (1h, 3h) par rapport à des données issues de pluviomètres. Sur un pas de temps journalier, la comparaison entre les données issues des stations et les données sur la grille de ré-analyse SAFRAN montre très peu d'écarts : le RSME est de l'ordre de 1 mm/jour sauf pour les zones de montagnes où il est de 3mm/jour. L'analyse de la fréquence des précipitations journalières en fonction de différentes classes de précipitations (mm) montre que SAFRAN sous-estime l'occurrence d'absence de précipitations (écart relatif de 12%) et surestime les jours de précipitations entre 0 et 5mm (écart relatif de 14%) (Quintana-Seguí et al. 2008). Ainsi ces deux erreurs se compensent. Pour les précipitations fortes (>20 mm/jour), SAFRAN sous-estime leur occurrence. L'ETP étant calculé par rapport à la température de l'air, il est nécessaire de regarder également cette variable. Le RMSE est de 1.5°C pour des données de températures moyennes mensuelles, ce qui valide les données de température de SAFRAN (Quintana-Seguí et al. 2008). Cependant, on note que le biais est plus important pour des données horaires de températures moyennes. L'erreur est plus élevée en région Méditerranéenne (surestimation de la température avec un RMSE de 2°C). Les erreurs observées sur les variables de précipitation et de températures sont faibles, et montrent la robustesse de ce système.

Les données de précipitation et évapotranspiration potentielle ont été obtenues grâce à la direction des Services Météorologiques de Météo-France sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période 1989-2018. Celle-ci a comme échelle spatiale une grille quadrillée dont l'aire des carrés est égale à 64 km².

II.1.2 La méthode de calcul du DOWKI

Pour rappel, le *DOWKI* est l'indice conçu dans cette thèse.

L'équation mathématiques

Le calcul de l'indice commence par celui du bilan hydrique :

$$ER_{i,n} = P_{i,n} - ETP_{i,n}$$

Où $ER_{i,n}$ représente la pluie efficace (*Efficient Rain*) de la i -ème décade de l'année n , $P_{i,n}$ et $ETP_{i,n}$ sont respectivement la précipitation et l'évapotranspiration potentielle de la i -ème décade de l'année n . Les valeurs de i sont donc comprises entre 1 (première décade correspondant au 10 premiers jours du mois de janvier) et 36 (dernière décade correspondant au 10 derniers jours du mois de décembre). L'équation est calculée sur les 36 décades de l'année. Cette première équation a été adaptée de l'indice climatique *SPEI*.

L'équation suivante est utilisée pour normaliser l'indice en calculant l'anomalie de la façon suivante :

$$ERN_{i,n} = ER_{i,n} - \overline{ER}_i$$

\overline{ER}_i est la moyenne des valeurs de ER_i pour chaque décennie i sur l'historique entier. Ici, il est nécessaire de retenir que l'anomalie calculée est décennale. On compare donc la valeur de l'indice d'une décennie de l'année n à l'ensemble des valeurs de l'indice de la même décennie de chaque année de l'historique (1989-2018). Ce choix, permet de prendre en compte l'effet du climat sur une courte durée. En effet, il a été prouvé que seuls quelques jours consécutifs de sécheresse extrême suffisent pour que les cultures subissent une diminution de rendement (Otkin et al. 2018; 2013; 2016; Hunt et al. 2014). Le calcul d'une anomalie à la décennie permet justement de prendre en compte ce type d'épisodes de courte durée. Par ailleurs, la décennie, contrairement aux données journalières, permet d'éliminer les événements qui n'entraînent pas de pertes de récoltes car ils sont très rapides dans le temps alors qu'ils entraînent des excès de précipitations comme les crues éclair.

Une fois le calcul de l'anomalie établi, il est possible de créer un indice cumulatif sur chaque décennie selon l'équation suivante :

$$ERN_{C_{i,n}} = \sum_{j=1}^{j=i} ERN_{j,n}$$

Dans cette équation, la valeur initiale $ERN_{1,n}$ de l'année n est égale à 0. Cette dernière indication signifie que la valeur de l'indice est réinitialisée chaque année. Cette première approche constitue un biais puisqu'elle ne prend pas en compte l'année passée lorsque l'on simule la valeur de l'indice sur une période continue. Une étude complémentaire a été réalisée en ne réinitialisant pas les valeurs de l'indice à 0 chaque année. Il en résulte une diminution progressive des valeurs de l'indice. Elle traduit un assèchement général cohérent avec l'état de l'art (Brisson et Levraut 2010; IPCC 2014). Or, nous avons besoin de caractériser chaque événement extrême sur l'historique de manière indépendante pour pouvoir étudier sa fréquence et son intensité dans le climat futur. C'est pourquoi la méthode de réinitialisation de l'indice chaque année a été retenue.

La Figure 11 présente le $ERN_{C_{i,n}}$ sur deux départements : le Cher (18) et la Haute-Garonne (31) sur l'historique.

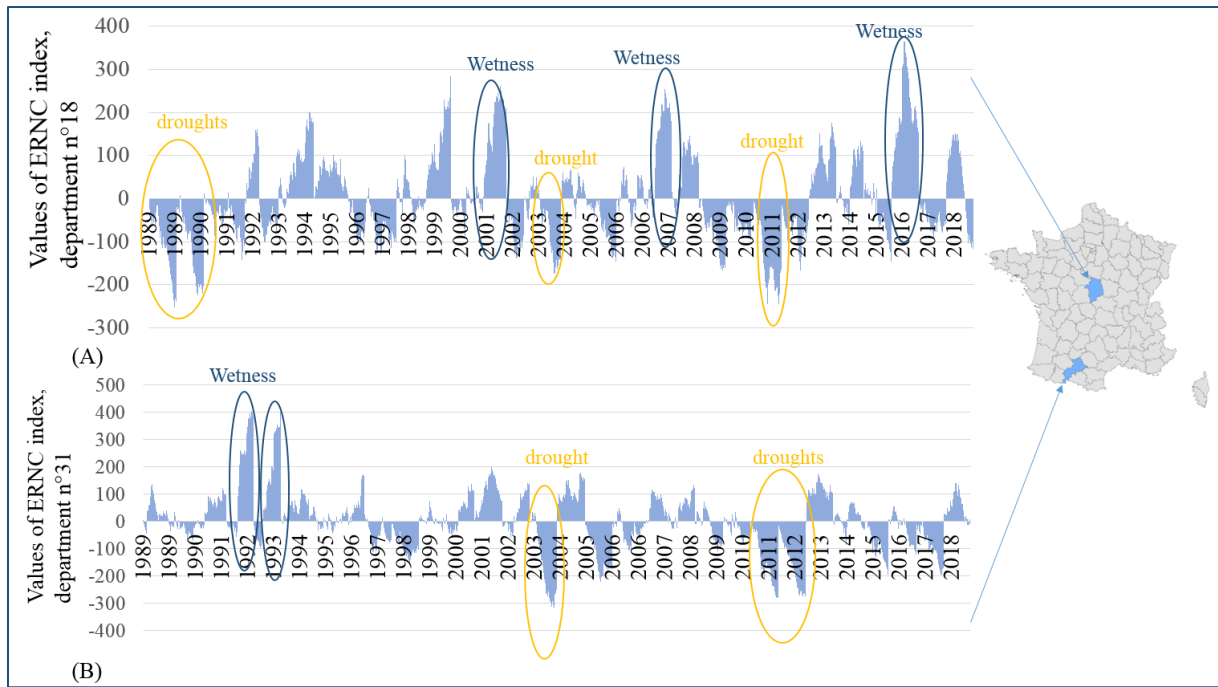


Figure 11. ERNC_{i,n} sur la période historique 1989-2018 pour les départements du Cher et de la Haute-Garonne (Kapsambelis, Moncoulon, et Cordier 2019b)

Les deux départements sont soumis à des climats différents. En effet, le Cher est situé dans la région Centre Val de Loire et est soumis à un climat océanique dégradé et la Haute-Garonne à un climat méditerranéen. La Figure 11 montre que l'ERNC_{i,n} capte bien les événements de sécheresses (valeurs négatives) et d'excès d'eau (valeurs positives) avec des valeurs extrêmes qui coïncident avec des événements extrêmes systémiques : sécheresses de 2003 et 2011, excès d'eau de 2016 dans la moitié Nord de la France, et des événements ayant un impact sur un territoire plus réduit : sécheresses de 1989-1990 dans le Nord, excès d'eau de 1992-1993 dans le Sud.

Pour obtenir une seule valeur de l'indice par an, celle-ci est calculée sur la période de vulnérabilité des cultures déterminée par un plan d'expérience (paragraphe II.3.3). Cette période est en adéquation avec le cycle de développement des cultures. Les valeurs annuelles de l'indice sont calculées selon l'équation ci-dessous. Le minimum des valeurs de l'indice correspond à un épisode de sécheresse et le maximum correspond à un épisode d'excès d'eau.

$$\begin{cases} \min ERNC_{i \rightarrow j, c, n} = DOWKI_{sech, c, n} \\ \max ERNC_{i \rightarrow j, c, n} = DOWKI_{exces, c, n} \end{cases}$$

Dans cette équation, i et j sont respectivement la première et la dernière décennie de la période de vulnérabilité de la culture c et n représente l'année sur laquelle est calculée le $DOWKI$.

Croisement de la grille de ré-analyse SAFRAN avec le Registre Parcellaire Graphique

Comme nous l'avons vu précédemment, l'indice peut être calculé à toute échelle de la station météorologique à la grille de ré-analyse. Intuitivement, et c'est illustré par la Figure 12, une ou plusieurs stations météorologiques ne représentent pas toute la variabilité spatiale du climat à l'échelle départementale.

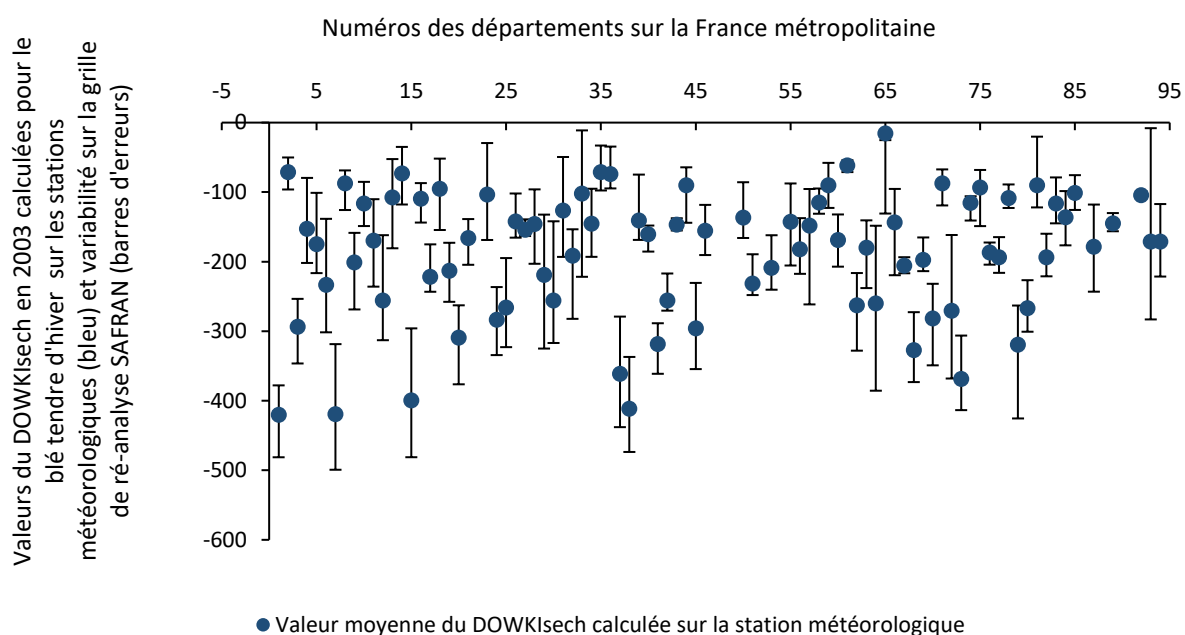


Figure 12. Comparaison des valeurs du $DOWKI_{sech}$ départementales calculées sur les stations météorologiques (points bleus) et sur la grille de ré-analyse SAFRAN (traits noirs) pour l'année 2003 sur la période de vulnérabilité des céréales à paille. Les barres représentent la distribution des valeurs du $DOWKI$ sur la grille SAFRAN, les limites correspondent aux quantiles 10-90.

D'après la Figure 12, la valeur de l'indice calculée sur la station n'est pas toujours située au centre de la distribution des valeurs de l'indice sur la grille SAFRAN, ce qui signifie qu'elle ne représente pas la moyenne de la distribution. L'écart relatif moyen sur tous les départements pour l'année 2003 est de 20% entre les valeurs moyennes du $DOWKI_{sech}$ départementales calculées selon les deux méthodes (stations/SAFRAN). On dénombre 20 départements qui enregistrent, un écart relatif en valeur absolue, supérieur à 30%. Ces départements concernent une partie de la région PACA, les départements des Pyrénées, du Jura, quelques départements du littoral atlantique. La variabilité des valeurs du $DOWKI_{sech}$ au sein d'un même département montre que le climat n'est pas homogène sur ce type de territoire.

Ceci est d'autant plus vrai, si l'on s'intéresse à des cultures, qui elles-mêmes n'occupent qu'une partie du territoire. Des méthodes de spatialisation statistiques (krigeage par exemple) permettent de générer des champs de valeurs spatialisées. L'utilisation des données SAFRAN permet de s'affranchir d'une spatialisation purement statistique car elles sont fournies sur une grille de 8kmx8km. Ces données

spatialisées doivent être croisées avec la localisation des parcelles agricoles pour une culture donnée afin de représenter le climat pour un type de production donnée.

Les données de localisation des parcelles agricoles proviennent du registre parcellaire graphique (RPG). Le traitement de ces données est très lourd en temps de calcul et ainsi, les petites parcelles (inférieures à 15 ha) sont écartées de l'étude. Le croisement des données météorologiques avec le registre parcellaire graphique est réalisé dans le logiciel de cartographie *ARCGIS*. Cette opération a nécessité une semaine de temps de calcul sur le logiciel *ARCGIS* pour obtenir les informations à l'échelle de la France métropolitaine : soit une grille de 8800 mailles.

La Figure 13a présente les valeurs de l'indice *DOWKI* en 2003 à l'échelle spatiale de 8kmx8km sur la France métropolitaine.

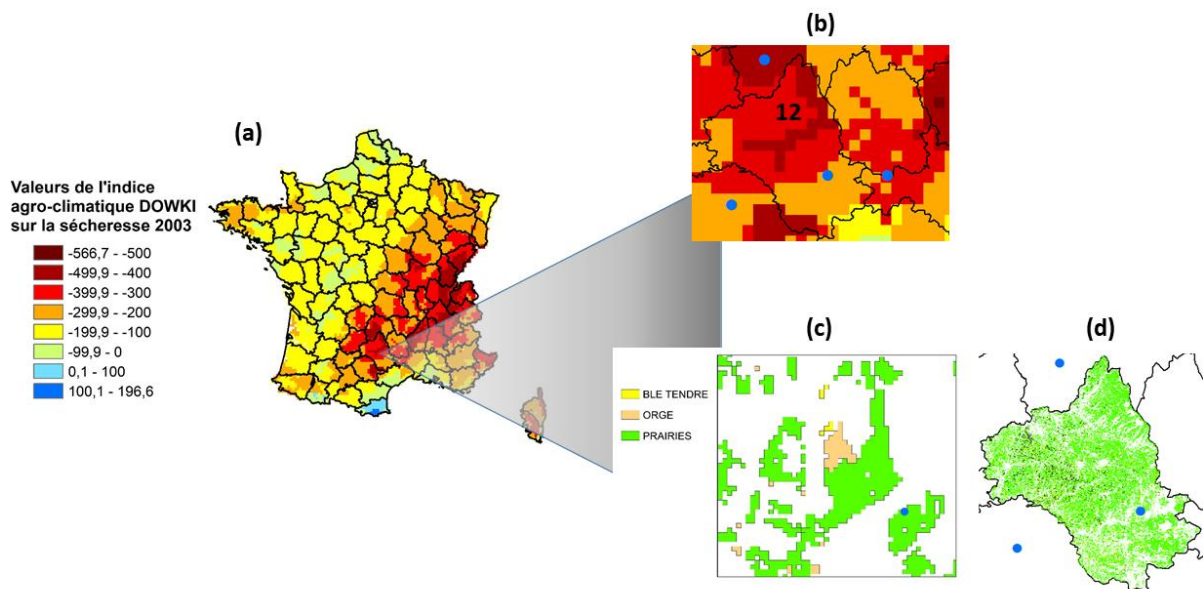


Figure 13. (a) Valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour l'année 2003 ; (b) zoom sur le département de l'Aveyron, le point bleu représente la localisation de la station météorologique ; (c) RPG zoomé sur la localisation de la station météorologique dans l'Aveyron ; (d) RPG de l'Aveyron

D'autre part, la Figure 13b présente un zoom sur le département de l'Aveyron, et il est observé que la station météorologique n'est pas située dans la zone de sécheresse extrême. Sur ce département, pour l'année 2003, le $DOWKI_{sech}$ calculé sur la station à une valeur de -260mm. La moyenne des valeurs du $DOWKI_{sech}$ sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour ce département est de -347mm. Le changement d'échelle permet donc d'être plus précis sur la mesure de l'intensité de l'aléa climatique.

Sur ce même département, il est possible d'observer la localisation des différentes parcelles agricoles. Les prairies sont situées sur tout le département alors que les cultures céréalières ne sont localisées que dans un endroit précis qui n'est pas situé sur la station météorologique (Figure 13c et Figure 13d). Cette

analyse montre l'importance de disposer de la localisation des parcelles agricoles pour mesurer de manière précise l'exposition au risque des cultures.

La Distribution empirique du DOWKI

Les valeurs du $DOWKI_{sech}$ suivent une distribution normale selon la Figure 14a.

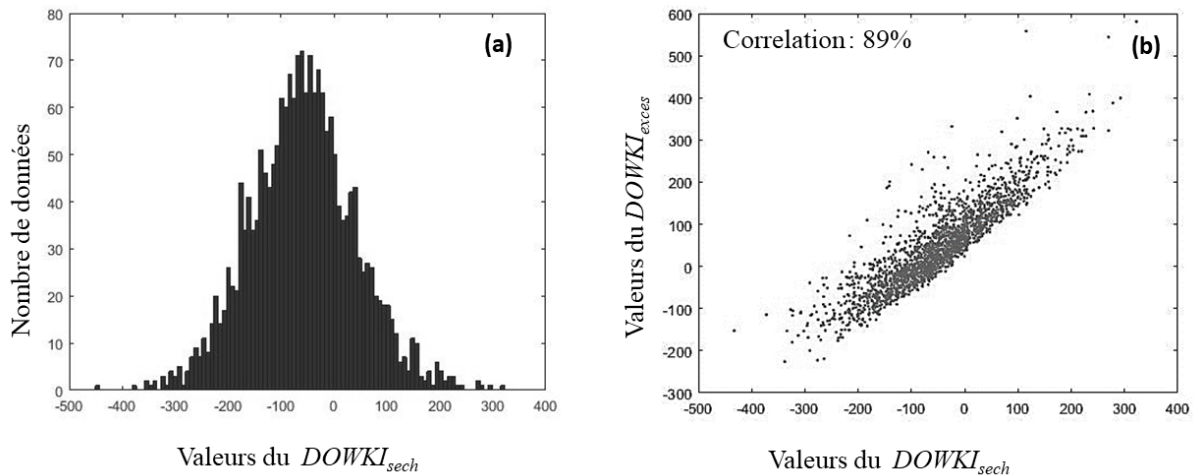


Figure 14. (a) Distribution des valeurs empiriques du $DOWKI_{sech}$ calculées sur la période 1989-2018 ; (b) Calcul de la corrélation des valeurs du $DOWKI_{sech}$ et du $DOWKI_{excès}$ sur la période 1989-2018 sur la période de vulnérabilité des céréales à paille

Les valeurs du $DOWKI_{sech}$ présentent une moyenne égale à -66,8 mm et un écart-type de 134,8 mm. Un test de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé pour vérifier la normalité de la distribution (utilisation de la moyenne et de l'écart-type comme paramètres). Le test n'est pas rejeté avec une erreur de 5% ce qui signifie que les valeurs du $DOWKI_{sech}$ suivent une loi normale. En revanche, le test est rejeté pour le $DOWKI_{excès}$. Sa distribution ne suit pas une loi normale.

Les distributions annuelles du $DOWKI_{sech}$ et $DOWKI_{excès}$ calculées à l'échelle départementale ont été étudiées en termes de corrélation. Le coefficient de corrélation est égal à 0,89 comme présenté en Figure 14. L'indice de sécheresse correspond à la valeur minimale de l'anomalie de bilan hydrique cumulée calculée sur la période de vulnérabilité des cultures alors que l'indice d'excès d'eau correspond au maximum. Lors d'un événement extrême de sécheresse, l'anomalie de bilan hydrique n'est jamais remontée à la normale. Dans ce cas, la valeur du $DOWKI_{excès}$ reste faible (proche de 0 et même négative). Lors d'un événement extrême d'excès d'eau, l'indice $DOWKI_{sech}$ a lui aussi des valeurs proches de 0 ou positives. Sur le jeu de données historiques, les deux événements ne se sont jamais produits dans le même département au cours de la même année.

Le *DOWKI* est un indice climatique et de ce fait ne requiert pas de calibrage spécifique. Son seul paramètre ajustable est la période sur laquelle il est transformé en valeur annuelle. Par ces caractéristiques, il est robuste et facilement calculable sur tout type de territoire. Il répond ainsi aux critères d'universalité et de simplicité. L'indice représente une anomalie cumulée décadaire du bilan hydrique de la parcelle agricole. Pour correspondre aux pertes de récoltes dont la valeur est annuelle, une valeur annuelle de l'indice est calculée : le minimum des valeurs décadaires correspond aux événements de sécheresse et le maximum aux événements d'excès d'eau. L'indice est calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN croisée avec le RPG. Les valeurs de l'indice du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{excs}* sont corrélées à 89%.

II.2 Calcul des pertes de récoltes

II.2.1 Les données de rendement dans AGRESTE

Cette base de données, qui fournit à l'échelle départementale, les données de rendement et de surface existe depuis 1947 et permet à la France de répondre au règlement européen UE 543/2009. Ces données sont également utilisées pour enrichir les études conjoncturelles et sont utilisées pour établir les comptes nationaux et régionaux de l'agriculture (règlement UE 549/2013).

La base de données est établie par les services régionaux du MAA. Ils s'appuient sur des enquêtes annuelles effectuées à l'échelle locale auprès des coopératives et des groupes de producteurs, des informations recueillies auprès des organismes professionnels agricoles, des données administratives telles que la déclaration des demandes aux aides de la PAC, le casier viticole informatisé des douanes, etc. Des évaluations d'experts et des données chiffrées fournies par les organismes techniques agricoles permettent d'enrichir les données.

Pour certaines productions, seules les régions les plus productrices sont interrogées et dans les régions où la production est faible, celle-ci est estimée en faisant évoluer le chiffre de l'année précédente suivant la même tendance que la moyenne nationale. L'ensemble des régions n'ayant pas fournies d'informations pour une production représente moins de 15% de l'ensemble de cette production. Les résultats sont régulièrement ajustés en utilisant le recensement agricole ou d'autres types d'enquêtes réalisées sur un large territoire.

Le rattachement des terres d'une exploitation agricole est fonction de l'adresse du siège de l'exploitation. La production référencée est annuelle et établie sur les 12 mois de l'année. Pour les prairies, l'ensemble des surfaces est pris en compte, y compris les alpages (qui ne sont pas rattachés aux exploitations agricoles pour des questions juridiques). Pour la grande partie des productions végétales et celles qui sont étudiées dans cette thèse, la récolte s'étend sur une partie de l'année

uniquement et donc raisonner en termes de campagnes agricoles ou en termes d'année civile n'a pas d'importance. Cette base de données renseigne la production récoltée commercialisable. Ainsi, les chiffres de productions végétales excluent les cas suivants :

- Autoconsommation de fruits et légumes (jardins familiaux) ;
- Pertes sur le champ ;
- Pertes en cours de transfert jusqu'à la ferme ;
- Parties de productions non utilisables ;
- Pertes enregistrées au moment du conditionnement ou du triage ;
- Partie de la production non récoltée par le producteur pour des raisons économiques ;

S'il n'y a pas eu de récolte (destruction de la récolte par un aléa climatique par exemple ou surface retournée avant la récolte), la surface de production est renseignée avec un rendement nul. Si, durant la période de production, une autre culture est semée à la place, c'est celle-ci qui est prise en compte dans le calcul de surface et de rendement. Le rendement est donc un rendement de récolte, « arrivé à la ferme » pour être commercialisé.

Les données de rendement et de surface pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver sont disponibles sur 30 ans, de 1989 à 2018. Celles sur les données de prairies sont disponibles sur 19 ans de 2000 à 2018.

II.2.2 La recherche de tendance de rendement

Dans cette étude, la perte de rendement ou perte de récoltes est un taux (%) exprimant l'anomalie de rendement normalisée entre le rendement de l'année considérée et le rendement espéré ou rendement de référence. Ce rendement de référence peut être calculé de différentes façons. Dans de nombreuses publications, le rendement de référence correspond au rendement à long terme estimé qui suit la tendance historique. Les auteurs ayant étudié les tendances de rendement en France sur les céréales s'appuient sur des études réalisées aux Etats-Unis, où une relation linéaire a pu être établie sur les rendements normalisés des céréales au cours du temps (Annan et al. 2013; Harri et al. 2011; Mathieu et Aires 2018). En France, certaines études réalisées montrent une relation polynomiale d'ordre 2 ou 3 sur les rendements normalisés au cours de l'historique (Ben-Ari et al. 2016). Cependant, les résultats des équations (les coefficients trouvés) ne sont pas explicités et c'est pourquoi nous avons fait notre propre analyse qui figure en annexe 2 de cette thèse. L'objectif de cette étude est de déterminer si les rendements des cultures sont stables sur l'historique. En effet, si le caractère de stabilité est vérifié, il est possible de prendre comme référence une moyenne de rendements sur l'historique. Dans le cas contraire, il est nécessaire de calculer une référence qui représente l'évolution au cours du temps.

L'étude sur les tendances de rendement indique que pour de nombreux départements, les rendements ne sont pas stables au cours du temps pour le blé tendre d'hiver. Pour les prairies, l'étude de la tendance n'a pas montré des résultats concluants, car l'historique était trop court pour permettre le calcul de tendances. De plus, la revue de la littérature montre qu'il existe une incertitude sur l'évolution des rendements dans le futur, ce qui ne permet pas de calculer une tendance fiable pour l'horizon 2050.

II.2.3 Equation des pertes de récoltes

Afin de tenir compte de l'instabilité des rendements observée au cours du temps (voir annexe 2), il a été décidé de calculer le rendement de référence en utilisant la moyenne Olympique sur 5 ans, méthodologie utilisée pour les systèmes de gestion des risques en agriculture (assurance récolte et FNGRA) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Ministère de l'Economie et des Finances 2016). Une fois le rendement de référence défini, les pertes de récoltes départementales annuelles sont calculées selon l'équation suivante :

$$\text{pertes de récoltes}_{i,d,n} = \frac{\text{rendement}_{i,d,n} - \text{Moyenne Olympique de rendement}_{i,d,n}}{\text{Moyenne Olympique de rendement}_{i,d,n}}$$

Où i est la culture, d représente le département et n l'année. Ces pertes de récoltes sont exprimées en pourcentage. L'équation de la moyenne Olympique est donnée en ci-après :

$$\text{Moyenne Olympique } rdt_{i,d,n} = \frac{\sum_{n-5}^{n-1} rdt_{i,d,n} - \min_{n-5 \rightarrow n-1} rdt_{i,d,n} - \max_{n-5 \rightarrow n-1} rdt_{i,d,n}}{3}$$

Lors d'années dite « normales », c'est-à-dire lorsque le rendement espéré est supérieur au rendement de référence, la perte de récoltes calculée est nulle. Cette méthodologie permet de faire une approche du risque uniquement par la perte et est utilisée dans la gestion des risques.

II.2.4 Pertes de récoltes nationales sur AGRESTE

Une analyse des pertes de récoltes nationales sur l'historique a été réalisée afin de mettre en évidence des événements extrêmes systémiques. Les pertes de récoltes nationales sont obtenues en faisant la moyenne des pertes de récoltes départementales pondérées par leur surface. Les résultats sont présentés en Figure 15 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies.

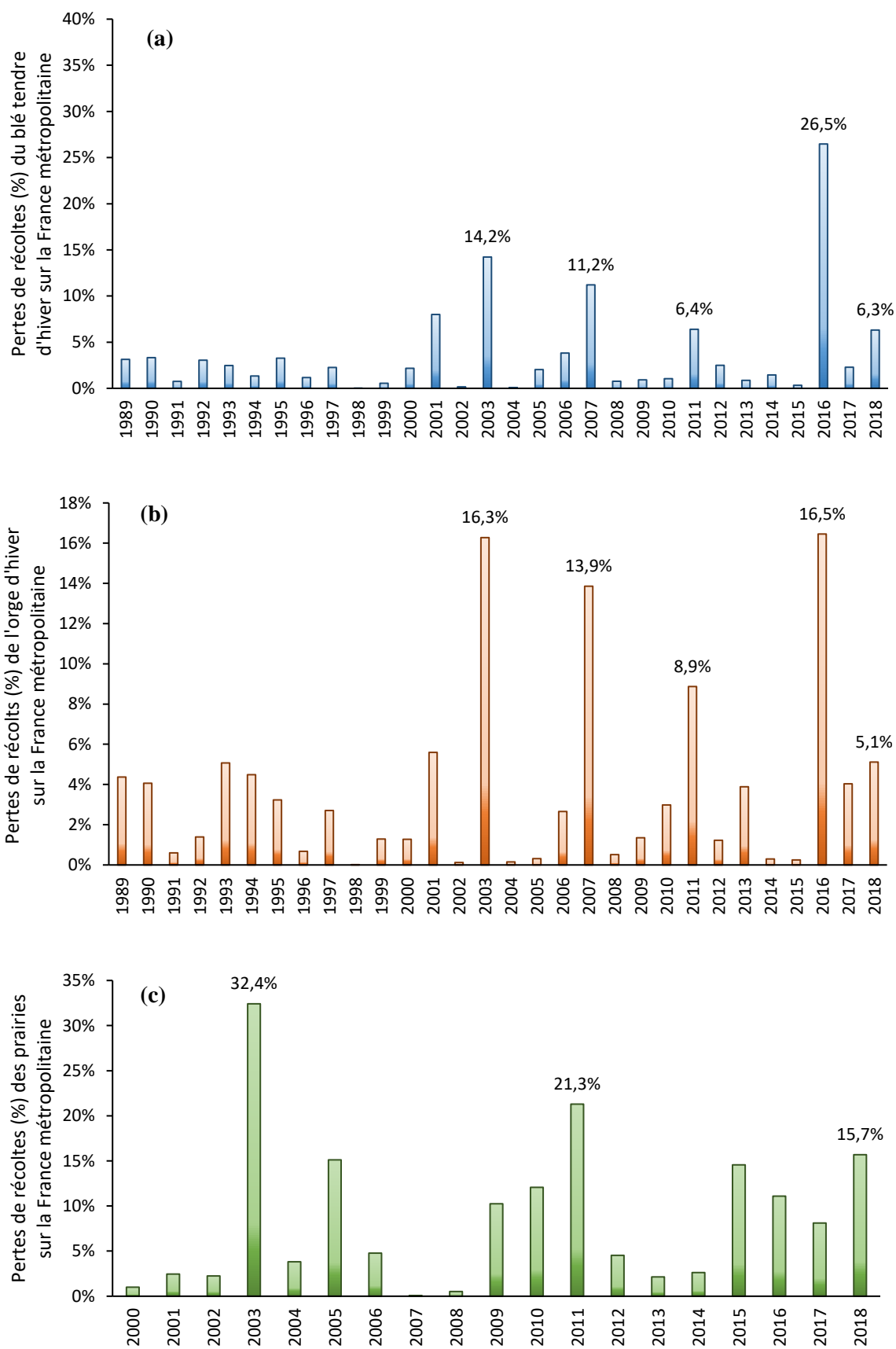


Figure 15. Pertes de récoltes moyennes (%) de 1989-2018 pour la France métropolitaine (a) sur blé tendre d'hiver, (b) sur l'orge d'hiver et (c) sur prairies.

D'après la Figure 15, plusieurs événements extrêmes ayant conduit à des pertes de récoltes de grande ampleur sont mis en évidence : la sécheresse de 2003 (pertes de récoltes importantes sur les trois cultures), l'excès d'eau de 2016 (pertes de récoltes importantes sur le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver), l'excès d'eau de 2007 (pertes de récoltes importantes sur le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver), la sécheresse de 2011 (pertes de récoltes importantes sur les trois cultures), la sécheresse de 2018 (pertes de récoltes importantes sur les prairies).

Une classification des événements historiques est alors proposée en fonction des paramètres de leur intensité et étendue spatiale en Figure 16. En abscisse, le caractère systémique est étudié, soit le nombre de départements impactés par des pertes supérieures à 5%. En ordonnée, l'intensité spatiale est étudiée, soit la moyenne des pertes de récoltes sur la France métropolitaine. Enfin, l'aire des cercles représente les pertes extrêmes soit le nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 25%. Cette analyse permet alors de distinguer les événements systémiques non intenses (beaucoup de départements impactés mais des pertes de récoltes relativement faibles), des événements de grande ampleur, et des événements moins étendus mais engendrant des pertes particulièrement importantes.

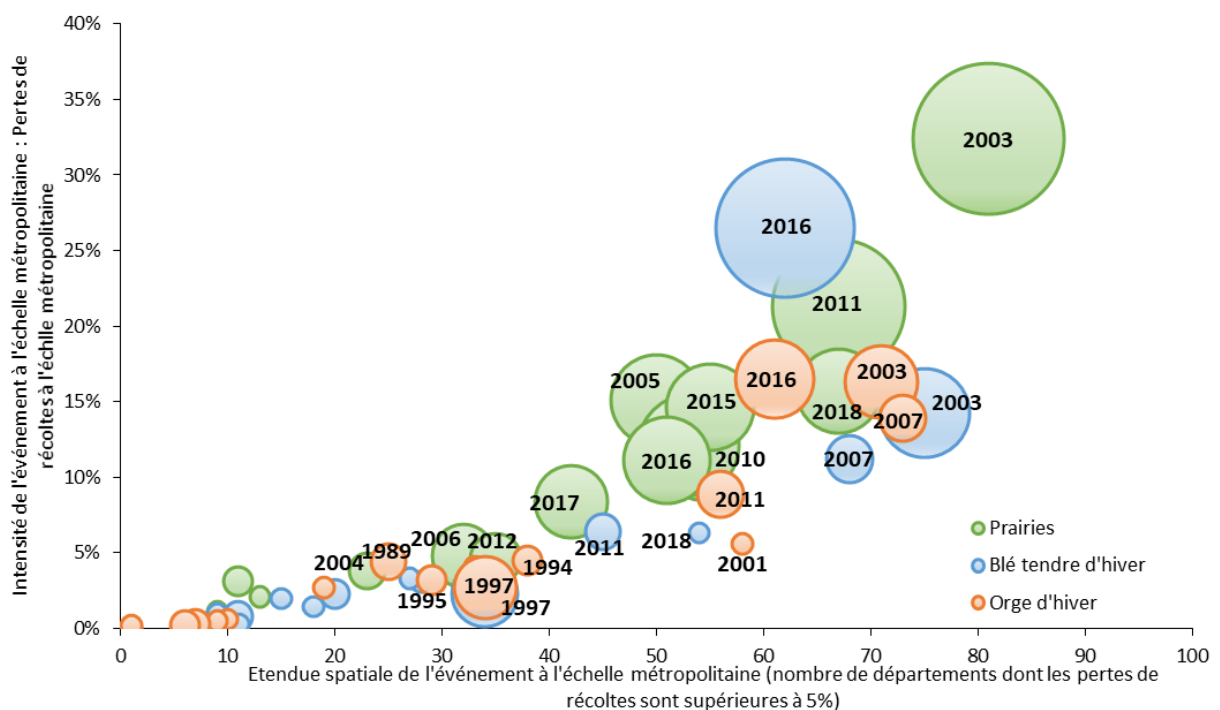


Figure 16. Classification des événements historiques en fonction des pertes de récoltes (%) des prairies, du blé tendre d'hiver et de l'orge d'hiver

D'après la Figure 16, pour les trois cultures, l'événement qui a impacté le plus de départements est la sécheresse de 2003 avec 75 départements touchés pour le blé, 71 départements pour l'orge et 81 départements pour les prairies. Pour les prairies, c'est l'événement le plus extrême selon les trois critères étudiés.

Pour le blé tendre d'hiver en particulier, l'excès d'eau de 2016 affecte moins de départements (62) que la sécheresse de 2003 mais engendre des pertes de récoltes nationales plus importantes. L'événement de 2016 est plus intense localement avec plus de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 2003. Ainsi, sur le blé tendre d'hiver, la sécheresse de 2003 impacte 80% du territoire, avec des pertes de récoltes départementales modérées. L'excès d'eau de 2016 impacte 60% du territoire, mais avec des pertes de récoltes extrêmes à l'échelle départementale. Ces pertes de récoltes extrêmes sont particulièrement nombreuses comme en témoigne le diamètre du disque pour l'événement 2016. La sécheresse 2003 et l'excès d'eau 2016 ont donc des profils de risques différents.

Pour l'orge d'hiver, les événements de 2003 et 2016 ressortent comme étant les plus extrêmes et sont comparables en termes de pertes de récoltes nationales engendrées et de pertes de récoltes extrêmes locales. La sécheresse de 2003 est plus étendue.

Enfin, pour les prairies, trois événements ressortent : les sécheresses de 2003, 2011 et 2018. La sécheresse de 2003 est un événement extrême systémique : tous les départements sont impactés et les pertes sont importantes localement.

II.3 Relation indice/pertes de récoltes

II.3.1 Méthodologie générale

La Figure 17 présente la méthodologie générale de calibrage du modèle. Le modèle d'aléa correspond au calcul de l'indice et représente les événements extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau. Il permet de les quantifier en termes d'intensité (magnitude et étendue spatiale) et de fréquence sur l'historique à partir des valeurs de l'indice. Le module de pertes de récoltes calcule les pertes de récoltes par culture à l'échelle départementale. Enfin, le modèle de dommages permet de faire le lien entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice grâce au calibrage du modèle.

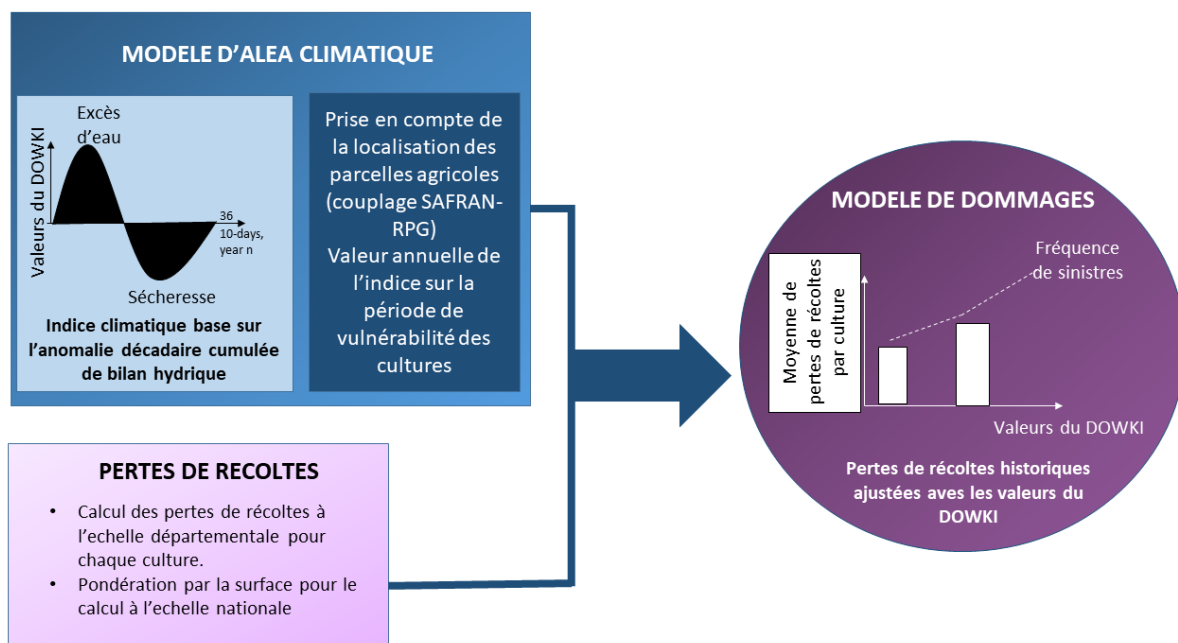


Figure 17. Méthodologie générale du calibrage du modèle agro-climatique

Les données de rendement agricole sont à l'échelle du département et les données de l'indice sont calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN couplée au RPG. Or, pour construire la relation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes, il est nécessaire d'avoir la même échelle pour ces deux types de données. L'agrégation des valeurs d'indice à l'échelle départementale est réalisée de la manière suivante :

1. Croisement du RPG avec la grille de ré-analyse SAFRAN ;
2. Sélection d'une culture parmi celles étudiées ;
3. Sélection des mailles de SAFRAN où la culture est présente ;
4. Par département, calcul de la moyenne des valeurs du *DOWKI* des mailles sélectionnées

Cette méthodologie permet de ne sélectionner uniquement les mailles où la culture étudiée est présente et est résumée en Figure 18.

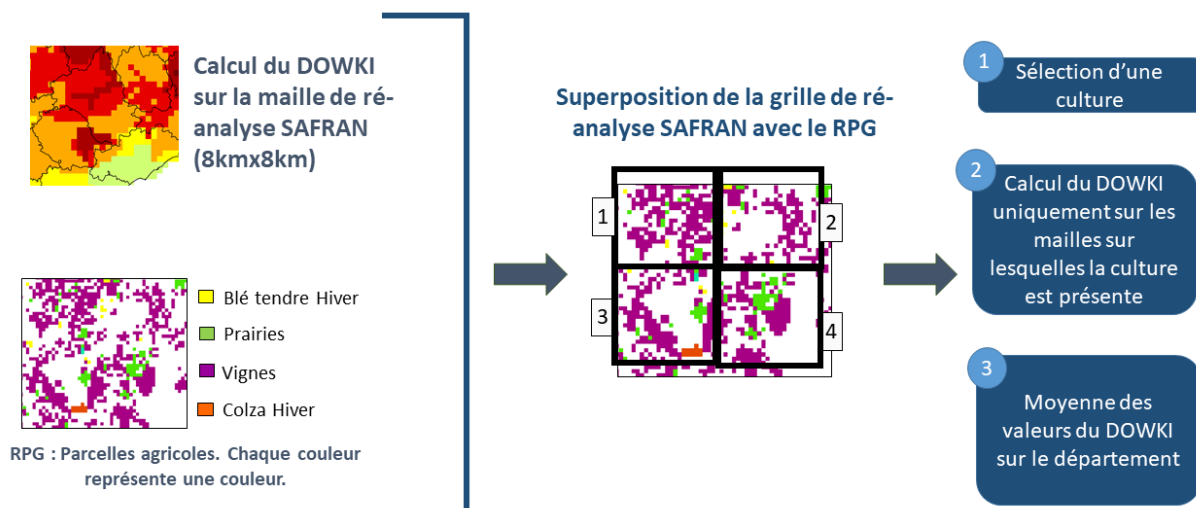


Figure 18. Méthodologie de croisement du RPG avec la grille de ré-analyse SAFRAN pour le calcul du DOWKI à l'échelle départementale

II.3.2 Conception du modèle de dommages

Pour faire le lien entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes, une matrice de calibrage est créée. Celle-ci oppose, par année et par département, la valeur du *DOWKI* à celle de la perte de récoltes calculée à partir de la base de données AGRESTE. Une matrice de calibrage par culture est conçue. Cette matrice de calibrage comporte donc 2850 lignes pour les céréales d'hiver et 1805 lignes pour les prairies.

Dans cette matrice de calibrage, plusieurs points sont à noter :

- De nombreuses pertes de récoltes sont nulles, ce qui représente donc les « bonnes années ».
- Pour une même valeur d'indice, il peut y avoir des valeurs de pertes de récoltes différentes.

Ces deux constats permettent de définir deux notions essentielles dans le modèle de dommages : la fréquence de sinistres et la moyenne de pertes de récoltes pour une même plage de valeurs d'indice. La fréquence de sinistre représente un pourcentage exprimant le nombre de pertes de récoltes strictement positives, c'est-à-dire donc le nombre de sinistres. Elle renseigne donc sur la capacité de l'indice à détecter correctement un aléa sur l'agriculture. Cette thèse se concentre sur les événements extrêmes et ainsi une attention particulière de la fréquence de sinistres et de la moyenne des pertes de récoltes est portée sur les queues de distribution. Il est recherché, pour les valeurs extrêmes de l'indice, une fréquence de sinistre maximale et une moyenne de perte de récolte maximale.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour analyser la relation entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice *DOWKI* :

- Etude de la corrélation par le calcul du coefficient de corrélation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes. Cette étude est réalisée sur les valeurs extrêmes.
- Etude de la relation entre la moyenne de pertes de récoltes et la fréquence de sinistre par classe de valeur d'indice.
- Réalisation d'une régression logistique entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes.

Corrélation entre les valeurs d'indice et les valeurs de pertes de récoltes

Le coefficient de corrélation de Spearman est calculé à l'échelle de la France entière entre les valeurs du *DOWKI_{sech}* et les pertes de récoltes pour le blé tendre d'hiver et pour les prairies en excluant les 10% des valeurs les moins extrêmes de l'indice. En effet, nous avons vu dans la distribution des valeurs de l'indice que celles-ci correspondent à des événements d'excès d'eau, les valeurs du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{exc}* étant corrélées à 89%. L'analyse de la corrélation est également réalisée à l'échelle départementale pour les deux cultures.

Le modèle de dommages

Cette méthodologie consiste à analyser pour chaque classe de valeurs d'indice la distribution des valeurs de pertes de récoltes (la moyenne, la médiane et les différents quantiles) ainsi que la fréquence de sinistre. Dans cette méthodologie, la question qui se pose est de déterminer avec précision les paliers de valeurs d'indice dans le but d'augmenter la fréquence de sinistre (la plus proche de 100%) pour les classes extrêmes de valeurs d'indice et d'obtenir pour ces classes, les moyennes de pertes de récoltes les plus élevées.

La détermination des paliers maximisant les paramètres de moyenne de taux de pertes et de fréquence de sinistres est réalisée dans un plan d'expérience présenté par la suite et de manière indépendante pour chaque culture.

La méthode de calibrage par classe de valeur d'indice induit une limite non négligeable pour la suite de ce travail. Cette méthodologie a l'avantage d'être calée sur la distribution empirique des pertes de récoltes et des valeurs d'indice. Elle ne permet donc pas d'aller au-delà des valeurs du *DOWKI* observées sur cette période. Or, l'objectif de cette thèse est d'analyser l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes et pour ce faire, les valeurs du *DOWKI* sont calculées en 2050 à l'aide des sorties du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Ces valeurs peuvent être plus extrêmes que celles observées dans la période historique et il est nécessaire de pouvoir les caractériser en termes de pertes de récoltes. C'est pourquoi, l'approche par régression logistique est testée pour attribuer des valeurs de taux de pertes au-delà de ce qui est observé dans le passé. Elle nécessite cependant des ajustements pour représenter correctement les données.

Régression logistique

Cette approche statistique est employée pour évaluer et caractériser les relations entre une variable réponse de type binaire (par exemple : pertes de récoltes oui/non) et une ou plusieurs variables explicatives qui peuvent être de type catégoriel ou numérique continu (les valeurs du *DOWKI* par exemple). La régression logistique appartient aux modèles linéaires généralisés. Dans la régression logistique, ce n'est pas la réponse binaire (présence de perte de récoltes/absence de pertes de récoltes) qui est directement modélisée mais la probabilité de réalisation (soit la fréquence de sinistre). Celle-ci est modélisée mais par une courbe sigmoïde bornée par 0 et 1, dont l'équation, avec une seule variable explicative (X) est donnée ci-après :

$$P(X) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X)}$$

Cette méthode permet donc d'obtenir une relation continue entre les valeurs du *DOWKI_{sech}* à l'échelle du département et les valeurs des pertes de rendements des cultures. Il est important de caler cette régression logistique uniquement sur les aléas que nous cherchons à expliquer. Or, nous savons que les valeurs du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{exces}* sont corrélées à 89%. Ce qui signifie que les valeurs non extrêmes (positives) du *DOWKI_{sech}* représentent des événements d'excès d'eau et à l'inverse, les valeurs négatives du *DOWKI_{exces}* représentent des événements de sécheresse. Pour ces valeurs, les pertes de récoltes peuvent donc être élevées, amenant mécaniquement une surestimation de celles-ci par la méthode de régression logistique. Il est donc nécessaire de caler la régression logistique uniquement sur les données qui correspondent à un aléa de sécheresse (et respectivement d'excès d'eau), donc pour les valeurs extrêmes du *DOWKI*.

Par ailleurs, en vue d'éliminer les pertes de récoltes qui ne sont pas dues à l'aléa modélisé (du fait de la corrélation entre les valeurs du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{exces}*), pour les valeurs du *DOWKI_{sech}* supérieures à -100mm (respectivement inférieure à 100mm pour le *DOWKI_{exces}*), la simulation des pertes de récoltes est forcée à 0%.

Couplage des méthodes

La méthode retenue pour le calibrage du modèle est une relation entre les pertes de récoltes et les valeurs du *DOWKI* par classe de valeurs d'indice couplée à une régression logistique. Il s'agit alors de déterminer à partir de quelle valeur seuil de l'indice l'ajustement de la loi est utilisé.

Dans le rapport du GIEC 2012, la notion d'extrême climatique est définie comme « l'occurrence d'une valeur d'une variable météorologique ou climatique supérieure (ou inférieure) à une valeur seuil proche de l'extrémité supérieure (ou inférieure) de la plage des données observées » (IPCC 2012). Cette définition introduit la notion de valeur seuil pour définir un extrême. Ainsi, il a été décidé de calibrer les valeurs du *DOWKI* par classe de valeur d'indice pour les valeurs inférieures au seuil, et d'utiliser la

régression logistique à partir d'une valeur seuil de l'indice pour définir les événements extrêmes à l'échelle départementale. Cette valeur est déterminée par un plan d'expérience. La régression logistique est ensuite utilisée pour simuler les pertes de récoltes pour des valeurs du *DOWKI* au-delà de l'historique (sur ARPEGE-Climat).

Le modèle de dommages permet d'établir la relation entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice et de simuler les conséquences d'un aléa climatique sur les cultures. Cette relation n'est pas simple à déterminer et plusieurs méthodologies ont été étudiées. La méthodologie choisie établit une relation empirique entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes par classe de valeurs d'indice. Pour chaque classe de valeurs d'indice, la distribution des pertes de récoltes et la fréquence de sinistre constituent des paramètres clés pour l'expression de cette relation. La régression logistique est utilisée pour simuler la relation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes au-delà des valeurs de l'historique dans le but d'analyser l'effet du changement climatique.

II.3.3 Plan d'expérience

Les paramètres du modèle agro-climatique sont optimisés à l'aide d'un plan d'expérience qui consiste à réaliser un nombre élevé de simulations en faisant varier les différents paramètres du modèle :

- Période de vulnérabilité des cultures (décade de début et décade de fin) ;
- Valeur seuils du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{excès}* à l'échelle départementale pour la définition d'un événement extrême ;
- La surface minimale à prendre en compte pour écarter les petites surfaces de la matrice de calibrage car les rendements y sont très volatils ;

Les valeurs seuils de l'indice permettent de définir des événements extrêmes afin de construire la matrice de calibrage uniquement sur les données que nous voulons modéliser. Par ailleurs, les seuils définissent également le calage de la régression logistique.

La taille du plan d'expérience est de p^n avec p le nombre de paramètres et n le nombre de valeurs pour chaque paramètre. Dans ce plan d'expérience, le nombre de paramètres est égal à 4 (décade de début, décade de fin, valeur seuil de l'indice et surface minimale), les événements de sécheresse et d'excès d'eau étant simulés de manière indépendante et chaque paramètre est testé avec 10 valeurs différentes. Pour chaque simulation, il est calculé :

- Erreur moyenne à l'échelle nationale sur la période historique ;
- Erreur moyenne à l'échelle départementale sur la période historique.

Par ailleurs, l'erreur relative moyenne annuelle pour chaque événement est également analysée ainsi que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur l'ensemble de la période historique. De plus, pour chaque simulation, la progression de la fréquence de sinistre et la moyenne de pertes de récoltes par classe de valeur d'indice est analysée.

Le plan d'expérience permet alors de déterminer les valeurs des paramètres qui minimisent les erreurs du modèle. Le plan d'expérience est réalisé pour chaque culture indépendamment.

Une fois une première sélection des paramètres qui semblent le mieux représenter les données, les paliers du *DOWKI* qui délimitent les classes sont étudiés, de façon à maximiser la fréquence de sinistre et la moyenne de pertes de récoltes sur les queues de distribution. Le plan d'expérience est alors relancé en faisant varier les classes de valeurs d'indice pour obtenir la simulation la plus performante (minimisation des erreurs).

II.3.4 Prise en compte de l'incertitude

Pour chaque classe de valeurs d'indice, on dispose d'une distribution des pertes de récoltes. Cette distribution est décrite par le calcul des quantiles. Pour chaque valeur d'indice, au cours de la simulation, un tirage aléatoire est effectué dans la distribution des pertes de récoltes pour choisir une valeur. **La valeur tirée est multipliée par la fréquence de sinistre : il est alors obtenu une perte de récolte simulée correspondant à une valeur d'indice.**

Cette méthode de bootstrap appliquée, 1000 répétitions des simulations ont été effectuées pour calculer l'intervalle de confiance autour de la moyenne de pertes de récoltes simulée. Cette étape permet de générer deux matrices de résultats pour les deux périls étudiés.

III RESULTATS

III.1 Résultats du calibrage

III.1.1 *Corrélation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes*

Le passage à la grille de ré-analyse SAFRAN pour le calcul du $DOWKI$ permet de calculer l'indice sur la même échelle que celle utilisée par les sorties désagrégées du modèle ARPEGE-Climat. L'intérêt de cette méthodologie est de pouvoir coupler les informations de l'indice avec la localisation des parcelles agricoles. Il faut alors vérifier que le passage à la grille de ré-analyse ne dégrade pas la relation entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice. La relation sur l'aléa de sécheresse est donc étudiée en calculant le coefficient de corrélation entre les pertes de récoltes et les valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculées à l'échelle de la station et sur la grille de ré-analyse SAFRAN. Cette corrélation est calculée sur la matrice de calibrage explicitée dans les paragraphes suivants (sont exclus notamment les départements à petite surface où les rendements sont volatils). Les valeurs des coefficients de corrélation sont présentées en Tableau 2 pour le blé tendre d'hiver et les prairies.

Tableau 2. Coefficient de corrélation calculés entre les pertes de récoltes et le $DOWKI_{sech}$ France entière calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN

Valeurs du coefficient de corrélation calculé avec l'indice DOWKI	Périmètre SAFRAN
Blé tendre d'hiver	0,56
Prairies	0,7

D'après le Tableau 2, sur tout l'historique, la corrélation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes des prairies est acceptable. Celle-ci inclut des événements extrêmes et des événements modérés sur lesquels les coefficients de corrélations ne sont pas optimaux.

Pour le blé tendre d'hiver, le coefficient de corrélation est de moins bonne qualité, ce qui laisse présager que de nombreux facteurs, autres que les paramètres climatiques, peuvent expliquer les pertes de récoltes.

Sur les deux cultures, l'étude du coefficient de corrélation seul indique que pour améliorer la relation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes, il est nécessaire de réaliser un calibrage plus complexe du modèle. Cela permettrait de prendre en compte plus de paramètres que la comparaison des valeurs de l'indice avec celles des pertes de récoltes.

Les coefficients de corrélation entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice sont également étudiés à l'échelle départementale. Cette analyse permet d'identifier des territoires où la relation pourrait

être particulièrement concluante. Les résultats sont présentés en Figure 19 pour les prairies et le blé tendre d'hiver.

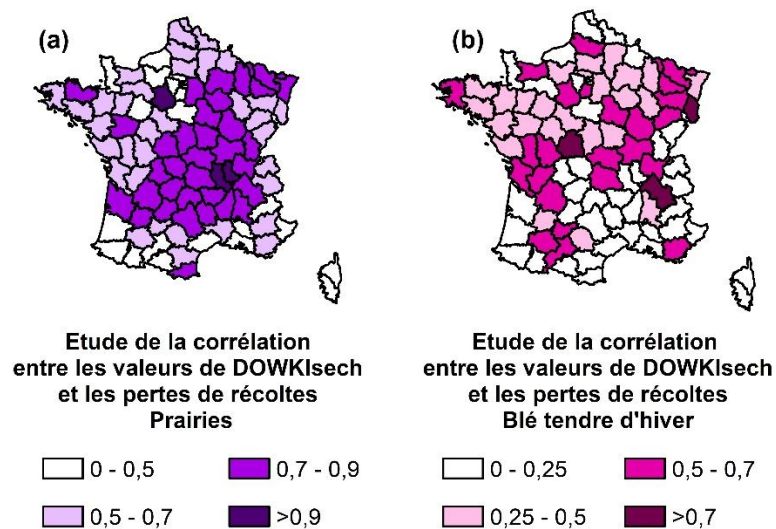


Figure 19. Coefficient de corrélation entre les valeurs du DOWKIsech et les pertes de récoltes sur l'historique (a) DOWKI calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN/pertes de récoltes prairies ; (b) DOWKI calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN/pertes de récoltes blé tendre d'hiver

D'après la Figure 19, pour les prairies, à l'échelle départementale, la moitié des départements enregistrent un coefficient de corrélation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes supérieur à 0,7. Ces territoires sont ceux où les surfaces en prairies sont les plus importantes. La relation entre les valeurs de pertes de récoltes et l'indice n'est pas parfaite mais elle montre que l'indice explique globalement les pertes de récoltes sur le territoire.

Pour le blé tendre d'hiver, la relation est moins évidente, du fait de nombreuses incertitudes dans le modèle (faux positifs et faux négatifs). Nous verrons en quatrième partie de ce chapitre que nous pouvons expliquer les incertitudes du modèle par de nombreux facteurs qui résultent de l'utilisation d'une donnée de rendement annuelle. En effet, le rendement annuel est le résultat d'un ensemble de facteurs qui surviennent au cours de l'année : aléas climatiques de natures différentes, pratiques culturales des agriculteurs modifiant l'exposition aux risques des cultures, aléas sanitaires, etc. Compte-tenu de ces informations, la valeur du coefficient de corrélation nous paraît acceptable et laisse présager qu'une bonne relation peut être construite entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes sur les événements extrêmes.

III.1.2 Plan d'expérience et sensibilité des paramètres

Pour chaque paramètre, une analyse de sensibilité est réalisée en comparant la distribution des valeurs des paramètres en fonction de l'erreur moyenne France entière et à l'échelle départementale. À titre d'exemple, les résultats sont présentés pour le blé tendre d'hiver et le péril de sécheresse en Figure 20.

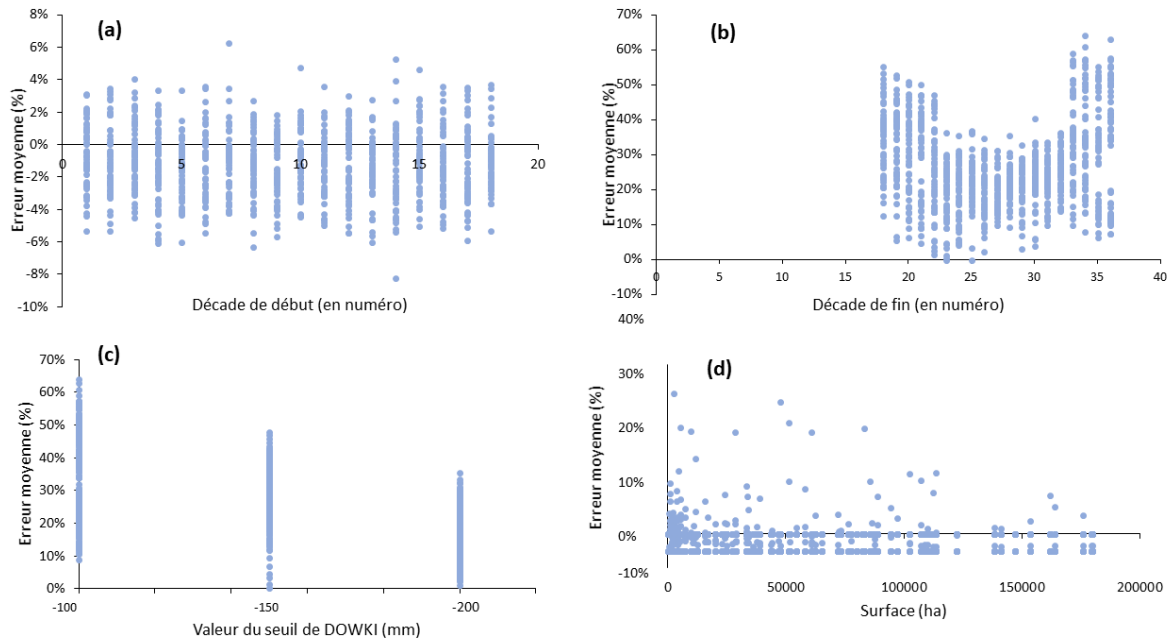


Figure 20. Analyse de sensibilité du modèle sur le blé tendre d'hiver : (a) Erreur moyenne (%) en fonction de la décade de début, (b) Erreur moyenne (%) en fonction de la décade de fin du modèle, (c) erreur moyenne (%) en fonction du seuil de DOWKIsech, (d) erreur moyenne (%) en fonction de la surface (ha).

L'analyse de sensibilité montre que les paramètres qui ont le plus d'influence sont la surface et la valeur du seuil *DOWKI*. Ces deux paramètres permettent de minimiser l'erreur moyenne sur le modèle. Il faut donc appliquer un seuil de surface relativement élevé et un seuil de valeurs de l'indice de -200 mm. En ce qui concerne la décade de fin, une des meilleures simulations est obtenue avec la décade de fin numéro 22, soit la première décade d'août. Pour la décade de début, les résultats montrent des résultats équivalents : ce paramètre n'influence pas énormément l'erreur moyenne du modèle.

Concernant le paramètre de surface, il est important de noter que le blé tendre d'hiver n'est pas cultivé de manière homogène sur le territoire. La Figure 21b présente la distribution des surfaces à l'échelle départementale dans la moitié Nord de la France et la moitié Sud de la France pour cette culture. Ainsi, la surface cultivée dans la moitié Nord représente 11 fois celle cultivée dans la moitié Sud de la France. Avec un calibrage France entière, en appliquant le seuil de surface, de nombreux départements du Sud de la France sont éliminés ce qui ne permet pas de réaliser le calibrage sur cette partie de la France.

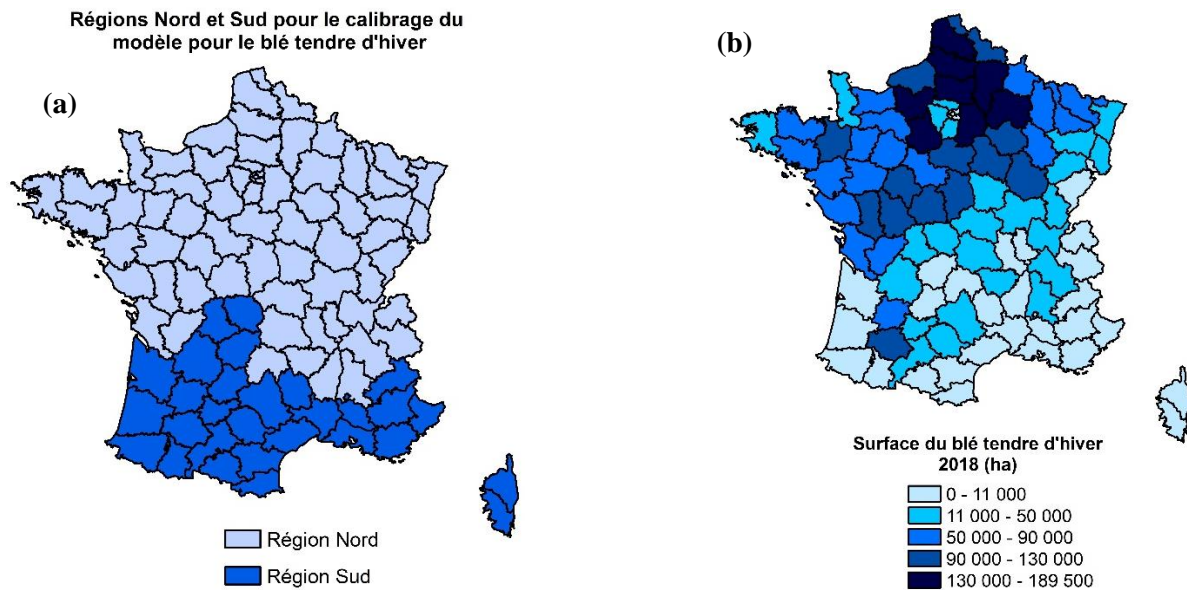


Figure 21. (a) Présentation du découpage Nord/Sud réalisé pour le calibrage du modèle pour le blé tendre d'hiver ; (b) Surface du blé tendre d'hiver (ha) en 2018

D'autre part, une partie de la surface cultivée du blé tendre d'hiver est irriguée dans la moitié Sud de la France. En effet, d'après le recensement agricole de 2010, plus de 10% des surfaces cultivées sont irriguées dans le Sud de la France (Sud-Ouest et région PACA). Avec la plaine de la Beauce, ces deux régions concentrent les prélèvements en eau pour l'agriculture les plus importants (Aillery et al. 2018; Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2012). Ceci conduit à des pertes de récoltes moindres avec des valeurs du $DOWKI_{sech}$ extrêmes, plus extrêmes que dans le Nord de la France du fait d'un climat plus sec. La présence de l'irrigation introduit donc des incertitudes dans le modèle (des faux positifs) et deux profils de risque différents. C'est pourquoi, pour cette culture, les simulations ont donné de meilleurs résultats avec un calibrage différent entre le Nord et le Sud de la France.

Le plan d'expérience permet de sélectionner les paramètres qui minimisent l'erreur moyenne à l'échelle de la France métropolitaine et à l'échelle départementale. Ce plan d'expérience est réalisé pour chaque culture indépendamment. Les meilleurs paramètres sont donnés dans le Tableau 3 pour chaque culture.

Tableau 3. Meilleurs paramètres utilisés pour la calibration du modèle par culture

Culture	Période sur laquelle est calculé la valeur annuelle de l'indice	Seuil de définition d'un événement extrême Sécheresse/Excès d'eau	Minimum de Surface cultivée (ha)
Blé tendre d'hiver Moitié Nord	3 ^{ème} décade d'avril – 1 ^{ère} décade d'août	-200mm /+200mm	9.e ⁴
Blé tendre d'hiver Moitié Sud	3 ^{ème} décade d'avril – 1 ^{ère} décade d'août	-200mm/ +200mm	1,1.e ⁴
Orge d'hiver	3 ^{ème} décade d'avril – 1 ^{ère} décade d'août	-200mm / +200mm	2.e ⁴
Prairies	3 ^{ème} décade d'avril – 2 ^{nde} décade de septembre	-200mm	2.e ⁴

Pour ces simulations, sur tout l'historique, l'erreur relative moyenne d'estimation est de 5,5% pour les prairies, 8,3% pour le blé tendre d'hiver et 16,3% pour l'orge d'hiver. L'erreur quadratique moyenne par événement est de 12% pour les prairies, 9% pour le blé tendre d'hiver, 7,8% pour l'orge d'hiver. Le plan d'expérience ainsi réalisé et le calibrage / validation du modèle sur l'historique permet de maîtriser l'erreur d'estimation et l'incertitude autour des simulations. Elle est intégrée dans le modèle de dommages, donnant ainsi pour chaque estimation, un intervalle de confiance.

III.1.3 Calibrage du modèle de dommages

Le *DOWKI* a été conçu pour prédire les pertes de récoltes liées aux événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau à l'échelle départementale. A cet effet, une matrice de calibrage est créée et combine les valeurs d'anomalies du *DOWKI_{sech}* et du *DOWKI_{exces}*, les pertes de récoltes calculées avec *AGRESTE* et les pertes de récoltes de sécheresse et d'excès d'eau simulées grâce à l'indice. La relation entre le *DOWKI* et les pertes de récoltes pour chaque culture est décrite en Figure 22. Cette figure décrit la capacité du *DOWKI* à prédire la survenance d'un taux de pertes et son intensité pour chaque culture.

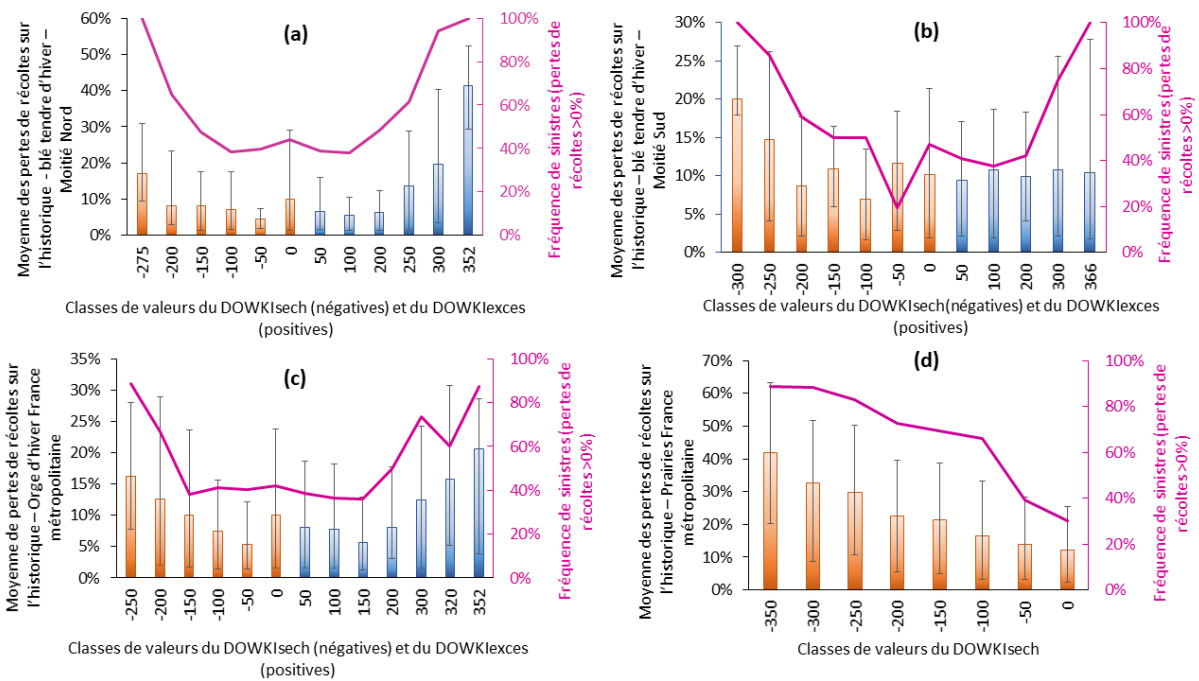


Figure 22. Modèle de dommages, moyenne de pertes de récoltes et quantiles 10-90, fréquence de sinistres (pertes de récoltes >0%) sur l'historique pour (a) le blé tendre d'hiver sur la moitié Nord ; (b) le blé tendre d'hiver pour la moitié Sud ; (c) l'orge d'hiver sur la France métropolitaine ; (d) les prairies sur la France métropolitaine

D'après la Figure 22, plus les valeurs du $DOWKI_{sech}$ et du $DOWKI_{exces}$ sont extrêmes, plus les moyennes de pertes de récoltes pour les trois cultures sont importantes et plus la fréquence de sinistres augmente. Pour le blé tendre d'hiver, la fréquence de sinistre est de 100% pour les aléas de sécheresse et d'excès d'eau dans la moitié Nord et dans la moitié Sud de la France. Pour l'orge d'hiver et les prairies, la fréquence de sinistre atteint 90%. Ces résultats montrent que le $DOWKI$ détecte bien les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau et leurs impacts sur l'agriculture. Pour les sécheresses extrêmes, la valeur moyenne des pertes de récoltes (calculée sur la dernière classe de valeur d'indice) est égale à 16,9% pour le blé tendre d'hiver sur la moitié Nord de la France, 20% pour le blé tendre d'hiver sur la moitié Sud de la France, 16,2% pour l'orge d'hiver et 42,1% pour les prairies sur la France métropolitaine.

Pour les valeurs du $DOWKI$ proches de 0, la fréquence de sinistre est de 40% pour les céréales d'hiver et de 30% pour les prairies. Nous faisons l'hypothèse que pour les valeurs du $DOWKI$ inférieures au seuil de sécheresse et d'excès d'eau, les pertes de récoltes représentent soit des fluctuations naturelles des rendements autour de la moyenne olympique, soit des pertes dues à d'autres périls que ceux qui sont simulés, ce qui est cohérent avec la faible fréquence de sinistres.

Néanmoins, pour chaque classe de valeurs d'indice, y compris les classes extrêmes, certains départements n'enregistrent pas de pertes de récoltes. C'est le cas notamment pour les prairies et l'orge d'hiver pour lesquelles la fréquence de sinistres n'est pas égale à 100%. C'est également le cas pour le blé tendre d'hiver sur la meilleure simulation réalisée sur la France métropolitaine.

Ces incertitudes peuvent être liées au manque d'information sur les données de rendement. En effet, nous ne disposons pas de renseignement sur les pratiques agricoles, telle que les dates de semis et de récoltes, ou l'irrigation qui peuvent modifier la vulnérabilité aux risques des cultures. Par ailleurs, le rendement est une donnée annuelle et résulte d'un ensemble de facteurs survenus au cours de l'année. Les pertes de récoltes peuvent donc être dues à des phénomènes qui ne sont pas expliqués par le modèle. Enfin, le calcul des pertes de récoltes en lui-même peut également entraîner des incertitudes. Ces incertitudes font l'objet d'un examen approfondi en discussion de ce chapitre sur les années d'événements extrêmes.

Malgré le manque d'information disponible sur les données de rendement, pour les valeurs extrêmes de l'indice, les fréquences de sinistres sont maximales ce qui montre que le modèle remplit son objectif : il permet de simuler les pertes de récoltes des événements extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau sur les trois cultures étudiées.

III.2 Simulation des valeurs de l'indice

III.2.1 Valeurs de l'indice à l'échelle nationale

La Figure 23a présente les valeurs moyennes annuelles simulées du $DOWKI_{sech}$ sur la France métropolitaine. Le $DOWKI$ est calculé à l'échelle de la maille et la valeur annuelle est réalisée en faisant la moyenne de toute les mailles (sans pondération par la surface pour représenter l'aléa climatique). Les valeurs du $DOWKI$ sont calculées pour les trois cultures étudiées sur leur période de vulnérabilité. La période de vulnérabilité des deux cultures céréalières est identique. La Figure 23b présente les résultats pour le $DOWKI_{exces}$.

Cette figure permet de mettre en évidence l'influence de la période de vulnérabilité sur les valeurs annuelles du $DOWKI$. L'analyse permet notamment de caractériser les types de sécheresses dans le temps.

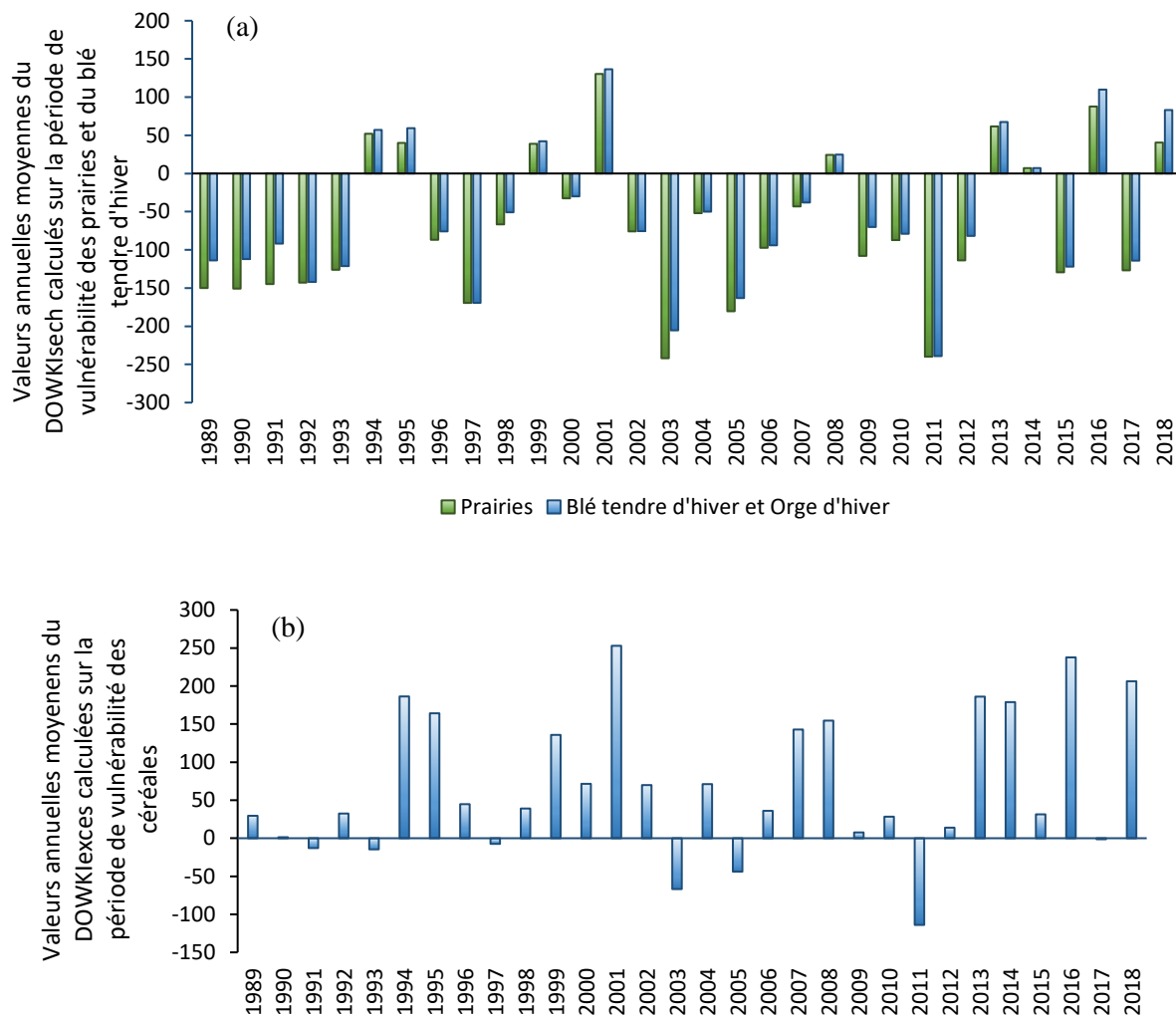


Figure 23. (a) Valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{sech}$ calculées sur la période de vulnérabilité des prairies et des céréales d'hiver ; (b) valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{exces}$ calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver

D'après la Figure 23a, les sécheresses extrêmes de 2003 et 2011 sont bien représentées. De plus, les valeurs moyennes du $DOWKI_{sech}$ pour les prairies sont plus importantes que celles pour les céréales d'hiver : elles sont en moyennes 20% inférieures sur tout l'historique. Ce résultat est directement lié au fait que pour les céréales d'hiver, le calcul du $DOWKI_{sech}$ ne tient compte que d'une partie de l'été. Ce premier résultat souligne le caractère physique de l'indice et permet de décrire les sécheresses en fonction de leur période de survenance au cours du temps.

Pour l'année 2011, marquée par une sécheresse printanière, aucun écart n'est constaté entre les valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculées pour les céréales et celles calculées pour les prairies. En effet, l'anomalie cumulée décadaire du bilan hydrique atteint ses valeurs minimales au cours du printemps, période sur laquelle est calculé le $DOWKI_{sech}$ pour les trois cultures. En revanche, en 2003, l'écart relatif entre les valeurs du $DOWKI_{sech}$ sur les prairies et celui sur les céréales est de 15%. En effet, la sécheresse de 2003 est estivale et l'anomalie cumulée du bilan hydrique continue à diminuer durant le mois d'août (hors de la période de vulnérabilité des céréales à paille). C'est pourquoi, la valeur moyenne annuelle

du $DOWKI_{sech}$ est plus extrême pour les prairies que pour les céréales d'hiver. Il est important de noter que ce résultat est cohérent avec des pertes de récoltes bien plus extrêmes pour les prairies que pour les céréales d'hiver sur cette année.

Cependant, la comparaison des valeurs moyennes du $DOWKI_{sech}$ entre ces deux sécheresses extrêmes soulève plusieurs points d'incohérence :

- Les valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{sech}$ pour les prairies sont équivalentes sur 2003 et 2011 alors que la moyenne des pertes de récoltes pour 2003 est de 32,4% et de 24,3% pour 2011 ;
- La valeur moyenne annuelle du $DOWKI_{sech}$ de 2003 pour les céréales d'hiver est supérieure à celle de 2011 (soit moins extrême que celle de 2011) alors que le phénomène inverse est observé sur les pertes de récoltes : les pertes de récoltes des céréales d'hiver en 2003 sont deux fois supérieures à celle de 2011.

La valeur moyenne annuelle du $DOWKI_{sech}$ sur la Figure 23 est calculée sans tenir compte des surfaces. Or, les pertes de récoltes moyennes précédemment citées sont pondérées par la surface de chaque département. Les cultures ne sont pas cultivées de manière homogène sur le territoire. Ainsi, il est nécessaire de regarder la représentation graphique du $DOWKI$ et de l'analyser par rapport aux pertes de récoltes départementales et aux surfaces des cultures départementales pour avoir plus de précisions. En effet, pour les prairies, plusieurs hypothèses explicatives sont possibles :

- La sécheresse de 2011 est moins étendue spatialement que celle de 2003. En termes de pertes de récoltes, cette hypothèse est vérifiée (Figure 16). En revanche, les valeurs du $DOWKI$ peuvent être particulièrement extrêmes localement. Ceci expliquerait pourquoi la valeur moyenne annuelle est identique entre 2003 et 2011 alors que la moyenne des pertes de récoltes est différente.
- Une autre hypothèse explicative complémentaire est que les deux sécheresses n'impactent pas le même territoire.

Ces deux hypothèses seront vérifiées dans les paragraphes suivants, par l'analyse cartographique de l'indice et des pertes de récoltes.

Pour les céréales à paille, il est observé une valeur du $DOWKI_{sech}$ moins extrême en 2003 qu'en 2011 alors que les pertes de récoltes indiquent le contraire. D'après la Figure 16 (page 32), la sécheresse de 2003 est plus étendue, plus intense et plus extrême. Cette incohérence signifie a priori que l'indice $DOWKI_{sech}$ ne possède pas des valeurs plus extrêmes en 2003 qu'en 2011 malgré le fait que les pertes de récoltes soient plus intenses. Des hypothèses explicatives sont présentées en quatrième partie de ce chapitre.

D'autre part, une sécheresse n'est pas correctement détectée : il s'agit de la sécheresse de 2018. En effet, les valeurs du $DOWKI_{sech}$ annuelles moyennes sont positives, indiquant donc un excès d'eau. Ceci est dû au caractère atypique de cette sécheresse. En effet, celle-ci est estivale et se poursuit durant l'automne. Cependant, durant le printemps, des excès de pluviométrie sont enregistrés. L'indice $DOWKI$ a donc des valeurs très fortement positives durant cette période. L'anomalie du bilan hydrique calculée étant cumulée, les valeurs diminuent mais n'atteignent pas des valeurs extrêmes négatives car du fait de l'excès de pluviométrie, les valeurs du $DOWKI_{sech}$ sont, au départ, anormalement élevées. L'écart relatif entre les valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour les prairies et celles pour les céréales est de 105% : l'indice a une valeur annuelle moyenne de 40,5mm pour les prairies et de 83,1mm pour les céréales. Or, cette sécheresse a surtout impacté les fourrages. Cette différence de valeur moyenne d'indice est expliquée par le fait que la sécheresse est plus tardive, donc captée par l'indice calculé sur la période de vulnérabilité des prairies. Par ailleurs, la sécheresse étant tardive, elle impacte peu les céréales d'hiver qui sont récoltées, ce qui explique pourquoi celles-ci n'enregistrent pas de fortes pertes à l'échelle nationale.

Pour l'excès d'eau, les valeurs moyennes de l'indice $DOWKI_{exces}$ sont extrêmes pour les années 2001, 2016 et 2018 (valeurs moyennes supérieures à 200mm). Là encore, il est important de s'interroger sur les valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{exces}$ par rapport aux pertes de récoltes. En effet, la valeur moyenne la plus élevée du $DOWKI_{exces}$ apparaît pour l'excès d'eau de 2001, alors que celui-ci a engendré des pertes bien moins importantes que celui de 2016. Par exemple, les pertes de récoltes du blé tendre d'hiver sont de 8% en 2001 alors qu'elles sont de 26% en 2016. Ceci s'explique notamment par la période différente à laquelle survient l'excès d'eau. L'excès d'eau de 2001 est survenu à la fin de l'été. En effet, lorsque l'on regarde les valeurs de l'indice à la décade (par exemple pour le département 18 Figure 11), on constate que les valeurs maximales sont obtenues pour les dernières décades soit fin juillet-début août. Les céréales d'hiver ont atteint leur maturité et terminé leur stade de développement, donc un événement d'excès d'eau qui débute à ce moment provoque moins de pertes sur les cultures. En revanche, l'épisode d'excès d'eau de 2016 a eu lieu lors d'une période critique du stade de développement des cultures (la phase de remplissage des grains déterminant le rendement) au mois de juin. C'est pourquoi dans le cas de 2016, les pertes enregistrées pour les céréales d'hiver sont beaucoup plus importantes. De plus, d'autres facteurs aggravants conduisent à une perte de récolte particulièrement importante en 2016 comme l'impossibilité des agriculteurs à accéder à leurs parcelles et de réaliser les traitements phytosanitaires des cultures. Ces facteurs sont discutés en dernière partie de ce chapitre.

En 2018, la valeur moyenne du $DOWKI_{exces}$ est supérieure à 200mm, ce qui signifie qu'un événement d'excès d'eau a eu lieu. C'est la seule année de l'historique où les événements de sécheresse et d'excès d'eau ont lieu la même année. Nous verrons dans la section III.3.2 que les événements n'ont pas lieu dans les mêmes départements.

L'étude des valeurs annuelles de l'indice $DOWKI$ sur l'historique sur les périmètres prairies et céréales d'hiver montre que celui-ci détecte bien les événements extrêmes tels que les sécheresses de 2003 et 2011 et les excès d'eau de 2001 et 2016. Certaines incohérences sont notées et un des facteurs explicatifs est la pondération des pertes de récoltes par la surface à l'échelle nationale. Pour vérifier ce point, l'analyse cartographique est nécessaire et est présentée dans le paragraphe suivant. Cette analyse met également en évidence une forte valeur du $DOWKI_{exces}$ en 2018, supposant alors que cette année combine les deux événements, sur des territoires différents. L'analyse cartographique permet également de vérifier cette hypothèse explicative.

III.2.2 Cartographie du $DOWKI$ sur les événements extrêmes et comparaison avec les pertes de récoltes

Cette partie présente les résultats du $DOWKI_{sech}$ et du $DOWKI_{exces}$ pour les événements extrêmes sélectionnés du passé (sécheresses de 2003, 2011, 2018 et excès d'eau de 2007 et 2016) afin de vérifier les hypothèses précédemment énoncées et la cohérence entre les valeurs des pertes de récoltes et l'indice.

Sécheresse de 2003

La Figure 24 présente les valeurs du $DOWKI_{sech}$ (mm) sur l'année 2003 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver (Figure 24a), pour les prairies (Figure 24b). La Figure 25 présente les pertes de récoltes (%) départementales calculées avec la base de données AGRESTE pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies.

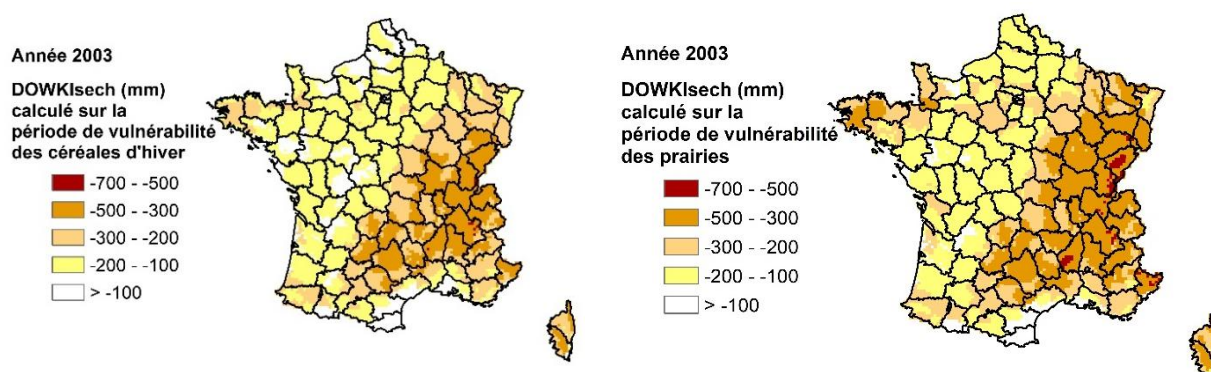


Figure 24. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2003 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN, (a) sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver ; (b) sur la période de vulnérabilité des prairies

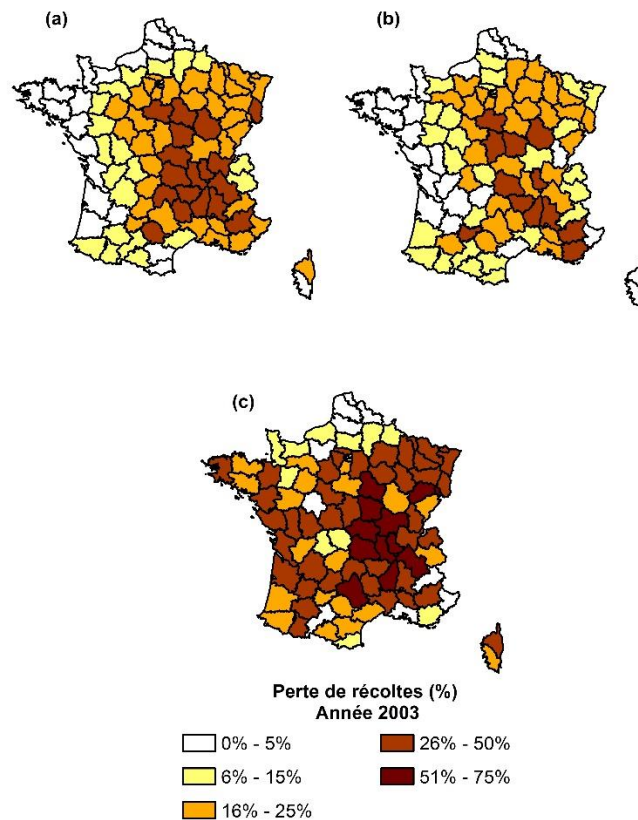


Figure 25. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2003 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies

Les valeurs du $DOWKI$ sont plus extrêmes dans les régions Rhône-Alpes et Auvergne ce qui correspond aux pertes de récoltes les plus extrêmes. Pour les prairies, on retrouve également des valeurs du $DOWKI_{sech}$ extrêmes dans la région Grand-est et en Bretagne en accord avec les pertes de récoltes importantes. Cet événement est bien référencé dans la littérature : il s'agit de la sécheresse estivale de 2003 qui a impacté plus des deux tiers du territoire (Ciais et al. 2005; Amigues et al. 2006). Météo-France enregistre des températures à 35°C dans plus de 60% des stations durant l'été. La pluviométrie est inférieure à la normale et une étude montre une diminution des précipitations moyennes de plus de 50% sur tout le territoire métropolitain durant le mois d'août (Rebetez et al. 2006). Un rapport du Sénat indique que la sécheresse agricole est estimée à 13 Md€ pour l'ensemble de l'Union Européenne, les pertes étant de 4 Md€ pour la France (Létard, Flandre, et Lepeltier 2004). Les grandes cultures ont particulièrement été impactées par cet événement extrême (Létard, Flandre, et Lepeltier 2004; COPA COGECA 2003). Pour le secteur de l'élevage, les conséquences sont très variées. Les prairies enregistrent des pertes de plus de 30% sur le territoire métropolitain, ce qui est cohérent avec notre estimation des pertes de récoltes (UNEP 2004). Le déficit herbager a contraint les éleveurs à puiser dans leurs stocks ou à procéder à des rachats de foin et de maïs ensilage (Caillaud et Tournier 2007; Mollier et Carrère 2019). La sécheresse de 2003 est extrême et systémique. Elle a impacté l'ensemble du

territoire métropolitain : elle affecte 74,6% de la surface en blé tendre d'hiver, 79,8% en orge d'hiver et 92,1% en prairies (pertes de récoltes départementales >5%).

Excès d'eau de 2016

En 2016, la France a enregistré des records de pertes de récoltes sur le blé depuis plus d'un siècle. Cet événement est caractérisé par des températures anormalement chaudes à la fin de l'automne et un excès de précipitations au printemps (Ben-Ari et al. 2018). Cet événement extrême est sans précédent. La FNSEA a estimé le montant des dommages à 4Md€. Outre l'asphyxie des plants par l'excès d'eau, les inondations ont empêché les agriculteurs de travailler les terres et notamment de réaliser les épandages, alors que ce climat à la fois doux et humide a favorisé l'apparition de nombreuses maladies fongiques. Les quantités produites en céréales sont nettement inférieures à la normale et à cela s'ajoute une qualité de blé moindre (FranceAgriMer 2019).

La Figure 26 présente les valeurs du $DOWKI_{excès}$ (mm) calculé sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver sur la grille de réanalyse SAFRAN. Les pertes de récoltes pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver sont présentées en Figure 27. Cet événement, sur la carte de la France apparaît moins étendu (en termes de nombre de départements impactés) que la sécheresse de 2003. Cependant, il affecte les bassins de productions de céréales et ainsi 88% et 84,1% des surfaces cultivées en blé tendre d'hiver et en orge d'hiver respectivement sont impactées.

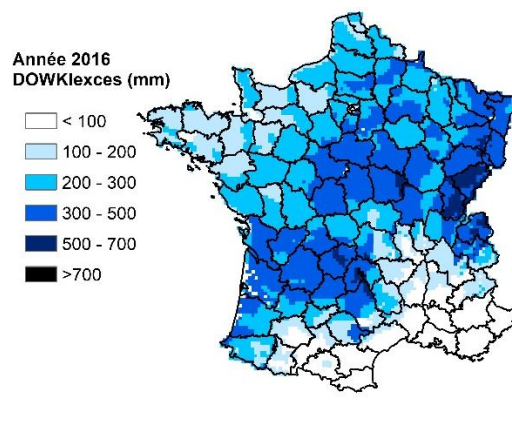


Figure 26. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{excès}$ pour l'année 2016 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver

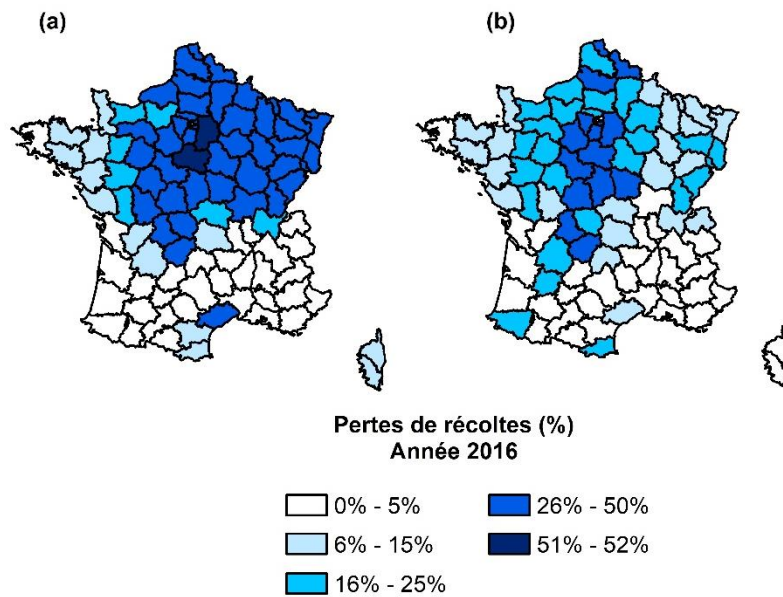


Figure 27. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2016 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver

Comme pour les pertes de récoltes, les valeurs extrêmes du $DOWKI$ se situent dans la moitié Nord de la France. Cependant, les valeurs les plus extrêmes de l'indice (≥ 300 mm) sont situées dans quelques départements de l'Est (Haut-Rhin, Doubs, Haute-Saône), dans le Cher et l'Indre et trois départements de la moitié Sud de la France (Landes, Cantal et Savoie) alors que les pertes de récoltes des céréales d'hiver les plus extrêmes sont situées en Ile-de-France. De plus, la carte du $DOWKI_{exces}$ indiquent des valeurs extrêmes dans le Sud de la France alors que très peu de pertes sont enregistrées. Ces valeurs importantes du $DOWKI$ alors qu'aucune perte de récolte n'est enregistrée engendrent des faux négatifs. En quatrième partie de ce chapitre, une attention particulière est portée sur l'excès d'eau de 2016 avec des facteurs explicatifs s'ajoutant à l'aléa et expliquant les records de pertes de récoltes enregistrés dans la moitié Nord de la France.

De plus, si on s'intéresse uniquement aux valeurs du $DOWKI_{exces}$ sans chercher d'autres facteurs explicatifs, on peut noter que pour la moitié Nord de la France, les valeurs du $DOWKI_{exces}$ sont supérieures à 200mm pendant plusieurs décades (les mois de mai et juin entiers) alors que pour les départements du Sud de la France, l'événement ne dure que 20 jours (département des Landes et de la Gironde par exemple). Cette différence de longueur de l'aléa climatique pourrait être un facteur explicatif de la différence des pertes de récoltes observée.

Sécheresse de 2011

La Figure 28 présente les valeurs du $DOWKI_{sech}$ (mm) sur l'année 2011 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver (Figure 28a), pour les prairies (Figure 28b). Les cartes 28a et 28b sont presque identiques car la sécheresse est printanière et les valeurs minimales du $DOWKI$ sont obtenues durant le printemps, saison présente aussi bien dans la période de vulnérabilité des prairies que celle des céréales d'hiver.

La Figure 29 présente les pertes de récoltes pour le blé tendre d'hiver (a), l'orge d'hiver (b) et les prairies (c). La sécheresse affecte 46,6%, 75% et 75,2% des surfaces cultivées en blé tendre d'hiver, orge d'hiver et prairies respectivement. Sur la Figure 29, il est observé que l'orge d'hiver, contrairement au blé, enregistre dans de nombreux départements des pertes de récoltes entre 6% et 15% et c'est pourquoi le territoire impacté est supérieur. Même pour les prairies, la sécheresse de 2011 est moins étendue qu'en 2003 : 61 départements ont des pertes supérieures à 10% alors qu'ils sont au nombre de 77 en 2003. Par ailleurs, en 2011, 5 départements enregistrent des pertes de récoltes supérieures à 50% alors qu'ils sont au nombre de 12 en 2003. Le pourtour Méditerranéen ainsi que les départements des Pyrénées n'enregistrent pas de pertes ce qui est en accord avec les valeurs de l'indice. De plus, les pertes de récoltes extrêmes sont situées dans le Sud-Ouest, ce qui est cohérent avec les valeurs de l'indice. Seule la région des Alpes montre des incohérences entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes.

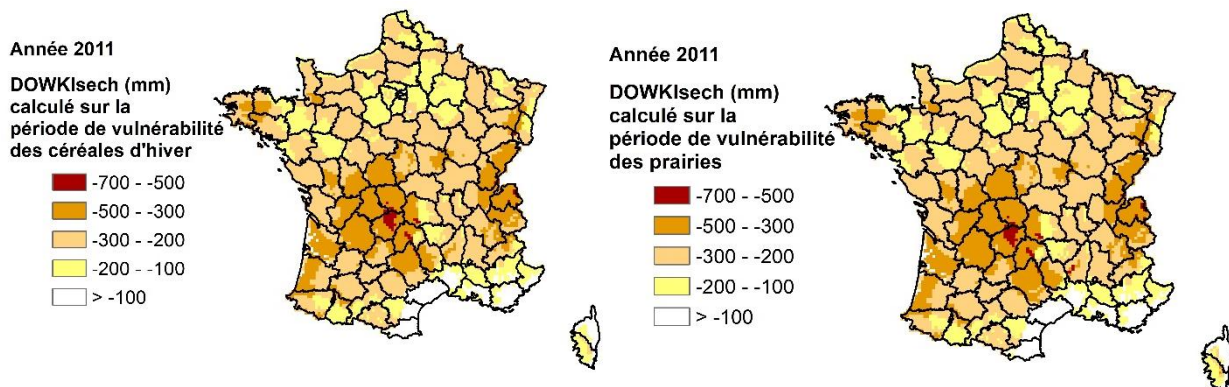


Figure 28. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2011 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN, (a) sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver ; (b) sur la période de vulnérabilité des prairies

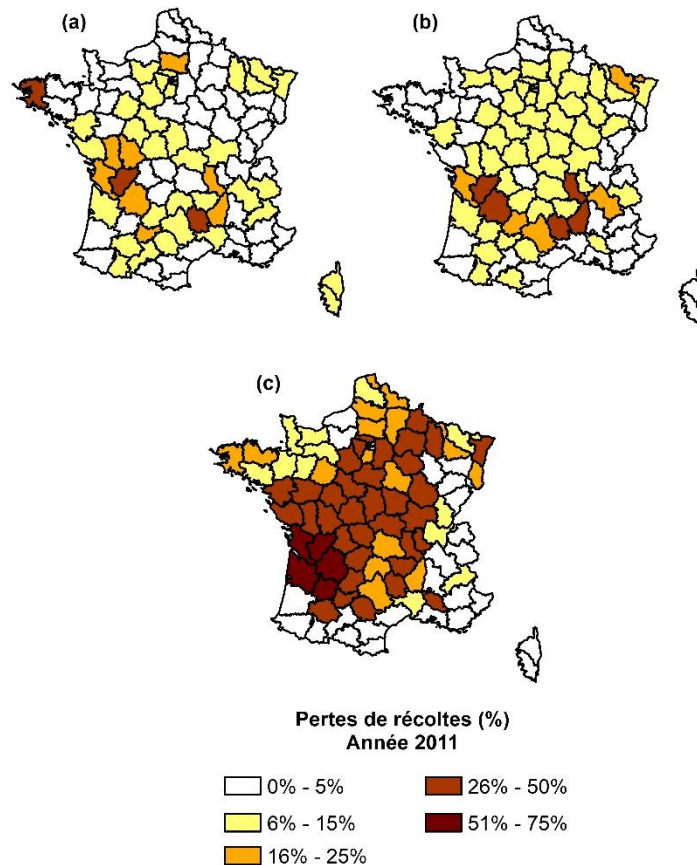


Figure 29. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2011 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hier et (c) les prairies

Dans le paragraphe III.3.1, deux hypothèses explicatives sont évoquées pour interpréter la moyenne annuelle du $DOWKI_{sech}$ entre les années 2003 et 2011 pour les prairies. La première hypothèse concerne l'étendue spatiale de la sécheresse. En regardant les cartographies de l'indice, il n'apparaît pas que la sécheresse de 2003 soit plus étendue que celle de 2011. En revanche, les deux sécheresses impactent des territoires différents. La Figure 30 présente la surface en prairies (surface toujours en herbe) par département.

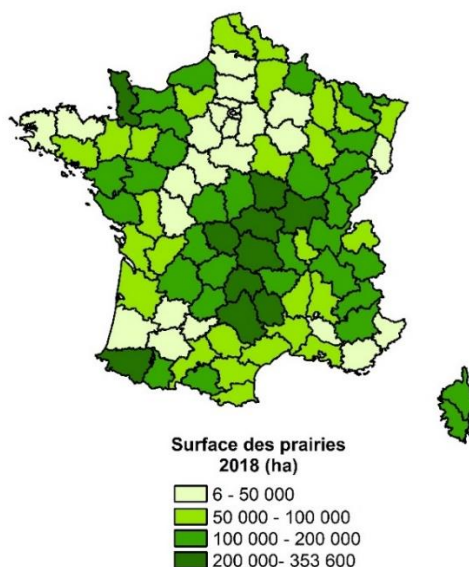


Figure 30. Surface des prairies 2018 (a) par département

D'après la Figure 30, les surfaces les plus importantes sont situées dans la région d'Auvergne, en particulier sur le Massif Central, dans le Limousin, dans la région Rhône-Alpes, ainsi que quelques départements des Pyrénées et le département de la Manche. Or, les régions d'Auvergne, Limousin et Rhône-Alpes concentrent les valeurs du $DOWKI_{sech}$ les plus extrêmes en 2003 (Figure 24). C'est pourquoi les pertes de récoltes nationales sont plus importantes en 2003 qu'en 2011 pour les prairies : la sécheresse a impacté plus de régions particulièrement productrices.

Excès d'eau de 2007

L'année de 2007 est marquée par un excès de pluviométrie printanier et estival conduisant alors à un recul de la production du blé tendre de 6% par rapport à 2006 et de 9% par rapport à la moyenne sur la période 2002-2006 (Rosenwald 2011). Pour l'orge, la production aurait diminué de 9% par rapport à 2006. A partir du mois de mai, une forte pluviométrie est enregistrée et elle ne cesse d'augmenter dans les mois suivants. Outre l'asphyxie des racines par excès d'eau, les baisses de rendement sont dues au développement de nombreuses maladies (fusariose, jaunisse) dues aux conditions climatiques (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2006).

La Figure 31 présente les valeurs du $DOWKI_{excès}$ (mm) calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver sur la grille de ré-analyse SAFRAN. La Figure 32 présente les pertes de récoltes pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver. Les valeurs de l'indice sont plus extrêmes en Bretagne, dans le département de la Manche, à l'Est, en particulier dans les départements des Vosges du Doubs et du Jura et dans le Limousin. Ces régions correspondent aux départements qui enregistrent le plus de pertes pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. Des incohérences subsistent sur les valeurs d'indice dans les départements des Alpes mais qui s'expliquent facilement : peu de surfaces en céréales sont

cultivées dans ces régions et elles sont surtout cultivées dans la plaine, soit là où les valeurs de l'indice ne sont pas extrêmes.

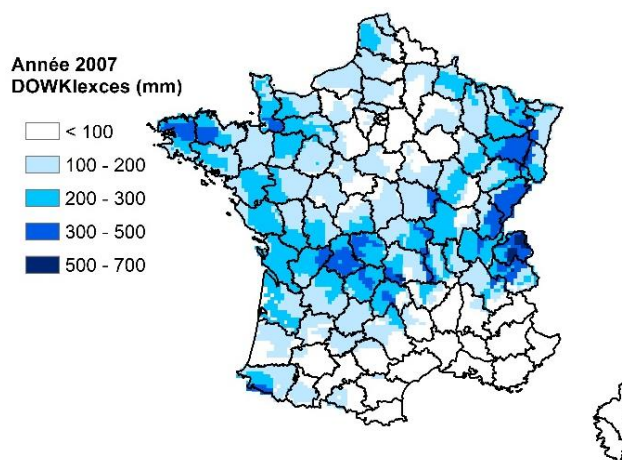


Figure 31. Cartographie des valeurs du $DOWK_{\text{exces}}$ pour l'année 2007 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver

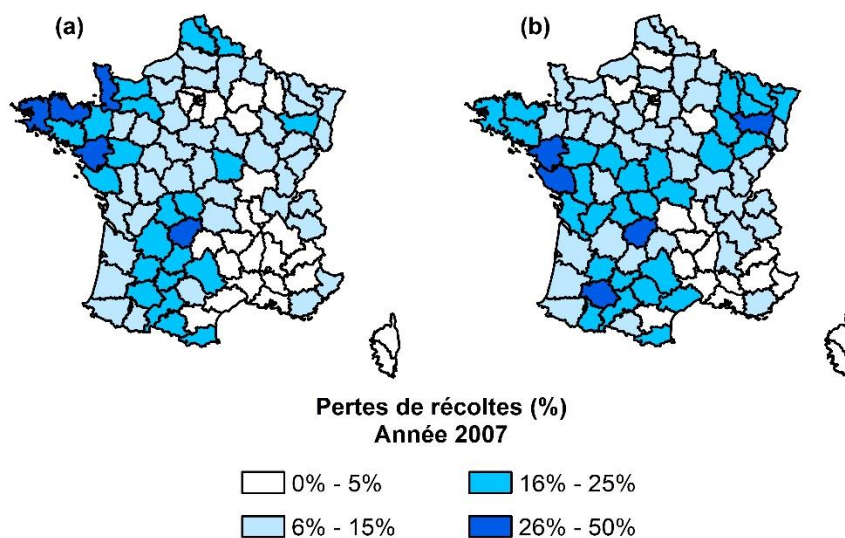


Figure 32. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2007 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver

Sur le territoire métropolitain, 85% et 89,6% des surfaces cultivées en blé tendre d'hiver et en orge d'hiver enregistrent des pertes de récoltes (>5%). Cet événement est donc étendu, plus étendu que la sécheresse de 2011 pour ces deux cultures engendrant ainsi des pertes de récoltes à l'échelle nationales plus importantes.

Sécheresse 2018

Enfin, un dernier événement est décrit : la sécheresse estivale de 2018 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018a). L'année enregistre des températures moyennes mensuelles plus chaudes que la normale à l'exception des mois de février et mars et l'été est qualifié de caniculaire. La température moyenne estivale est de 2°C supérieure à la normale et l'été 2018 est classé au 2^{ème} rang des étés les plus chauds, après 2003. La sécheresse se poursuit durant l'automne conduisant alors à une importante diminution de la production fourragère en particulier dans le Nord-Est de la France et en région Rhône-Alpes. Avant cet épisode de sécheresse et durant le printemps, la pluviométrie est excédentaire particulièrement dans le Sud de la France (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2018a). Cette année combine donc à la fois un événement de sécheresse et d'excès d'eau.

La Figure 33 présente les valeurs du $DOWKI_{sech}$ (mm) sur l'année 2018 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver (Figure 33a), pour les prairies (Figure 33b). La Figure 34 présente les pertes de récoltes pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies. Pour le blé tendre d'hiver, les pertes de récoltes enregistrées sont équivalentes à celles de 2011 sur la France métropolitaine. Pour l'orge d'hiver et les prairies, les pertes de récoltes sont inférieures à celles calculées pour les autres événements décrits de l'historique (sécheresse de 2003 et 2011 et excès d'eau de 2007 et 2016). Cet événement impacte 56,3% des surfaces en blé tendre d'hiver, 49,1% des surfaces en orge d'hiver et 77,5% des surfaces en prairies.

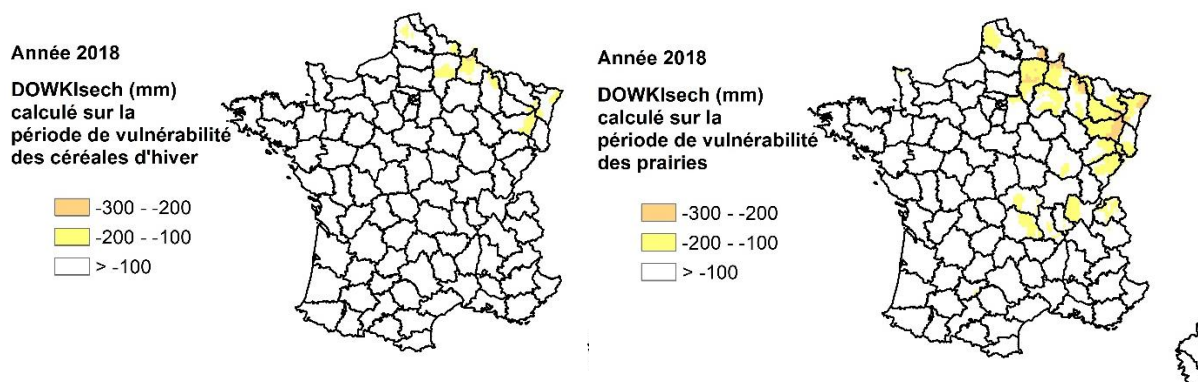


Figure 33. Cartographie des valeurs du $DOWKI_{sech}$ pour l'année 2018 calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver

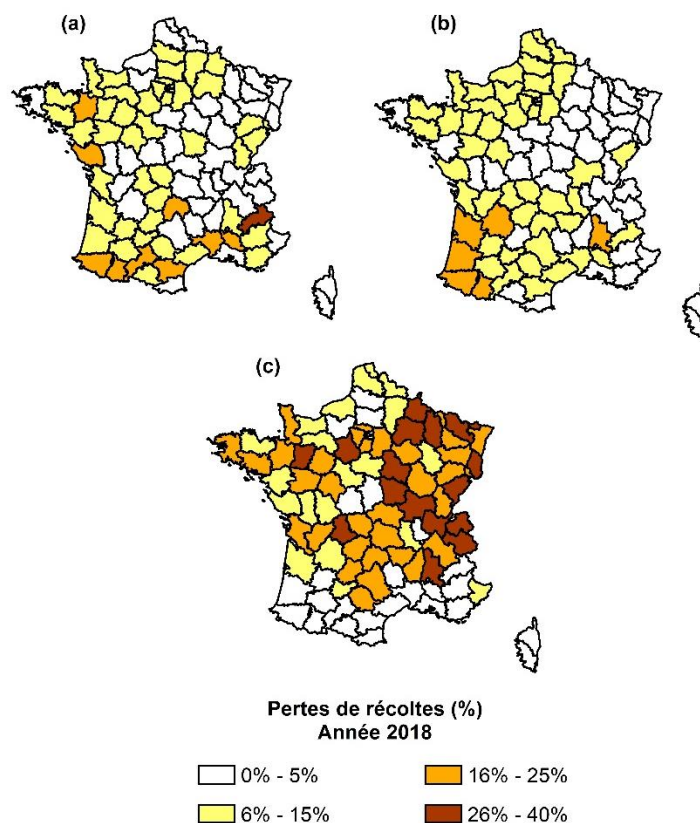


Figure 34. Pertes de récoltes calculées sur AGRESTE en 2018 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies

La sécheresse impacte principalement la région Grand-Est du territoire. Ce résultat est cohérent avec les pertes de récoltes calculées pour les prairies mais également avec la sinistralité calculée sur les exploitations agricoles assurées pour l'année 2018 (CCR 2019b). Cependant, pour les cultures céréalières d'hiver, des pertes de récoltes sont enregistrées dans le Sud-Ouest de la France. Ces pertes ne sont à priori pas dues à une sécheresse, selon les valeurs de l'indice. L'analyse du $DOWKI_{exces}$ montre des valeurs extrêmes dans le Sud de la France pour l'année 2018 comme présenté en Figure 35.

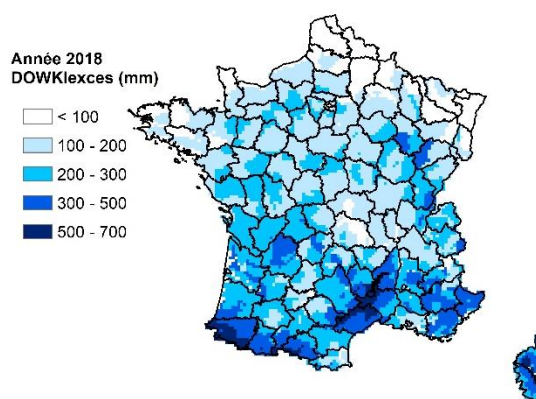


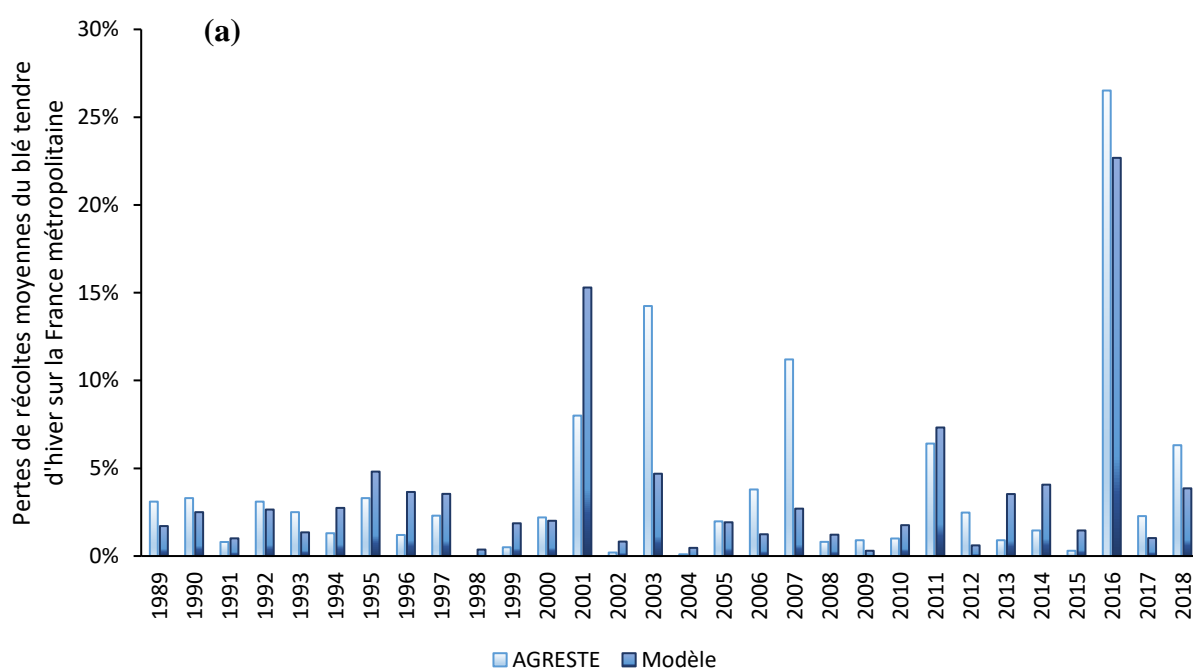
Figure 35. Cartographie du $DOWKI_{exces}$ calculé sur la grille de ré-analyse SAFRAN pour l'année 2018

De plus, l'analyse des données du FNGRA sur l'année 2018 indique des montants d'indemnisations pour le péril inondations dans le Sud-Ouest de la France. Ainsi, ces pertes de récoltes sont probablement dues à ce péril. Ainsi, l'année 2018 combine à la fois une sécheresse dans le Grand-Est de la France, et un excès d'eau dans le Sud de la France. Les pertes de récoltes des prairies sont dues à la sécheresse et celles des céréales d'hiver principalement dues à l'excès d'eau. Le *DOWKI* permet de représenter les deux périls.

Les analyses cartographiques de l'indice permettent de caractériser les aléas et donnent des renseignements supplémentaires par rapport à une analyse des valeurs à l'échelle nationale. La comparaison avec les valeurs des pertes de récoltes permet de valider le module d'aléa. De plus, l'analyse des données décennales de l'indice permet notamment d'expliquer en partie la différence de pertes de récoltes observées sur certains événements. Ainsi, le caractère physique de l'indice représentant un déficit ou un surplus hydrique est un atout pour comprendre la dynamique des pertes de récoltes et leur lien avec le climat.

III.3 Simulation des pertes de récoltes

La Figure 36 présente les pertes de récoltes sur la France métropolitaine sur la période historique (1989-2018 pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver et 2000-2018 pour les prairies) estimées par le modèle et les pertes de récoltes calculées sur AGRESTE. Ces pertes sont calculées à l'échelle départementale, pondérées par la surface pour le calcul à l'échelle nationale.



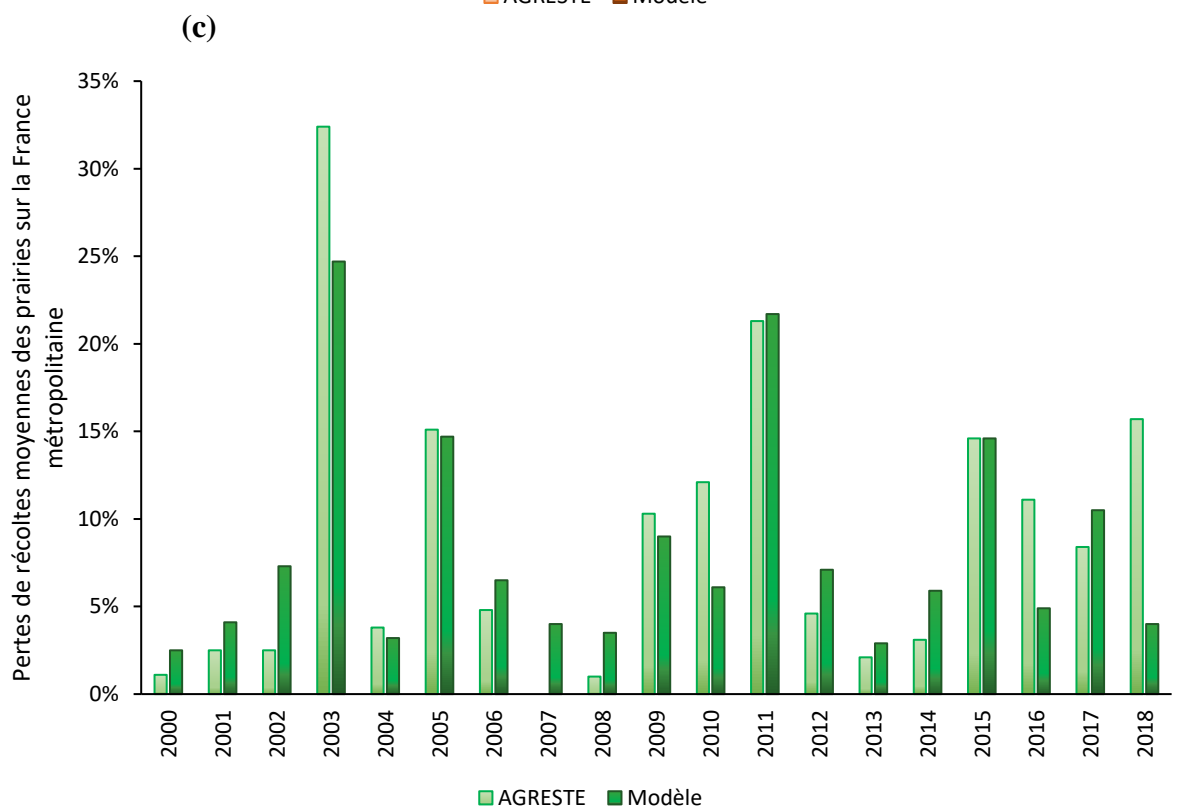
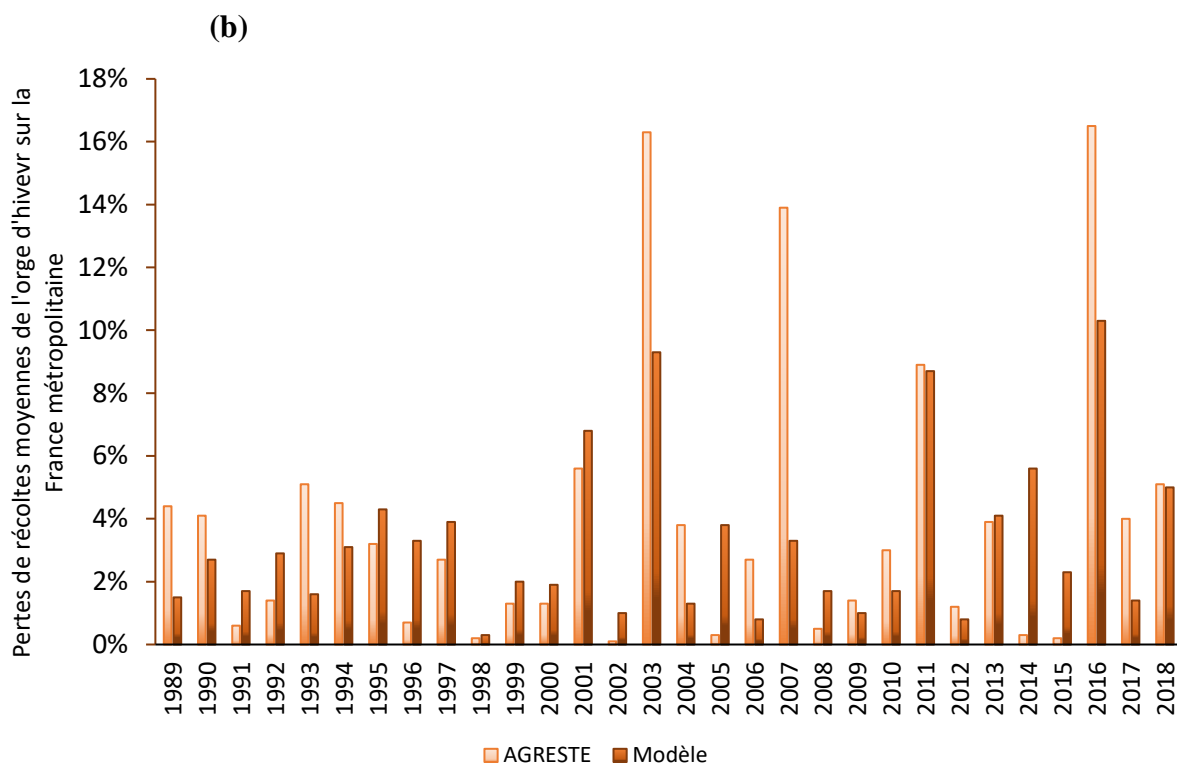


Figure 36. Moyenne des pertes de récoltes sur la France métropolitaine calculées sur AGRESTE et simulées par le modèle pour (a) le blé tendre d'hiver ; (b) l'orge d'hiver ; (c) les prairies. Les barres d'erreurs représentent les quantiles 10-90 calculés sur les pertes de récoltes départementales

Prairies

Pour les prairies, d'après la Figure 36, les sécheresses intenses de 2011 et 2003 sont correctement expliquées par le modèle. Malgré une sous-estimation des pertes de récoltes pour l'année 2003 (24,3%), cette sécheresse enregistre les pertes de récoltes simulées les plus importantes. Les pertes de récoltes les plus faibles (années 2000, 2001, 2002, 2008) sont surestimées par le modèle mais restent cependant les pertes de récoltes les plus faibles simulées. **Ainsi, la hiérarchie en termes d'intensité entre les aléas est respectée.**

Les aléas de 2005 et 2015 sont très bien simulées (erreur relative inférieure à 3%). Il s'agit de deux sécheresses ayant impactées principalement les prairies (environ 90 M€ d'indemnisations en 2005 et 135 M€ en 2015 via le FNGRA).

Le problème le plus important réside dans la simulation de la sécheresse de 2018. En effet, l'erreur relative moyenne à l'échelle de la France métropolitaine est de 74,5%. Cette sécheresse est sous-estimée. Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la sous-estimation est due au fait que le $DOWKI_{sech}$ a des valeurs non extrêmes pour cette sécheresse alors que les pertes de récoltes sont importantes. Nous avons aussi pu identifier que ces valeurs sont dues à un excès de pluviométrie durant le printemps. De plus, les valeurs de l'indice sont réinitialisées au 1^{er} janvier, ce qui signifie que l'anomalie ne tient pas compte de ce qui s'est passé avant. Or, en 2017, une sécheresse de petite ampleur a eu lieu. Les valeurs du $DOWKI$ à la fin de l'année de 2017 sont négatives. Les sols étaient anormalement secs ce qui a pu amplifier l'effet de la sécheresse de 2018 malgré l'excès de pluviométrie.

Le Tableau 4 présente l'erreur relative moyenne pour les sécheresses de 2003, 2011, 2015 et 2018 sur la France métropolitaine et à l'échelle départementale entre les pertes de récoltes calculées sur AGRESTE et les pertes de récoltes simulées par le modèle.

Tableau 4. Erreur relative moyenne à l'échelle de la France métropolitaine et départementale entre les pertes de récoltes calculées sur AGRESTE et simulées par le modèle pour les prairies

Année	Erreur relative moyenne France métropolitaine	Erreur relative moyenne départementale
2003	-24,3%	8%
2011	1,9%	37%
2015	0%	-17,8%

Sur la France métropolitaine, le modèle montre sa capacité à représenter les sécheresses extrêmes systémiques et à prédire les pertes de récoltes au niveau national, l'erreur à l'échelle départementale est plus importante. Il est important de noter que la réinitialisation de l'indice peut engendrer des incertitudes sur l'estimation des pertes de récoltes lors de sécheresses pluri-annuelles.

Blé tendre d'hiver

Pour le blé tendre d'hiver, d'après la Figure 36, deux événements sont très bien simulés : l'excès d'eau de 2016 et la sécheresse de 2011 comme présenté en Tableau 5. En revanche, la sécheresse de 2003 est sous-estimée et l'excès d'eau de 2007 également. Pour ces deux événements, les valeurs du *DOWKI* ne sont pas extrêmes dans de nombreux départements. Or, pour des valeurs faibles du *DOWKI*, la fréquence de sinistre est faible, entraînant alors une sous-estimation des pertes de récoltes simulées. C'est ce qui explique pourquoi ces événements sont sous-estimés. Pour la sécheresse de 2003, il sera important de comprendre pourquoi les valeurs du *DOWKI* sont faibles dans des départements où les pertes de récoltes sont importantes et qui concentrent une grande part de la production (région Centre). Cette discussion est présentée en dernière partie de ce chapitre. Pour l'excès d'eau de 2007, les valeurs de l'indice sont faibles, ce qui est cohérent avec les valeurs de pertes de récoltes. Cependant, dans ces classes de valeurs de d'indice, la fréquence de sinistre n'est que de 50%, conduisant alors à une sous-estimation des pertes de récoltes.

Tableau 5. Erreur relative moyenne sur la France métropolitaine et à l'échelle départementale pour les sécheresses de 2003 et 2011 et l'excès d'eau de 2016 sur le blé tendre d'hiver.

Année	Erreur relative moyenne France métropolitaine	Erreur relative moyenne départementale
2003	-67,3%	35%
2011	14,3%	20,1%
2016	-14,6%	28,1%

Cette analyse permet de cibler les caractéristiques des événements extrêmes bien simulés par le modèle, c'est-à-dire ceux qui enregistrent des pertes de récoltes élevées. En revanche, un excès d'eau comme 2007 impacte une très grande partie du territoire mais engendre des pertes de récoltes relativement faibles. Ce type d'événement, du fait des faibles fréquences de sinistres dans ces classes de valeurs d'indice n'est pas bien détecté par le modèle.

Orge d'hiver

Pour cette culture, d'après la Figure 36b, les événements extrêmes tels que l'excès d'eau de 2016, les sécheresses de 2011 et 2003 sont bien détectés dans la mesure où ils représentent les pertes de récoltes simulées les plus importantes à l'échelle nationale. Cependant, celles-ci sont sous-estimées pour l'excès d'eau de 2016 (erreur relative de -37,6%) et la sécheresse de 2003 (-42,9%). Les événements de 2011 et 2018 sont quant eux très bien simulés (erreur relative inférieure à 3%). La sécheresse de 2003 fait l'objet d'une discussion en quatrième partie et une explication a été donnée pour la sous-estimation des pertes liés à l'excès d'eau de 2007 dans les paragraphes précédents. En revanche, il faut comprendre

pourquoi l'excès d'eau de 2016 est sous-estimé pour l'orge d'hiver. L'origine de la sous-estimation provient du modèle de dommages. Les pertes extrêmes de récoltes en orge sont situées principalement dans la région Centre avec quelques départements du Nord. Pour ces départements, les valeurs du *DOWKI* sont extrêmes (supérieures à 320mm), et la fréquence de sinistre étant de 90% pour cette classe dernière classe de valeur d'indice, les pertes de récoltes simulées sont proches des pertes de récoltes réelles (erreur de 5%). En revanche, de nombreux départements (Aisne, Allier, Ardennes, Aube, Calvados, Creuse, Maine et Loire, Marne, Orne) les valeurs du *DOWKI_{exces}* sont comprises entre 200mm et 300mm. Pour cette classe de valeur d'indice, la fréquence de sinistre est de 73%. Cette fréquence de sinistre amène à sous-estimer les pertes de récoltes. Par exemple, pour l'Aisne, les pertes de récoltes simulées sont de 10% alors que les pertes de récoltes calculées sur AGRESTE sont de 23%.

Il est important alors de s'interroger sur la différence des courbes de dommages entre le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver, et notamment de comprendre pourquoi les résultats sont meilleurs sur le blé tendre d'hiver alors que les deux cultures sont similaires. L'explication vient du fait que le blé tendre d'hiver a un calibrage nord et un calibrage sud, ce qui permet notamment de bien distinguer l'excès d'eau de 2016 qui a eu lieu dans la moitié Nord de la France. Un calibrage Nord/Sud pour l'orge d'hiver n'a pas été possible du fait des surfaces cultivées trop petites pour l'orge d'hiver, qui ne permettaient pas de faire un calibrage spécifique.

Le modèle de dommages permet de faire le lien entre les pertes de récoltes et les valeurs de l'indice. Les résultats montrent qu'à l'échelle métropolitaine, le modèle permet de de simuler les événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau. En particulier, la sécheresse de 2011 est bien simulée pour les trois cultures. Pour les prairies, les sécheresses de 2015 et 2005 sont simulées correctement à l'échelle métropolitaine et la sécheresse de 2003 est légèrement sous-estimée. Le problème critique réside dans la simulation de la sécheresse de 2018 qui est discutée en quatrième partie de ce chapitre. Pour les céréales d'hiver, le problème majeur est la sous-estimation de la sécheresse 2003.

IV DISCUSSION

La première partie de cette thèse a permis de présenter la chaîne de modélisation mise en place. Un indice climatique, basé sur l'anomalie décadaire de bilan hydrique cumulée a été créé. Celui-ci représente les sécheresses extrêmes dans ses valeurs négatives et les excès d'eau extrêmes dans ses valeurs positives. Le modèle de dommages a permis de relier les valeurs départementales de l'indice (moyenne sur les mailles de 8kmx8km) avec les valeurs de pertes de récoltes départementales pour le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies. Cette méthodologie permet de simuler les pertes de récoltes à partir de variables météorologiques. Les paragraphes suivants présentent des pistes d'améliorations du modèle en vue de réduire ses incertitudes.

IV.1 Pistes d'améliorations du modèle

IV.1.1 *Les pertes de récoltes annuelles : résultat d'un ensemble de facteurs*

Les données de rendement AGRESTE sont des données annuelles. Or, les aléas de sécheresse et d'excès d'eau ne sont pas les seuls qui peuvent avoir lieu au cours de l'année et impacter les productions végétales. Dans ce cas précis, l'indice n'explique qu'une partie des pertes de récoltes, et conduit donc nécessairement à une sous-estimation de celles-ci. C'est le cas notamment pour l'année de 2003. L'étude des synthèses climatologiques et de la base de données FNGRA indique que certaines régions françaises ont subi un gel en début d'année (janvier-février) (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2003). Ce gel a eu lieu dans les régions Centre, Rhône-Alpes et présente un montant total d'indemnisations pour le FNGRA de 78 M€. Dans la région Centre en particulier, le gel a provoqué un recul des productions céréalières (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2003). Ce phénomène s'ajoute aux aléas qui ont lieu dans l'année, provoquant des pertes de récoltes.

Le phénomène est particulièrement intéressant dans la région Centre. En effet, cette région est très fortement productrice en céréales. Elle concentre 20% des surfaces en blé tendre d'hiver et 16% en orge d'hiver. La région est caractérisée par des exploitations de grande taille et une agriculture intensive. Ainsi, dans le calcul des pertes de récoltes pondérées par la surface à l'échelle nationale, cette région a un fort poids (20%) sur le calcul des pertes de récoltes à l'échelle nationale. Or, pour l'année 2003, sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver, le $DOWKI_{sech}$ n'est pas extrême et sur la région Centre ses valeurs départementales sont comprises entre -102 mm (département Indre et Loire) et -144mm (Cher). Afin d'expliquer les fortes pertes de récoltes, on fait l'hypothèse que les cultures ont été fortement fragilisées par le gel d'hiver, et la sécheresse a accentué ce phénomène conduisant alors à des pertes de rendements extrêmes. Une autre hypothèse explicative est que le gel d'hiver a empêché le développement des cultures céréalières, qui s'est réalisé plus tard. Ainsi, les cultures auraient été récoltées un peu plus tard qu'habituellement, au mois d'août. Les valeurs du $DOWKI_{sech}$ seraient alors

comprises entre -125 mm (Indre et Loire) et -236 mm (Eure-Et-Loir). Les valeurs seraient alors plus extrêmes, les cultures seraient alors plus soumises au risque de sécheresse ce qui augmenterait les pertes de récoltes.

L'ajout de l'aléa gel dans le modèle pourrait donc conduire à diminuer la sous-estimation des pertes de récoltes dans cette région, qui a un fort poids sur le calcul des pertes de récoltes à l'échelle de la France métropolitaine. En revanche, le modèle est construit sur une relation statistique entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes, et la période de vulnérabilité correspond à celle qui donne les meilleurs résultats selon le plan d'expérience sur tout l'historique. Ainsi, si la période de récolte pour l'année 2003 a été différente des autres années, elle constitue un cas exceptionnel qui explique les faux positifs mais qui peut difficilement être introduit dans le modèle sans dégrader la relation indice/pertes de récoltes pour les autres années simulées.

D'autre part, il est intéressant de s'interroger sur la simulation de l'excès d'eau de 2016. Celui-ci est très bien détecté et l'anomalie de bilan hydrique indique des valeurs extrêmes pour cet aléa. Cependant, l'aléa reste sous-estimé en termes de pertes de récoltes pour les deux céréales d'hiver étudiées. Nous avons déjà présenté des hypothèses explicatives pour l'orge d'hiver en montrant notamment les limites du modèle de dommages. Des études menées spécifiquement sur cet événement extrême ont montré que c'est encore une fois la combinaison d'un ensemble de facteurs qui a provoqué les pertes de récoltes extrêmes (Ben-Ari et al. 2018). En effet, l'excès d'eau survenu au printemps a empêché les agriculteurs de réaliser les épandages nécessaires pour le traitement contre les fongicides. Or, les précipitations couplées à des températures douces hivernales et printanières ont favorisé le développement des maladies, en particulier la jaunisse nanisante de l'orge, la septoriose et la fusariose sur le blé tendre d'hiver (Gautier 2016). Cependant, il n'existe pas aujourd'hui des modèles qui permettent de séparer les pertes de récoltes dues à l'excès d'eau et celles dues aux maladies.

Ainsi, le rendement annuel des productions végétales est expliqué par un ensemble de facteurs et le modèle n'en explique qu'une partie. L'ajout d'autres variables comme l'évolution de la température (température moyenne, température minimale) décadaire pourrait être un levier d'amélioration du modèle. Il permettrait de prendre en compte le gel et d'autre part le caractère atypique de l'année 2016. L'ajout des températures nécessite donc la création d'un indice de température qui viendrait en complément de l'indice d'anomalie de bilan hydrique et donc un nouveau calibrage du modèle pour intégrer ce paramètre.

IV.1.2 Insuffisance du bilan hydrique à expliquer toutes les pertes dues à la sécheresse

D'après les résultats obtenus, l'anomalie du bilan hydrique semble être un indicateur robuste pour représenter les pertes de récoltes dues à la sécheresse. Cependant, il pourrait être insuffisant dans certains cas. Outre, le stress hydrique, en cas de sécheresse, les cultures peuvent être soumises à un stress thermique, comme en 2003 où les températures ont excédé 30°C. Le paramètre de température est pris en compte dans le calcul de l'ETP avec l'équation de Penman-Monteith, mais nous pouvons nous poser la question si cela est suffisant pour représenter le stress thermique. En cas de stress thermique, la taille des grains est réduite, limitant ainsi le rendement (ARVALIS 2015). Par ailleurs, les fortes chaleurs, couplées au stress hydrique, provoquent un échauffement des tissus exposés au soleil conduisant alors à l'arrêt de la photosynthèse et donc du développement de la plante et peut engendrer l'embolie des vaisseaux de xylème. En 2003, par exemple, les céréales d'hiver ont subi un ralentissement de leur cycle de développement en raison du gel de début d'année et les stades de développement critique (floraison, remplissage des grains) ont donc été très sensibles à la vague de chaleur estivale. L'accumulation du gel, du stress hydrique combiné au stress thermique explique les pertes de récoltes extrêmes pour l'année 2003, phénomènes qui ne sont pas représentés par les valeurs du *DOWKI*.

IV.1.3 L'existence de cycles de sécheresses

Le *DOWKI* est un indice climatique qui est réinitialisé au premier janvier de chaque année ce qui permet de définir les événements extrêmes à partir d'une valeur seuil de l'indice. Par ailleurs, la réinitialisation permet également de comparer les différents événements entre eux en ayant des références communes de valeur d'indices. Cependant, ce processus de réinitialisation n'est pas représentatif de la réalité. En effet, une sécheresse durant une année peut perdurer durant l'automne et l'hiver. Dans ce cas précis, au début de l'année civile suivante, les sols sont secs et l'anomalie de bilan hydrique cumulée est déjà négative. Cet effet peut accentuer les événements qui surviennent dans l'année et provoquer une augmentation des pertes de récoltes qui n'est pas nécessairement expliquée par le modèle. C'est le cas pour la sécheresse de 2018. En effet, une sécheresse de petite ampleur a eu lieu en 2017. L'étude de l'anomalie cumulée décadaire du bilan hydrique montre des valeurs négatives pour la dernière décade de 2017. Cette anomalie hydrique négative, combinée avec la dynamique de sécheresse de l'année 2018 pourrait expliquer les pertes de récoltes importantes des prairies, alors que l'indice ne détecte pas d'événement de sécheresse.

IV.1.4 La vulnérabilité des cultures modifiées par les pratiques de prévention et la gestion culturale

La base de données AGRESTE sur les productions végétales permet d'obtenir des informations de surface et de rendement par département. En revanche, sur les surfaces cultivées nous n'avons pas

d'informations sur le pourcentage des surfaces irriguées, les rendements pour ces surfaces hormis pour le maïs ou la distinction des rendements et surfaces irriguées et non irriguées est disponible depuis 2000. De plus, les pratiques culturales ainsi que les aléas qui surviennent en dehors de la période de vulnérabilité peuvent modifier celle-ci, ce qui peut conduire alors à une fausse relation entre les valeurs de l'indice et les pertes de récoltes. Par exemple, si un excès d'eau survient au cours des mois d'octobre-novembre, l'agriculteur ne peut pas travailler la terre pour semer les récoltes ce qui décale nécessairement la période de vulnérabilité de la culture. Celle-ci est semée plus tard et donc récoltée plus tard. La culture va donc alors passer plus de temps au champ en période estivale, ce qui en cas de sécheresse peut provoquer une augmentation des pertes de récoltes. Ainsi, le modèle que nous avons développé est un modèle à grande échelle, statistique, qui fonctionne de manière globale France entière. Cependant, au département, pour augmenter la relation entre l'indice et les pertes de récoltes, il est nécessaire d'obtenir des informations plus précises sur les conduites culturales et l'ensemble des facteurs extérieurs survenus au cours du temps. Par exemple, à l'échelle de la France, les cultures sont relativement peu irriguées. L'irrigation représente 3,6% des surfaces pour les céréales à paille d'après le recensement agricole 2010 (Loubier, Campardon, et Morardet 2013) ce qui n'influence donc pas de manière significative les résultats à l'échelle nationale. Cependant, les pratiques d'irrigation ne sont pas homogènes sur le territoire métropolitain et ce même rapport indique que les taux d'irrigation sont plus importants dans le Sud-Ouest, en région Centre et en Alsace. C'est pourquoi, à l'échelle du département, les pratiques d'irrigation peuvent entraîner des incertitudes importantes.

Dans cette thèse, une relation entre les pertes de récoltes et l'anomalie de bilan hydrique est construite par nature de récolte, considérant toute chose égale par ailleurs, c'est-à-dire qu'aucun paramètre hormis les variables climatiques n'évolue dans le temps. Cette hypothèse exclurait donc la prise en compte de l'adaptation des cultures elles-mêmes et des agriculteurs. Cette exclusion de l'adaptation est discutable. Le modèle est construit sur un historique de 30 ans, années pendant lesquelles l'agriculture a constamment évolué aussi bien au niveau des espèces cultivées que des pratiques culturales. Ainsi, une certaine partie de l'adaptation est prise en compte dans le calcul des pertes de récoltes. Utiliser comme référence de rendement la moyenne olympique glissante sur 5 ans, permet de prendre en compte par exemple l'augmentation des rendements dans le temps grâce aux progrès techniques et génétiques. De plus, ce travail de thèse est spécifiquement sur les extrêmes climatiques, limitant alors les effets de la résistance des espèces. En 2003 par exemple, l'ensemble des grandes cultures ont été impactées par cette sécheresse extrême avec des pertes de récoltes grande ampleur, alors même que certaines espèces comme le sorgho sont connues pour être plus résistantes au risque de sécheresse (Amigues et al. 2006).

D'autre part, le modèle prend en compte la période de vulnérabilité des cultures. Dans le modèle, celle-ci est déterminée avec le plan d'expérience et correspond à celle qui présente les meilleurs résultats sur France entière et qui correspond à la présence des cultures sur le champ. Cependant, si les dates de semis et de récolte étaient précisément connues, elles pourraient être directement implémentées dans le

modèle. De même qu'on pourrait envisager des scénarios de modification des pratiques culturales par décalage des dates de semis et de récolte et l'impact de ces pratiques sur les pertes de récoltes. De plus, l'indice climatique est calculé sur toute la France en tenant compte donc de la période de vulnérabilité des cultures et de la localisation des parcelles agricoles. Les résultats du chapitre suivant permettent de donner une évolution de l'intensité de l'anomalie de bilan hydrique géographique, en mettant en évidence des régions particulièrement impactées. Dans ce cadre, il est possible de faire des hypothèses d'évolution de surfaces de la ferme France à horizon 2050 (changement de latitude de certaines cultures par exemple) et d'analyser les conséquences en termes de pertes de récoltes et de coûts économiques.

Ainsi, cette thèse constitue une première étude de l'impact du changement climatique sur les céréales d'hiver et les prairies mais des perspectives peuvent être envisagées, basée sur le modèle développé, notamment sur des mesures d'adaptation comme le décalage des dates de semis et de récoltes, la modification des surfaces cultivées suivant la latitude.

IV.1.5 Une amélioration de la relation indice/pertes de récoltes par la normalisation de l'indice

De nombreux indices étudiés comme le SPI ou le SPEI sont normalisés (S. Vicente-Serrano, Beguería, et Lopez-Moreno 2010). Cette normalisation suppose que les valeurs de l'indice n'étant pas physiques, un tableau explicatif relie toujours les valeurs de l'indice à ce qu'elles signifient en termes de péril climatique (par exemple sécheresse extrême, sécheresse peu intense, etc.). En effet, ces valeurs constituent en elles-mêmes une boîte noire, dans la mesure où elles ne représentent pas des valeurs physiques de déficit hydrique. Néanmoins, la normalisation est souvent retenue pour pouvoir comparer les valeurs de l'indice entre elles sur un vaste territoire dont les climats sont différents et parce qu'elle améliore souvent les résultats.

Cependant, cette méthodologie n'a pas été retenue pour la suite du travail. En effet, la normalisation pose plusieurs questions : quelle référence choisir pour réaliser cette normalisation à horizon 2050 ? Faut-il considérer la période historique comme la période de référence ou celle du climat 2000 ? Ou bien réaliser la normalisation sur les données de l'indice en 2050 par rapport aux données de 2050 ? Considérer un scénario médian ? La question se pose de savoir si un même pourcentage de déficit hydrique à climat 2000 est comparable à climat 2050. L'utilisation d'un indice représentant le déficit hydrique de manière physique (en mm) permet de s'astreindre de ces contraintes et de discuter des valeurs mêmes de l'indice. Une évolution de 50% de l'anomalie du déficit hydrique a un sens lorsqu'on parle des valeurs de l'indice physique alors qu'elle peut ne pas être comparable avec un indice normalisé suivant la référence choisie pour normaliser l'indice. Par ailleurs, la normalisation de l'indice peut être réalisée assez facilement à l'échelle de la France métropolitaine mais elle est plus difficile à mettre en œuvre à l'échelle du département du fait d'un nombre plus restreint de données à cette échelle.

Cependant, des perspectives sur ces travaux pour étudier la corrélation entre les pertes de récoltes et l'indice normalisé et intégrer la normalisation de l'indice dans le calibrage du modèle (si elle améliore les résultats) pourraient être envisagées pour améliorer cette relation et obtenir de meilleurs résultats de simulation.

IV.1.6 Les incertitudes liées au calcul du rendement de référence

Dans la première partie de ce chapitre, il a été démontré que beaucoup d'études ont été réalisées pour calculer un rendement de référence. Il a été choisi d'utiliser la moyenne Olympique de rendement car celle-ci permettait d'avoir une méthodologie homogène pour les trois cultures étudiées et sur l'intégralité des départements. De plus, cette méthodologie est actuellement utilisée dans le système de gestion des risques en agriculture. Cependant, cette méthodologie peut être discutée et elle peut entraîner des biais sur le calcul du rendement de référence. Certaines études utilisent un rendement de référence calculé dans un cas hypothétique où la culture n'est soumise à aucune contrainte environnementale (Harsányi et al. 2021). Une étude menée en Chine propose de calculer les rendements de référence des cultures en éliminant des biais qui peuvent être introduits par des facteurs non climatiques et qui sont source de variabilité des rendements tels que la mécanisation, l'utilisation des intrants, les pratiques d'irrigation, etc. Pour ce faire, les séries chronologiques de rendement sont transformées en séries de résidus de rendement normalisés (Mokhtar et al. 2021). Il serait intéressant d'utiliser cette approche pour calculer les rendements de référence et de faire une analyse de sensibilité du calcul des pertes de récoltes par les deux approches.

IV.2 Application de la prédiction des pertes de récoltes à l'échelle nationale

IV.2.1 Sur le court terme : évaluation des besoins en assurance et mobilisation du FNGRA

Le *DOWKI* permet de faire le lien entre le climat et les pertes de rendement agricoles. Il est calculé sur la période de vulnérabilité des cultures, ainsi pour les céréales d'hiver, l'estimation des valeurs du *DOWKI* peut être réalisée à la fin de l'été (mois d'août) de l'année en cours et pour les prairies à la fin du mois de septembre de l'année en cours (fin septembre). Grâce au modèle de dommages, il est possible, avant la fin de l'année civile de donner des estimations du coût des événements climatiques survenus au cours du temps. Cette première estimation peut être d'un fort appui pour évaluer le montant de l'indemnisation via le FNGRA et les besoins en assurance. Dans le cadre du système de gestion des risques en agriculture, l'assurance est subventionnée par l'Etat. Avec ce type de modèle, CCR peut fournir à l'Etat une estimation du montant des pertes totales, une estimation de l'indemnisation via le FNGRA et une estimation de la sinistralité assurantielle.

IV.2.2 Sur le long terme : impact du changement climatique

Le *DOWKI* peut être utilisé sur le long terme pour calculer l'impact du changement climatique sur les productions végétales comme démontré dans le chapitre suivant de la thèse. L'indice est simple à calculer et n'utilise que deux variables d'entrées ce qui permet de le calculer sur tout type de territoire et d'utiliser plusieurs modèles climatiques qui simulent l'évolution du climat à horizon futur. Le calcul de l'indice à horizon futur même sans réaliser le calibrage du modèle permet de donner une estimation de l'anomalie du bilan hydrique cumulée dans le futur et ainsi de l'intensité des événements climatiques extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau avec comme hypothèse que le lien entre l'indice et les pertes de récoltes est identique en 2050. Ces études sur le changement climatique permettent de prédire les événements auxquels seront confrontés les agriculteurs de demain et ainsi, en connaissance de ces risques, de mettre en place des mesures de prévention adaptées. Avant même de parler d'adaptation, les études sur l'impact du changement climatique permettent une anticipation des conséquences des risques climatiques. Par exemple, la mise en évidence d'un territoire particulièrement exposé au risque de sécheresse dans l'avenir peut conduire à la mise en place de canaux d'irrigation ou de barrages hydroélectriques ce qui peut nécessiter plusieurs années de construction. Les agences régionales de l'eau ont besoin de visibilité pour anticiper ce type d'aménagement du territoire qui sont possibles grâce à ce type d'études.

De plus, l'agriculture est un secteur particulièrement soumis aux risques climatiques. Or ce secteur contribue à 3,4% du Produit Intérieur Brut et contribue largement à l'économie du pays, à l'aménagement du territoire et à la gestion de l'environnement. L'adaptation au changement climatique constitue pour les agriculteurs un défi majeur. Les modèles d'impact peuvent servir de guide pour aider les agriculteurs, les régions et les états sur la réflexion des stratégies de gestion des risques. Plusieurs voies d'adaptations sont aujourd'hui exposées et s'articulent à différents niveaux sur le territoire métropolitain comme l'ont démontré les trois groupes de travail du Varenne de l'eau. L'adaptation prend différentes formes, que ce soit une réforme de la gestion des risques en agriculture, une mobilisation des acteurs sur le territoire pour la formation à la gestion des risques dès l'installation, un changement des pratiques culturales dans les rotations ou dans les dates de semis et de récoltes, la culture de nouvelles variétés plus résistantes. Aujourd'hui, il n'existe pas une réponse unique à l'adaptation au changement climatique et aux stratégies d'adaptation s'ajoutent des facteurs économiques, politiques environnementaux et sociétaux qui peuvent avoir un rôle de catalyseur ou au contraire de frein dans les stratégies d'adaptation choisies. Ainsi, les simulations agro-climatiques sur le long terme sont essentielles pour fournir des informations chiffrées sur l'impact du changement climatique, anticipant les risques et défiant leur caractère incertain.

V CONCLUSION

Ce chapitre présente le développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes à partir de données météorologiques sur une période de 30 ans de l'historique. Les simulations du module de l'aléa ont fait l'objet de nombreuses vérifications, par comparaison avec les pertes de récoltes mais également par une analyse cartographique de l'indice et de ses valeurs décennales lorsque des incohérences étaient observées. Les simulations des pertes de récoltes par ce modèle représentent les phénomènes du passé de manière robuste pour les prairies. Pour les céréales d'hiver, les résultats montrent des erreurs importantes qui s'expliquent par l'analyse de l'ensemble des événements survenus dans l'année et par les pratiques des agriculteurs. Les limites mises en évidence constituent des pistes d'amélioration de la chaîne de modélisation : intégration d'autres aléas comme le gel, et des informations sur les pratiques culturales.

Ce modèle d'impact constitue un outil pour évaluer le niveau de pertes de récoltes dues aux aléas de sécheresse et d'excès d'eau à l'échelle de la France métropolitaine. Les cartographies de l'indice permettent de mettre en évidence les territoires particulièrement exposés. Ces résultats permettent de donner des éléments chiffrés sur l'exposition aux risques de l'agriculture française sur lesquels peuvent s'appuyer les acteurs de la gestion du risque pour façonner les politiques publiques. L'indice climatique développé utilise peu de paramètres d'entrée et son seul paramètre variable est la période sur laquelle il est calculé pour sa valeur annuelle. La méthodologie établie est donc transposable sur tout type de territoire.

L'analyse sur l'historique montre deux sécheresses extrêmes historiques dont les temporalités sont différentes : la sécheresse estivale de 2003 et celle de 2011, printanière. Un excès d'eau engendrant des records de pertes de récoltes pour les céréales à paille en 2016 a également été étudié. Ces événements vont servir de référence pour caractériser la fréquence et l'intensité des événements extrêmes à horizon 2050 dans le prochain chapitre.

**PARTIE II : ETUDE DE
L'IMPACT DU
CHANGEMENT
CLIMATIQUE SUR LES
PRODUCTIONS
VEGETALES EN FRANCE**

CHAPITRE 1 : MODELISATION A HORIZON 2050 DES RISQUES EXTREMES CLIMATIQUES ET LEURS CONSEQUENCES SUR LES PERTES DE RECOLTES

Les dernières décennies sont marquées par des changements de précipitations, de température, de fonte des glaces ce qui affecte les ressources en eau en qualité et en quantité (IPCC 2014). Sur les productions végétales, les projections climatiques auraient des conséquences différentes sur les rendements des cultures selon les régions sur les principales productions, soit le blé, le maïs et le riz (IPCC 2022). Sur le territoire européen, le GIEC indique que les effets du climat sur les rendements sont contrastés (IPCC 2014; 2022). Les projections climatiques indiquent globalement une diminution des rendements en raison des événements extrêmes, en particulier les précipitations extrêmes et les vagues de chaleur (IPCC 2012). Cependant, dans les latitudes du Nord de l'Europe, les nouvelles technologies couplées à l'augmentation de la photosynthèse liée à l'accroissement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone pourraient avoir des effets bénéfiques sur les productions agricoles (IPCC 2022). Des études d'INRAE sur le sujet indiquent qu'en France, les rendements moyens du blé pourraient augmenter de 2,5% à 5,7% avec le changement climatique (Seguin et Soussana 2006; Seguin 2008).

Ainsi, il n'existe pas de réponse universelle sur les conséquences du changement climatique sur les rendements agricoles et les résultats dépendent du territoire étudié et du prisme par lequel la problématique est analysée (analyse des tendances moyennées, focalisation sur les queues de distribution). Les experts s'accordent sur l'augmentation des vagues de chaleurs extrêmes et des précipitations intenses dans le futur (IPCC 2012; 2022). Ces événements ont par le passé engendré des pertes de récoltes très importantes et c'est pourquoi leur étude est nécessaire pour comprendre l'impact du changement climatique sur les territoires. De plus, cette thèse a pour application la gestion des risques en agriculture en évaluant l'équilibre financier du coût des dommages entre l'Etat et les assureurs en cas de risque climatique extrême puisque ce sont précisément ces risques dont la gestion impliquent l'ensemble des acteurs. Caractériser les événements climatiques extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau, revient alors à définir leur intensité et leur fréquence, par rapport à une situation de référence. Il s'agit alors d'étudier l'aléa mais également ses conséquences sur les pertes de récoltes.

Ce chapitre pose les questions suivantes :

- **La période historique 1989-2018 contient-elle les événements les plus extrêmes sur le climat actuel et si ce n'est pas le cas, comment les caractériser ?**
- **Quelle est la probabilité d'occurrence de ces événements de référence dans le passé sous les conditions climatiques actuelles ?**
- **En raison du changement climatique, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes de sécheresses et d'excès d'eau vont-elles évoluer dans le futur et quelles seraient les conséquences sur les pertes de récoltes ?**

À partir de la méthodologie établie dans la partie I, ce chapitre analyse l'évolution des sécheresses et excès d'eau extrêmes, de l'aléa jusqu'aux pertes de récoltes à horizon 2050. Ce chapitre débute par la description des scénarios du GIEC et une revue de l'état de l'art sur les conséquences du changement climatique sur l'agriculture en France. En deuxième partie, la méthodologie des projections climatiques est présentée avec l'utilisation du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Afin de répondre aux questions posées, l'analyse des résultats se concentre sur les queues de distributions des aléas de sécheresses et d'excès d'eau et des pertes de récoltes des cultures. Les résultats sont présentés en trois parties : l'analyse des risques extrêmes de sécheresse, elle se poursuit par celle sur les excès d'eau et se termine sur une brève analyse des événements cumulant les deux risques sur le territoire et la dépendance des deux périls. La discussion a pour objet le choix d'un modèle climatique unique et la question des périodes de référence choisies pour calculer l'indice climatique.

I ETAT DE L'ART

I.1 Le changement climatique

I.1.1 La définition des scénarios

Dans son rapport de 2014, le GIEC établit que les émissions de gaz à effet de serre sont une des causes principales du réchauffement climatique et alerte sur le fait qu'à terme, il y aurait « des conséquences importantes, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes » (IPCC 2014). Le GIEC indique donc que pour limiter ce dérèglement climatique, il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), dont l'origine est très fortement anthropique. A partir de ce constat, plusieurs scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) sont établis et décrivent des voies différentes de développement du XXI^{ème} siècle en fonction des concentrations atmosphériques de GES, de polluants atmosphériques et en fonction de l'adaptation des terres. Initialement, quatre scénarios sont construits, mais les derniers rapports du GIEC présentent deux nouveaux scénarios. Les scénarios permettent d'évaluer les coûts et les avantages des objectifs climatiques sur le long terme (jusque l'an 2100) et de discuter du rôle de l'adaptation au changement climatique. Leur nom provient de la gamme de forçage radiatif obtenue pour l'année 2100. Les scénarios sont les suivants :

- **RCP 2.6** : il correspond à un scénario strict d'atténuation. Le réchauffement climatique demeurerait probablement inférieur à 2°C dans ce scénario et un pic de forçage radiatif à 3 W.m⁻² est enregistré avant de décliner jusqu'à 2.6 W.m⁻² vers 2100. Ce scénario permet de respecter les accords de Paris sur le changement climatique de décembre 2015.
- **RCP 4.5** : Ce scénario intermédiaire prévoit une stabilisation des émissions autour de 4.5 W.m⁻² (soit 650 ppm équivalent CO₂) après 2100.
- **RCP 6.0** : Ce scénario intermédiaire prévoit une stabilisation des émissions autour de 6 W.m⁻² (soit 850 ppm équivalent CO₂) après 2100.
- **RCP 8.5** : Ce scénario correspond à des émissions de GES très importantes, soit une augmentation progressive menant à 8.5 W.m⁻² (soit 1370 ppm équivalent CO₂) vers 2100. Il a été initialement construit pour décrire une situation excluant toute politique de régulation du climat.

De plus, dans ses derniers rapports, le GIEC étudie deux derniers scénarios, un scénario 1.9 d'atténuation stricte et un scénario intermédiaire entre le RCP 6.0 et le RCP 8.5 : le RCP 7.0.

L'augmentation des températures par rapport à la période 1850-1900 à horizon 2050 et à horizon 2100 selon les scénarios est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6. Augmentation des températures annuelles moyennes (intervalle de confiance) selon le GIEC à horizon 2050 et horizon 2100 selon les différents scénarios RCP par rapport à la période de référence 1986-2005 (IPCC 2021)

Augmentation des températures	Horizon 2050	Horizon 2100
RCP 2.6	[1,3°C-2,2°C]	[1,3°C-2,4°C]
RCP 4.5	[1,6°C-2,5°C]	[2,1°C-3,5°C]
RCP 7.0	[1,7°C-2,6°C]	[2,8°C-4,6°C]
RCP 8.5	[1,9°C-3°C]	[3,3°C-5,7°C]

Il existe une relation quasi linéaire entre les émissions cumulées de CO₂ et l'augmentation de la température à la surface du globe. Les études sur les GES montrent une augmentation non seulement du CO₂ mais également du méthane et de l'oxyde nitreux à horizon 2100. L'augmentation est plus importante pour le scénario 8.5 pour les trois GES. D'après certains auteurs (van Vuuren et al. 2011), les effets sur le dioxyde de carbone et sur le méthane sont plus importants entre le scénario 8.5 et le scénario 2.6 que pour l'oxyde nitreux.

D'après le Tableau 6, seul le scénario 2.6 est en mesure de maintenir le réchauffement climatique sous le seuil des 2°C. Pour atteindre cet objectif, les émissions totales cumulées de GES ne doivent pas dépasser 1500 gigatonnes de carbone d'ici 2100. Or, les émissions de carbone augmentent chaque année et en 2011, 531 gigatonnes sont déjà cumulées (calcul sur la période 1870-2011 avec 35 gigatonnes uniquement pour l'année 2011). Il faudrait réduire les émissions de carbone de 10% à chaque décennie pour atteindre l'objectif du seuil de 2°C d'augmentation de température. En 2019, la température de la France montre une augmentation de 1,8°C par rapport à la période 1961-1990 (Baude et al. 2021).

Les différentes études montrent une augmentation des précipitations moyennes annuelles dans les hautes latitudes et une diminution dans les basses latitudes en particulier dans les régions tropicales (IPCC 2022).

Pour l'agriculture, un paramètre important à prendre en compte est la disponibilité de la ressource en eau puisque nous avons vu dans le chapitre précédent que les rendements des cultures sont fortement influencés par le bilan hydrique de la plante. Il s'agit alors de quantifier l'impact du changement climatique sur les écoulements en rivière et l'humidité du sol. Les écoulements permettent de donner des éléments chiffrés sur l'eau disponible pour l'irrigation des cultures et l'humidité du sol permet de caractériser les déficits hydriques de surface. Des études montrent que selon le scénario RCP 8.5, les ressources en eau à horizon 2100 diminueront très probablement dans le Sud de l'Europe (diminution des débits annuels moyens des rivières jusqu'à 40%) et qu'elles augmenteront dans les hautes latitudes (augmentation des débits annuels moyens jusqu'à 40%) par rapport à la période 1976-2005 (Alfieri et al. 2015; Rojas, Feyen, et Watkiss 2013; Dankers et Feyen 2008; 2009). D'autres études réalisées spécifiquement sur la France comme le projet Explore 2070, initié par le Ministère de l'Ecologie, du

Développement Durable et de l'Énergie, montrent une diminution des débits annuels moyens de 10% à 40% entre la période 1961-1990 et l'horizon 2050 (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie 2012). Les valeurs les plus extrêmes se situeraient dans le Sud-Ouest de la France avec une diminution comprise entre 40% et 50% (Chauveau et al. 2013). (Dayon et al. 2018) montrent que les résultats sont encore plus préoccupants si on s'intéresse à l'évolution des débits estivaux à horizon 2100 sous le scénario 8.5 : il est observé une diminution de 40% des débits estivaux sur la Loire, territoire déjà sous tension sur le partage de la ressource en eau. Enfin, les études sur l'évolution de l'humidité du sol montrent une diminution de 2mm sur l'ensemble du territoire français à horizon 2100 sous le scénario RCP 8.5 (Collins et al. 2013).

Ces travaux mettent en évidence un assèchement généralisé accompagné d'une diminution de la ressource en eau disponible en France à horizon futur, notamment pour l'agriculture.

1.1.2 L'évolution des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau

Au-delà des analyses sur les tendances des différents indicateurs (températures et précipitations moyennes, débits annuels moyens etc.) des études ont été réalisées sur l'évolution des événements extrêmes, notamment de sécheresses ou vagues de chaleur et de fortes précipitations.

Par définition, les événements extrêmes sont rares, ce qui signifie que peu de données sont disponibles pour faire des études de fréquence et d'intensité. Le GIEC insiste sur ce point : « plus l'événement est rare et plus il est difficile d'identifier des changements sur le long terme » (IPCC 2012).

Les vagues de chaleur extrêmes dans le monde vont augmenter en intensité, en fréquence et dureront plus longtemps dans le futur (IPCC 2012; 2022). Le même constat est fait sur la France métropolitaine (J. P. Vidal et al. 2012). Des études réalisées avec les simulations EURO-CORDEX sur le territoire métropolitain montrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses extrêmes aussi bien sur le scénario RCP 4.5 que sur le scénario RCP 8.5 à horizon 2100 (Ouzeau et al. 2016; J. M. Soubeyrou et al. 2021). Plusieurs études ont été réalisées sur le territoire métropolitain pour analyser l'évolution des sécheresses extrêmes à horizon futur. Elles se basent sur des variables météorologiques telles que les températures extrêmes (par exemple nombre de jours dont la température dépasse 30C°) (J. M. Soubeyrou et al. 2021) mais également sur des indicateurs climatiques comme le SWI (J. M. Soubeyrou et al. 2011; J.-M. Soubeyrou et al. 2012; J. M. Soubeyrou et al. 2021). Les résultats montrent une augmentation de la fréquence des sécheresses, notamment agricoles, avec une expansion de celles-ci bien plus importante que sur le passé et ce dès l'horizon 2050. Par ailleurs, les résultats sont encore plus marqués à horizon 2100. D'autres études réalisées sur des territoires plus larges, le continent Européen par exemple, montrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses extrêmes sur l'ensemble du territoire et encore plus marquée sur la Méditerranée (Forzieri et al. 2016;

Spinoni et al. 2018). Ainsi, l'exposition au risque de sécheresse n'est pas homogène sur les territoires à horizon futur et des études réalisées sur le territoire métropolitain montrent une surexposition au risque de sécheresse moyen du pourtour Méditerranéen (J.-M. Soubeyrou et al. 2020). Enfin, (Russo et al. 2014) montrent que des événements comme la sécheresse de 2003 qui sont aujourd'hui des événements rares, pourraient devenir « la norme » à horizon futur.

Il est important de comprendre comment le changement climatique peut affecter la distribution des événements de sécheresse. Les différentes études montrent une augmentation des risques de sécheresses extrêmes qui constituent les queues de distributions. Considérant alors la distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ en fonction de leur probabilité d'occurrence, cela voudrait dire que l'aire sous la courbe au niveau des valeurs extrêmes du $DOWKI_{sech}$ augmente. Les différentes hypothèses qui peuvent conduire à une augmentation des événements extrêmes sont présentées en Figure 37.

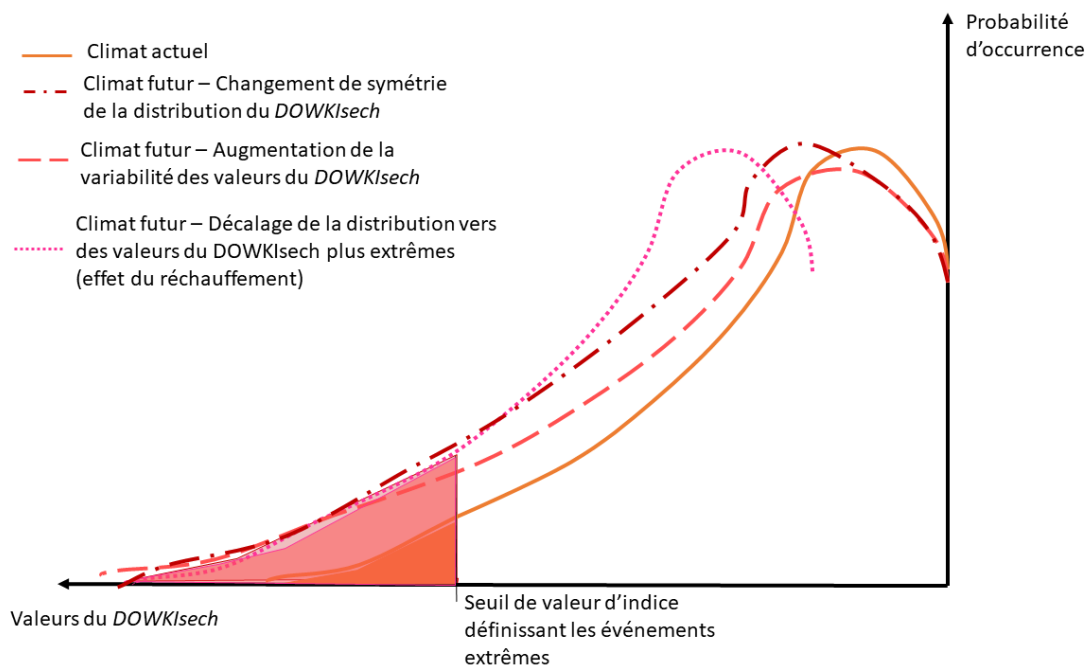


Figure 37. Hypothèses de l'effet du changement climatique sur la distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$: focus sur les événements extrêmes.

En premier lieu, il a été montré que les températures moyennes augmentent du fait du changement climatique. L'augmentation des températures moyennes et donc de l'ETP peut conduire à un décalage de la courbe du $DOWKI_{sech}$ vers la gauche, soit vers les extrêmes. Ceci induit une aire sous la courbe plus importante pour des événements extrêmes de sécheresse. Des simulations réalisées avec les données EURO-CORDEX montrent une augmentation des températures moyennes sur l'Europe de 2,5°C à 5,5°C selon les régions, entraînant une augmentation de la fréquence des événements extrêmes de sécheresse (Jacob et al. 2014). Le GIEC indique également que le changement climatique peut augmenter la variabilité des indicateurs météorologiques (IPCC 2012). Cette augmentation de la variabilité induit une augmentation des valeurs extrêmes car la courbe s'allonge dans les queues de distribution. Enfin, le

changement climatique peut induire un changement dans le comportement de l'indice, soit un changement dans la symétrie de la distribution du $DOWKI_{sech}$. Le réchauffement climatique entraînerait donc des valeurs du $DOWKI_{sech}$ plus négatives, décalant alors la symétrie vers la gauche, ce qui peut également entraîner une fréquence plus élevée des événements extrêmes de sécheresse. La partie III de ce chapitre présente les résultats de l'impact du changement climatique sur la distribution du $DOWKI_{sech}$, ce qui permettra de valider ces différentes hypothèses.

Pour les excès d'eau, les différentes études montrent une augmentation des fortes précipitations sur l'Europe du Nord et l'Europe centrale et pas d'évolution sur le pourtour Méditerranéen (J. M. Soubeyrou et al. 2021; IPCC 2022).

1.1.3 Les conséquences sur l'agriculture

Effets sur la production française dans son ensemble

L'évolution du climat a de nombreux impacts sur les productions végétales et peut s'analyser à différents niveaux : sur l'évolution des rendements, sur la croissance des végétaux, sur le développement de maladies phytosanitaires, l'accès à la ressource en eau.

Des études ont montré que les exploitations agricoles de l'Ouest de l'Europe sont moins sensibles au changement climatique sur la durée parce qu'elles peuvent avoir des moyens d'adaptation efficaces telles que l'irrigation ou l'agriculture de précision (Chloupek, Hrstkova, et Schweigert 2004; Li et Troy 2018; Elliott et al. 2014). De plus, des études récentes montrent que l'impact du changement climatique peut être réduit en pratiquant l'agriculture de conservation¹⁸ plutôt que l'agriculture conventionnelle (Y. Su, Gabrielle, et Makowski 2021; Pittelkow et al. 2015). En effet, l'agriculture de conservation réduit l'évapotranspiration de surface et permet de maintenir un niveau plus élevé de teneur en eau du sol (Page, Dang, et Dalal 2020; Z. Su et al. 2007). En revanche, lors d'événements extrêmes, quelques soient les méthodes d'adaptation ou le type d'agriculture pratiquées, les exploitations agricoles sont particulièrement vulnérables (Bindi et Olesen 2010).

Les études qui présentent l'évolution de la production sur le territoire français et européen à horizon futur (en général l'année cible 2100 est utilisée) ne montrent pas toujours les mêmes résultats. Certaines études d'INRAE montrent une légère augmentation des rendements moyens pour les céréales d'hiver (blé tendre d'hiver par exemple) du fait de l'augmentation de la concentration en CO₂ (Seguin 2008; Seguin et Soussana 2006; Fitzgerald et al. 2016). Cependant, d'autres études montrent que l'augmentation du CO₂ ne permettrait pas de compenser tout à fait l'effet d'autres facteurs comme la

¹⁸ Agriculture de conservation : agriculture qui repose l'absence de travail du sol, la couverture maximale des sols et la diversification des espèces cultivées. Elle a pour but de préserver la fertilité des sols agricoles.

température, ce qui ne permettrait pas une augmentation des rendements des céréales d'hiver (Long, Ainsworth, et Leakey 2006; Anais Tibi et al. 2020). Enfin, certains auteurs montrent une diminution des rendements sur la France métropolitaine avec une diminution plus importante sur le pourtour Méditerranéen (Iglesias et al. 2012) du fait de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes de sécheresse. La diminution des rendements serait plus marquée pour les prairies que pour les cultures céréalières (Olesen et al. 2011; Laanaia et al. 2016).

Ainsi, s'intéressant uniquement au lien entre les rendements moyens et la concentration du CO₂, l'état de l'art indique une augmentation, en moyenne des rendements pour les cultures de céréales d'hiver. En revanche, s'intéressant aux extrêmes, d'autres études montrent au contraire une diminution des rendements de ces cultures. L'étude de l'impact du changement climatique sur le cycle de développement des cultures permet d'expliquer ces différents résultats.

Effets sur le cycle de développement des plantes

Il a été mis en évidence que le changement climatique augmente la température à la surface et le déficit hydrique (augmentation du risque de sécheresse et diminution de la ressource en eau disponible). Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent l'importance de s'intéresser au bilan hydrique de la plante pour la mesure du rendement ainsi que l'importance de la température. Ces variables influencent la durée de la période de croissance des plantes (Rötter et Van de Geijn 1999).

L'augmentation des températures moyennes annuelles provoquerait une diminution de la durée de la période de croissance des plantes et une réduction de la taille des grains qui est d'autant plus élevée en cas de déficit hydrique (Asseng et Milroy 2006; Spiertz 1977; J. R. Porter et Gawith 1999; Tubiello et al. 2000). Les auteurs concluent que cela entraînerait une diminution des rendements (Brisson et Levrault 2010; J. R. Porter et Gawith 1999). Par ailleurs, d'autres auteurs montrent que l'augmentation de la température et la diminution de l'eau disponible pour la plante dans le sol diminuent l'efficacité de la photosynthèse car cela provoque la fermeture des stomates et une réduction de la taille des feuilles (Olesen et Bindi 2002).

S'intéressant uniquement à la concentration en dioxyde de carbone, certains auteurs ont pu démontrer que l'augmentation de la concentration en CO₂ permet d'augmenter la photosynthèse et de réduire l'ouverture stomatique ce qui a pour effet bénéfique de diminuer la transpiration (Drake, González-Meler, et Long 1997). Dans ce sens, d'autres auteurs montrent que le doublement de la concentration en CO₂ conduit à une augmentation de 28% des rendements sur le blé (Downing et al. 2000) et une augmentation de 20% à 30% des prairies (M. B. Jones, Jongen, et Doyle 1996; Cannell et Thornley 1998).

Cependant, d'autres auteurs montrent que le changement climatique augmente le déficit hydrique et l'évapotranspiration et que ces facteurs influencent davantage sur l'ouverture des stomates que la concentration en CO₂ ce qui provoque alors une diminution des rendements (Olesen et Bindi 2002).

Ces résultats montrent que les auteurs ne s'accordent pas toujours sur l'effet du changement climatique lorsqu'il est question d'évaluer ses conséquences sur les rendements moyens car les phénomènes biophysiques sont complexes et qu'il existe un nombre important de paramètres à prendre en compte. Par ailleurs, les effets sont très dépendants des différentes latitudes. C'est pourquoi, dans son dernier rapport, le GIEC indique qu'en ce qui concerne les productions agricoles, pour le territoire européen, il existe des effets bénéfiques et néfastes.

Cependant, les conclusions sont concordantes s'agissant d'étudier l'impact des événements extrêmes sur les productions végétales. Il a été démontré que le changement climatique augmente le nombre de jours dont les températures sont supérieures à 30°C ce qui a pour conséquence une diminution des rendements pour les cultures céréalières, en particulier sur le blé (Asseng, Foster, et Turner 2011; Alexandrov et al. 2002; J. R. Porter et Gawith 1999; Schlenker et Roberts 2009; A. J. Challinor et al. 2014). De plus, l'augmentation de la fréquence des sécheresses extrêmes pendant la période estivale impacterait fortement les rendements notamment par la réduction du poids moyen des grains (Vert et al. 2013; S. M. Vicente-Serrano et al. 2014).

Outre la réduction des rendements, du fait de l'augmentation des sécheresses, le changement climatique peut également affecter la prolifération des maladies phytosanitaires ce qui peut impacter les rendements. En effet, des études ont montré que les conditions météorologiques seraient plus favorables à la prolifération de maladies de ravageurs car l'augmentation des températures entraîne une augmentation du nombre de cycle de reproduction des insectes (Cammell et Knight 1992; Baker et al. 2000; Bale et al. 2002). Par ailleurs, le changement climatique entraînerait une diminution des températures hivernales ce qui pourrait ne pas éliminer des populations de ravageurs qui détruiraient les productions au moment de la saison printanière. Enfin, des études ont montré que le changement climatique contribuerait à l'augmentation des nématodes, vecteurs de virus pour les cultures (Neilson et Boag 1996).

En ce qui concerne l'excès d'eau, des études ont montré que l'augmentation de la durée des fortes précipitations empêche les agriculteurs de travailler dans les champs et de réaliser les traitements phytosanitaires ce qui provoque une diminution des rendements des cultures céréalières (Olesen et Bindi 2002). Par ailleurs, les fortes précipitations ont pour conséquence l'asphyxie des racines ce qui provoque la mortalité des plants (ARVALIS 2015).

Enfin, sur les prairies, des études montrent que les températures extrêmes ont des impacts négatifs directs et indirects sur l'élevage car elles diminuent la quantité de fourrages disponible pour l'alimentation des troupeaux (André et al. 2011; Dikmen et Hansen 2009; Holden et Brereton 2002).

Partant de l'équation du rendement, la Figure 38 propose une synthèse de l'impact du changement climatique sur le rendement des céréales d'hiver.

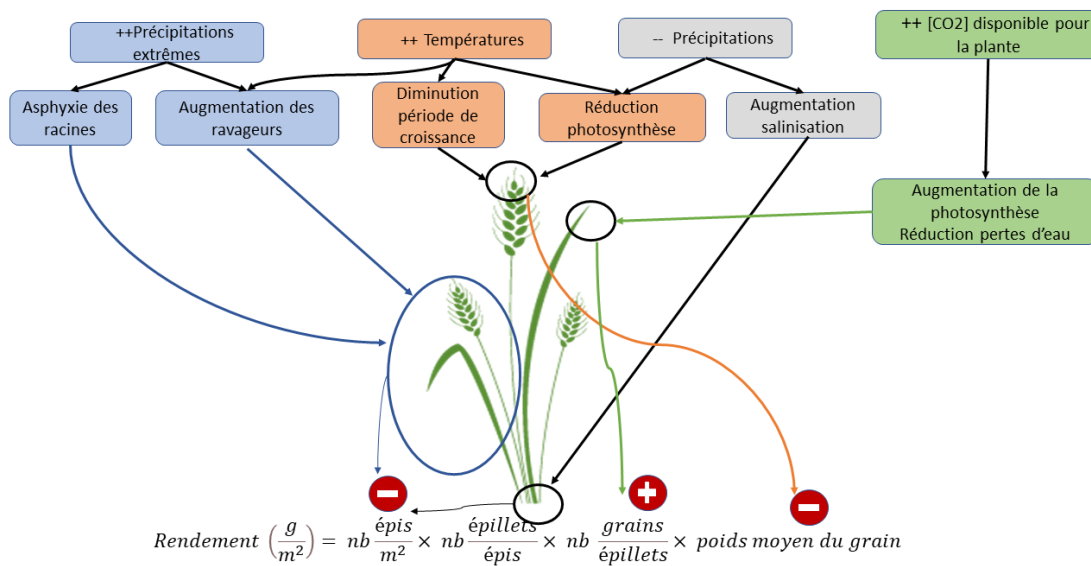


Figure 38. Effets du changement climatique sur le rendement des céréales d'hiver (Source : Dorothee Kapsambelis)

L'étude de la revue de la littérature montre qu'il n'existe pas une réponse universelle des productions végétales au changement climatique car l'impact des phénomènes naturels sur le cycle de développement des plantes est complexe et a de multiples conséquences. Cependant, s'agissant des événements extrêmes de sécheresse, la communauté scientifique montre une diminution des rendements des cultures et un besoin pour l'agriculture de s'adapter. La préoccupation principale est le manque de ressource en eau.

I.2 Présentation des modèles d'étude du changement climatique

Il existe de nombreux modèles climatiques globaux et régionaux qui simulent l'évolution du climat à horizon 2100. Ces modèles sont construits sur les lois de la thermodynamique, la conservation de l'énergie, de la matière et du mouvement (Vautard et al. 2022). Ce sont des modèles d'atmosphère et d'océan qui s'appuient sur les concepts de la mécanique des fluides. Ces modèles sont complétés par des paramétrisations complexes qui permettent de représenter certains phénomènes du climat comme la convection atmosphérique, le rayonnement solaire et infrarouge. Les modèles couplés globaux résultent de l'assemblage des composantes atmosphériques, océaniques et de surfaces continentales et simulent l'évolution du climat induite par les phénomènes naturels (éruption volcanique, fonte des neiges), et anthropiques (émissions de GES, aérosols, etc.). Ces modèles simulent l'évolution du climat de manière continue, année après année. Ils sont de deux types :

- Les modèles de système de circulation générale atmosphère-océan (AOGCM) qui ont pour objectif de comprendre la dynamique des composantes du système climatique (atmosphère, océan, terre de glace, etc.) (IPCC 2013). Ce sont les premiers modèles développés. Ils prennent en compte les émissions GES selon les différents scénarios du GIEC mais ne prennent pas en compte les rétroactions biogéochimiques ;
- Les modèles de système Terre (ESM) qui s'étendent sur les AOGCM et qui incluent la représentation de divers cycles biogéochimiques, tels que ceux impliqués dans le cycle de carbone, le cycle du soufre ou l'ozone (Flato 2011) . Ce sont les outils les plus complets pour simuler la réponse climatique à horizon futur au forçage radiatif.

Afin de diminuer la résolution des modèles globaux pour mieux simuler les événements à l'échelle locale, des modèles climatiques régionaux ont été développés. Ils font des représentations comparables à celles réalisées par les modèles AOGCM et sont présentés dans le paragraphe suivant.

1.2.1 La descente d'échelle des modèles globaux : les modèles climatiques régionaux

La résolution des modèles globaux est de 150 km à 200 km. Elle reste insuffisante pour permettre des analyses fines sur des territoires précis ainsi que certains événements extrêmes. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour réaliser une descente d'échelle dont la descente d'échelle dynamique. Elle consiste en l'utilisation de modèles climatiques régionaux (Regional Climate Models, RCM) permettent d'effectuer des simulations climatiques à haute résolution. Comme les modèles globaux, ils peuvent se limiter à une seule composante ou être couplés. Ces modèles permettent de prendre en compte des phénomènes météorologiques locaux comme ceux qui se produisent en montagne ou encore ceux qui se produisent sur une île dont la taille est inférieure à la taille de la maille des modèles climatiques globaux. Sur la France, l'utilisation des modèles climatiques globaux ne permet pas de distinguer le relief du Massif Central et des Alpes ou encore les phénomènes météorologiques qui se déroulent uniquement sur les Pyrénées (J. M. Soubeyrou et al. 2021). Or, pour certaines études d'impacts du changement climatique dont l'agriculture, des études à haute résolution sont nécessaires (les productions végétales cultivées sont différentes selon que l'on se situe en plaine ou en montagne par exemple). Enfin, les modèles globaux ont une faible capacité à représenter certains événements extrêmes comme les précipitations intenses qui sont souvent liés à de petites échelles (J. M. Soubeyrou et al. 2021). Ainsi, les modèles climatiques régionaux (RCM) sont forcés aux bords des GCM et offrent une haute résolution spatiale (10-20 km) avec une meilleure représentation du relief local, des contrastes terres-mers et retraits de côte).

Sur le territoire Européen, plus d'une centaine de projections climatiques sont disponibles sur une résolution de 12 km, représentant les simulations Euro-Cordex (Jacob et al. 2014; 2020). Ces simulations intègrent la France métropolitaine. La période historique sur laquelle les paramètres climatiques sont

disponibles est de 1950 à 2005 et les simulations futures de 2006 à 2100 sur trois des quatre scénarios du GIEC (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Sur la France métropolitaine, le portail DRIAS met à disposition les données d'indicateurs climatiques issues des simulations Euro-Cordex dans le cadre de l'exercice international CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, 5^{ème} phase). Le dernier jeu de données DRIAS (jeu de données 2020) sélectionne 12 couples GCM/RCM comme présenté en Tableau 7.

Tableau 7. Les 12-couples GCM/RCM sélectionnés pour les 30 simulations du climat futur et 12 simulations historiques (issu de (J.-M. Soubeyroux et al. 2020). HISTO correspond à la période historique 1976-2005, et RCP aux différents scénarios du GIEC selon les concentrations de GES à horizon 2100. Les modèles globaux sont les modèles GCM. Dont le premier acronyme correspond au centre de recherche qui les a développés et les modèles RCM sont les modèles régionaux permettant la descente d'échelle.

GCM	RCM	HISTO	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	■	■	■	■
CNRM-CM5	Racmo22E v2	■	■	■	■
IPSL-CM5A-MR	WRF381P	■		■	■
IPSL-CM5A-MR	RCA4	■		■	■
HadGEM2-ES	RegCM4-6	■	■		■
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	■		■	■
EC-EARTH	Racmo22E v2	■	■	■	■
EC-EARTH	RCA4	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	REMO*	■	■	■	■
NorESM1-M	HIRHAM5 v3	■		■	■
NorESM1-M	REMO**	■	■		■

* REMO 2009 ; ** REMO 2015

De plus, pour des études d'impact, les projections climatiques ne peuvent pas être directement utilisées car elles comportent des biais par rapport aux observations. Ainsi, il a été mis en place une correction statistique des simulations climatiques avec le calcul d'indicateurs climatiques. Cette correction statistique définit un jeu de données de référence pour le climat actuel qui correspond à la réanalyse SAFRAN sur la période 1976-2005. La méthode statistique Adamont est ensuite utilisée. Elle permet de corriger la distribution simulée de chaque indicateur climatique en utilisant une climatologie par saison et régime de temps. Cette méthode a été spécialement mise au point pour les études d'impact. Ainsi, ces modèles climatiques permettent d'évaluer l'évolution du climat année après année, de 2006 à 2100.

1.2.2 Présentation générale du modèle ARPEGE-Climat

Le modèle ARPEGE-Climat fait partie des modèles qui calculent la fraction de CO₂ absorbée par les continents et les océans et en déduisent la teneur de l'atmosphère en CO₂. Ainsi, le modèle numérique ARPEGE est un modèle de circulation générale et spectral développé en collaboration avec ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) pour la prévision numérique du temps. Dans cette configuration, il permet d'obtenir une prévision de la météorologie jusqu'à 4 jours. Sa version climatique, ARPEGE-Climat a été développé dans les années 1990 (Déqué et al. 1994) et est devenu la composante atmosphérique du modèle « Système Terre » du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) qui couple les différentes composantes du système climatique (atmosphère, océan, végétation, banquise). Ainsi, le modèle ARPEGE-Climat est spécifiquement adapté pour des études climatiques plus longues dans le temps.

II METHODOLOGIE

II.1 Le choix de l'année 2050 comme année cible

L'année 2050 a été choisie comme année cible pour réaliser les projections climatiques. Cette année, 30 ans dans le futur, permet d'analyser les conséquences du changement climatique sur les productions végétales et de discuter des systèmes de gestion de risques. En effet, les assureurs réalisent des projections jusqu'à 2050 de leur portefeuille mais vont rarement plus loin, en raison de la méconnaissance de l'évolution de ce portefeuille, qui est directement liée aux différentes politiques publiques établies. Par exemple, la réforme de la gestion des risques en agriculture menée par le député Descrozaille a conduit à une feuille de route avec des objectifs fixés à moyen terme et à long terme sur la diffusion de l'assurance MRC. Les objectifs à moyen terme sont fixés pour 2030 ce qui correspond globalement au prochain programme de la PAC et les objectifs sur le long terme sont fixés à 2050. De plus, le rapport du CGAAER (Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture, et des Espaces Ruraux) choisit également comme année cible 2050 pour évaluer l'impact du changement climatique sur la gestion de la ressource en eau et de l'agriculture (Ayphassorho et al. 2020).

C'est pourquoi, il a paru judicieux de choisir l'année 2050 plutôt que l'année 2100 qui paraît trop éloignée pour faire des hypothèses solides sur l'évolution de l'agriculture (pratiques culturales, méthodes de prévention et cultures de variétés résistantes), des territoires (modification des latitudes de type de productions végétales), d'économie (projection des prix des denrées agricoles) et des politiques de gestion des risques. Pour autant, l'impact du changement climatique sera certainement moins marqué à cet horizon relativement proche.

II.2 Le modèle ARPEGE-Climat

II.2.1 Paramétrisation

Les données météorologiques de précipitations et d'évapotranspiration simulées par le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France ont été fournies par la direction des Services météorologiques de Météo-France. La grille ARPEGE-Climat peut être inclinée et étirée en changeant la position du pôle et en augmentant la résolution horizontale sur une zone d'intérêt. Cette capacité de zoom permet des études climatiques régionales. Dans cette thèse, selon les informations fournies par Météo-France, ARPEGE-Climat a son pôle en Allemagne (9,97°E, 50,0°N) avec un facteur d'étirement de 3 et la troncature TL359, ce qui signifie une expansion tronquée en harmoniques sphériques pour représenter les variables du modèle dans l'horizontal. La résolution spatiale du modèle sur l'Europe est d'environ 20 km. Le pas

de temps du modèle est de 600 secondes (10 minutes). La discrétisation verticale d'APREGÉ-Climat est sur 31 niveaux suivant la topographie à épaisseur variable.

A chaque pas de temps, les paramètres de précipitations et de nébulosité sont calculés sans utiliser le pas de temps précédent. Les échanges entre l'atmosphère et le sol sont pris en compte par le module SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) d'ISBA (modèle Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) dans la plateforme de modélisation SURFEX (version 7) implémentée dans ARPEGE-Climat. SURFEX comprend des modules indépendants comme le modèle de surface continentale ISBA et son option Carbone (TEB pour les zones urbaines, FLake pour les lacs). Au cours d'un pas de temps du modèle couplé sol-atmosphère, les paramètres climatiques (températures, humidités spécifiques, composantes horizontales du vent, pressions, précipitations, rayonnements directs diffus) sont simulés à chaque maille de surface. En retour, SURFEX calcule des flux moyens pour la quantité de mouvement et la chaleur latente et il renvoie ensuite ces informations dans l'atmosphère.

Le forçage climatique permet de maintenir le climat dans un état stationnaire en utilisant les paramètres fixes suivants :

- Concentrations fixes de GES selon le scénario du GIEC choisi pour l'année cible déterminée ;
- Série stationnaire de température de surface de la mer (adaptée à chaque scénario du GIEC avec la méthode de descente de quantile-quantile) ;
- Concentrations fixes d'ozone stratosphérique ;
- Concentrations d'aérosols fixes.

II.2.2 Simulations à climat constant

Pour son étude climatique de 2015 sur les conséquences du changement climatique à horizon 2050 sur l'exposition aux territoires français métropolitains aux risques de submersions marines, sécheresse Retrait-Gonflement des Argiles (RGA), et inondations, CCR a mis en place une méthodologie particulière avec Météo-France (Caisse Centrale de Réassurance 2015). L'objectif de cette étude était d'analyser le coût des catastrophes naturelles selon le scénario 4.5 du GIEC à la suite de la COP21 qui préconisait une limite de la hausse des températures moyennes de la surface du globe à 2°C. La même analyse en 2018 est réalisée sur le scénario 8.5 du GIEC. Afin de répondre à cet objectif, il a été nécessaire de construire un catalogue d'événements climatiques réalistes. Sur l'historique, ce catalogue concerne les 30 dernières années mais il est nécessaire d'obtenir également un catalogue d'événements sur le climat futur en prenant une année comme cible (l'année 2050). C'est en effet la constitution d'un ensemble d'événements fictifs qui permet de faire des analyses sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes qui sont, par définition, peu représentés (IPCC 2012).

Ainsi, pour les besoins de CCR, Météo-France a simulé 400 répétitions du climat de l'année 2000 et 400 répétitions du climat de l'année 2050 sous le scénario du GIEC choisi avec le modèle ARPEGE-Climat, ce qui a nécessité six mois de calculs au préalable. Le choix du nombre de 400 répétitions est un compromis entre le temps de calcul et le coût de l'étude. **On parle alors de simulations à climat constant** (Moncoulon et al. 2018).

Cette méthodologie permet d'obtenir un panel d'événements possibles, qui ne se sont pas nécessairement produits pour les deux années cibles. Ces 400 simulations doivent donc être considérées comme des réalisations possibles de l'année cible avec leur probabilité d'occurrence. Avec 400 répétitions de l'année 2000 et de l'année 2050, il est possible d'analyser la fréquence et l'intensité des événements extrêmes et d'étudier l'évolution du profil de ces événements dans le futur.

Cette méthodologie a donc été utilisée dans cette thèse pour l'analyse spécifique des événements extrêmes. Aujourd'hui, les études réalisées par CCR et Météo-France avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France sont les seules à proposer des simulations à climat constant. Afin d'obtenir un large panel d'événements fictifs, certaines études se basent sur un ensemble de modèles d'Euro-Cordex (Forzieri et al. 2016; Fraga, Pinto, et Santos 2019; von Trentini, Leduc, et Ludwig 2019). Dans la discussion, nous mettons en évidence que les simulations à climat constant permettent d'obtenir des queues de distributions plus larges et donc une étude plus fine sur les événements extrêmes.

II.2.3 Sorties du modèle

L'archivage du modèle ARPEGE-Climat permet d'obtenir les simulations de 36 paramètres climatiques proches de la surface au pas de temps horaire et au pas de temps de trois heures pour 5 paramètres d'altitude à 9 niveaux différents sur l'Europe et l'Afrique du Nord sur une maille de 0,5° latitude/longitude. L'évapotranspiration potentielle est calculée au pas de temps journalier selon l'équation de Penmann-Monteith.

Pour cette étude, les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle sont directement extraites d'ARPEGE-Climat et interpolées sur la grille SAFRAN de 8kmx8km grâce à la méthode de descente d'échelle quantile/quantile. Cette méthode est la suivante : le quantile de la distribution ARPEGE-Climat en chaque point de grille de 0,5° (environ 50km) est calculé sur la base des 400 simulations. La descente d'échelle s'effectue en appliquant à chacune des mailles SAFRAN de 8kmx8km la valeur correspondant au même quantile. Par exemple, sur la grille ARPEGE-Climat, si une simulation de précipitations pour une maille et une date donnée correspond à la valeur décennale, alors les précipitations décennales de chaque point de la grille Safran à l'intérieur de la maille d'ARPEGE-Climat sont calculées. Pour l'année cible 2050, l'hypothèse faite est que la relation quantile/quantile est

identique. Les imperfections du modèle induisent des biais et la descente d'échelle n'est pas parfaite. En utilisant une descente d'échelle basée sur la réanalyse SAFRAN (période de 1976-2005), certains de ces biais sont supprimés.

II.3 La modélisation des pertes de récoltes

II.3.1 Le calcul du *DOWKI*

A partir des sorties du modèle ARPEGE-Climat, soit les données de précipitations et d'évapotranspiration, l'indice *DOWKI* peut être calculé à la maille de 8kmx8km sur la France métropolitaine. Ce sont donc 400 valeurs de l'indice *DOWKI_{sech}* sur le climat 2000 et 400 valeurs de l'indice *DOWKI_{sech}* sur le climat 2050 qui sont simulées, ainsi que 400 valeurs de l'indice *DOWKI_{exces}* sur le climat 2000 et 400 valeurs du *DOWKI_{exces}* sur le climat 2050.

Dans sa définition, l'anomalie de bilan hydrique (*ERNC*) est calculée en comparant la valeur du bilan hydrique de la décade *i* de l'année *n*, à la moyenne des valeurs de cette même décade sur toutes les années disponibles. Ce dernier calcul correspond donc à une référence. Il est important de se poser la question de quelle référence choisir pour le climat 2050. Sont-ce les valeurs calculées sur le climat 2000 ? Ou sur le climat 2050 ? Il est rappelé que sur l'historique, le calcul de l'anomalie hydrique de la décade *i* de l'année *a* été réalisée en prenant toutes les valeurs des décades *i* de toutes les années de l'historique (qu'elles soient situées après chronologiquement ou avant l'année *n* étudiée). Le calcul de la référence est donc une problématique en soit. Le rapport DRIAS 2020 (J.-M. Soubeyroux et al. 2020) analyse l'impact de la période de référence choisie pour calculer les indicateurs climatiques. En effet, les auteurs soulignent que pour étudier l'impact du changement climatique, on parle rarement de valeurs absolues mais on fait souvent des comparaisons par rapport à une période de référence. Dans ce présent rapport, la référence choisie est la période 1976-2005, considérée comme le climat actuel.

Les résultats présentés dans cette thèse correspondent au *DOWKI* dont les valeurs de référence du déficit hydrique calculées sur une distribution jointe des 400 années à climat 2000 et des 400 années à climat 2050. Ce scénario est dit « scénario médian ». La partie VI.2 de ce chapitre présente une discussion sur l'influence de la période de référence choisie pour les études climatiques et présente deux autres scénarios possibles pour le calcul du *DOWKI* sur le climat futur (un scénario optimiste et un scénario pessimiste).

La simulation des pertes de récoltes

Une fois le *DOWKI* calculé, il est possible de simuler les pertes de récoltes en utilisant le modèle développé et présenté dans le chapitre précédent. Cependant, il a été démontré dans le chapitre précédent, qu'un modèle développé comme celui-ci comporte de nombreuses incertitudes qui doivent être évaluées et prises en compte dans l'analyse des résultats. Différents types d'incertitudes sont contenues dans la chaîne de modélisation développée :

- Incertitudes sur le manque de précisions des données de rendement (surfaces irriguées/non irriguées) ;
- Incertitudes sur l'indice climatique ;
- Incertitudes sur le modèle de dommages.

Le chapitre précédent a montré que le calcul de l'indice *DOWKI* est déterministe, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'incertitude dans sa formule autre que dans les données d'entrées. Les incertitudes des aléas climatiques simulées sont donc contenues dans les données de précipitation et d'évapotranspiration fournies par ARPEGE-Climat et dans la méthodologie de réduction d'échelle. L'évaluation des incertitudes s'appuie sur 2 hypothèses :

- La simulation de 400 répétitions d'une même année cible dans l'utilisation du modèle ARPEGE-Climat ;
- La réanalyse SAFRAN sur la période historique ;

Ces deux méthodes permettent de diminuer les incertitudes sur le modèle d'aléa.

L'incertitude la plus importante réside donc dans le modèle de dommages, c'est-à-dire la simulation des pertes de récoltes à partir des valeurs du *DOWKI*. Le chapitre précédent a montré qu'il existe des faux positifs et des faux négatifs qui induisent des erreurs dans le modèle. Afin de tenir compte de cette incertitude dans les projections climatiques, il faut simuler chaque répétition de l'année 2000 et de l'année 2050 un certain nombre de fois. Pour chacune des simulations, une valeur de pertes de récolte différente est choisie selon la méthode de bootstrap dans la classe de valeur d'indice qui lui est associée. Cette méthode permet d'estimer l'intervalle de confiance pour chaque perte de récolte simulée (quantiles 10-90) pour chacune des 400 répétitions de l'année 2000 et de l'année 2050 et pour chaque département. Ainsi, plusieurs nombres de simulations ont été testés afin d'obtenir le nombre de simulation qui permet une optimisation entre temps de calcul et stabilité des résultats obtenus. Les résultats de cette étude sont présentés en Figure 39.

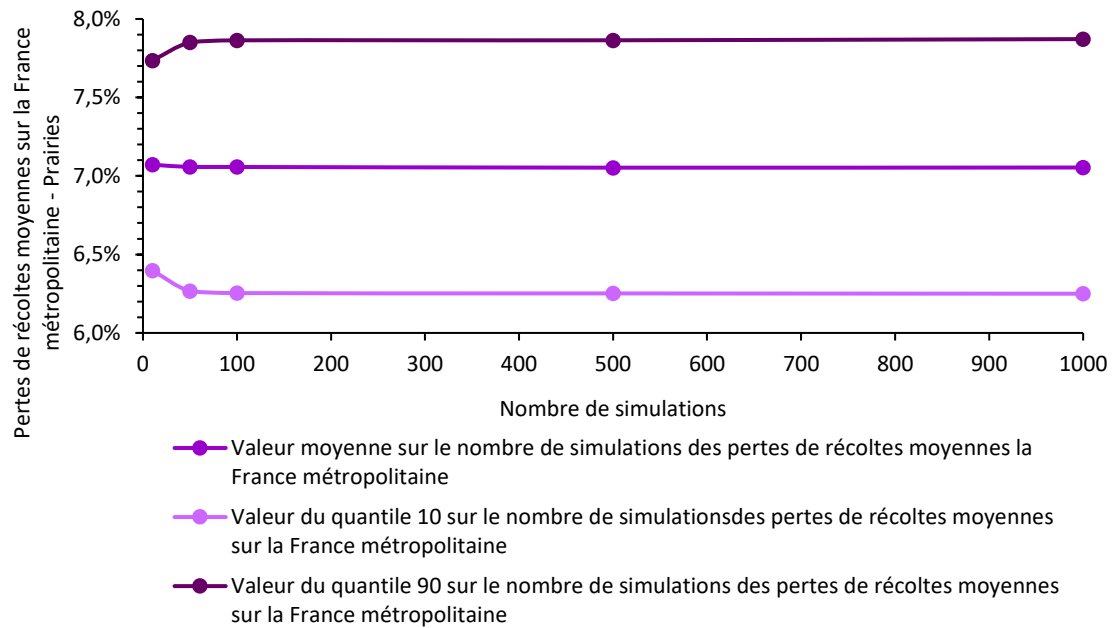


Figure 39. Variation de la valeur moyenne des pertes de récoltes des prairies et de sa distribution (quantiles 10-90) calculée à l'échelle de la France métropolitaine sur les 400 années du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France sur le climat 2000 en fonction du nombre de simulations

D'après la Figure 39, à partir de 100 simulations de chacune des 400 années du climat 2000, les pertes de récoltes sont stables. Ainsi, il a été décidé de réaliser 100 simulations des pertes de récoltes de chacune des 400 années pour le climat 2000 et le climat 2050 pour chacune des cultures étudiées. Cette méthodologie permet d'intégrer la variabilité des pertes de récoltes (en calculant les quantiles 10-90) dans les analyses sur l'évolution des taux de pertes entre le climat 2000 et le climat 2050.

Dans cette thèse, il est utilisé un seul modèle climatique, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Les simulations sont réalisées à climat constant, c'est-à-dire une répétition de 400 fois l'année 2000 et de 400 fois l'année 2050. Ces 400 simulations sont des réalisations possibles de l'année cible et peuvent donc être interprétées avec leur probabilité d'occurrence. La constitution d'un large panel d'événements permet une analyse sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes, situés sur les queues de distributions. L'incertitude du modèle est intégrée par la simulation de 100 répétitions de chacune des 400 années pour la simulation des pertes de récoltes, soit au total 40 000 simulations pour chacun des climats par culture.

III LES EVENEMENTS EXTREMES DE SECHERESSE A HORIZON 2050

III.1 Validation des simulations à climat constant

La première étape consiste à valider les simulations ARPEGE à climat actuel (climat 2000) en les comparant à l'historique issu de la ré-analyse SAFRAN. La Figure 40 présente la distribution des valeurs annuelles du $DOWKI_{sech}$ sur les 400 années à climat 2000 et sur les 30 années de l'historique calculé sur la période de vulnérabilité des céréales.

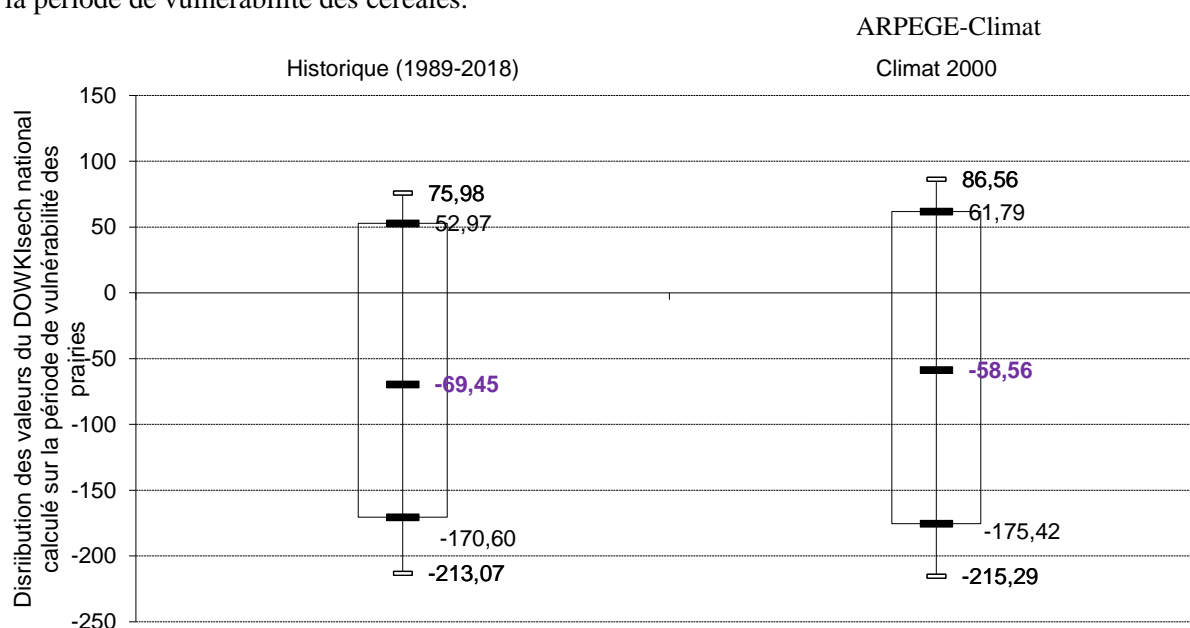


Figure 40. Comparaison de la distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ national entre le climat 2000 (valeurs calculées sur ARPEGE-Climat) et l'historique (valeurs calculées sur la grille de ré-analyse SAFRAN). Les extrémités du boxplot représentent les quantiles 10-90 et les barres d'erreurs représentent les quantiles 5-95

D'après la Figure 40, on note un écart de 16% entre les valeurs moyennes du $DOWKI_{sech}$ calculé sur la grille ARPEGE et du $DOWKI_{sech}$ calculé sur la grille SAFRAN. **Cependant, sur les valeurs extrêmes (quantiles 10 [10% des valeurs] et quantiles 5 [5% des valeurs] de la distribution), l'écart est inférieur à 3%, ce qui signifie que les distributions sont comparables pour l'analyse des événements extrêmes.**

III.2 Analyse sur la ferme France

III.2.1 Evolution France entière du $DOWKI_{sech}$ entre le climat 2000 et le climat 2050

Une fois validée la distribution issue d'ARPEGE à climat 2000, nous pouvons comparer les valeurs de l'indice à climat 2050. La Figure 41 présente la distribution des valeurs annuelles du $DOWKI_{sech}$ sur les 400 années à climat 2000 et à climat 2050 calculées sur le périmètre des prairies (a) et des céréales (b) sur France entière (8800 mailles). Il est rappelé que la période de vulnérabilité des prairies est : 3^{ème} décade d'avril – 2nde décade de septembre. La période de vulnérabilité des céréales d'hiver est : 3^{ème} décade d'avril – 1^{ère} décade d'août.

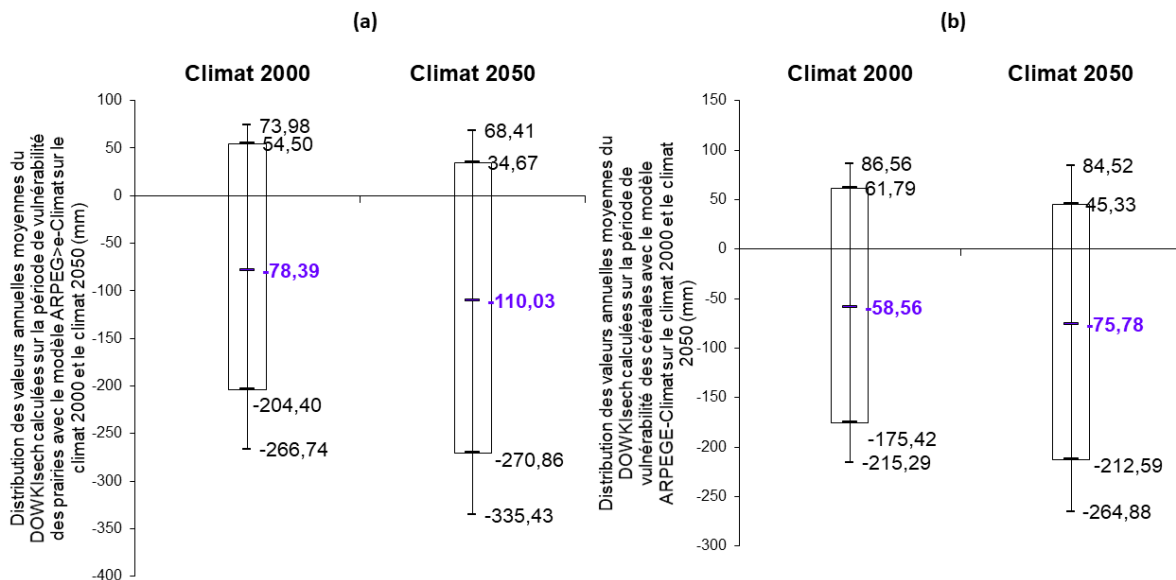


Figure 41. Distribution des valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{sech}$ calculées avec le modèle ARPEGE-Climat sur le climat 2000 et sur le climat 2050 (mm) et sur (a) sur la période de vulnérabilité des prairies et (b) la période de vulnérabilité des céréales d'hiver. En violet la moyenne (mm), les extrémités du boxplot représentent les valeurs décennales du $DOWKI_{sech}$ national, les extrémités des barres d'erreurs représentent les valeurs vingtennales du $DOWKI_{sech}$ national.

D'après la Figure 41, les valeurs sont plus extrêmes pour le $DOWKI_{sech}$ sur le périmètre des prairies que pour sur celui des céréales d'hiver, sur les deux climats. Ceci est dû au fait que la période de vulnérabilité des prairies prend en compte l'intégralité du mois d'août, alors que seule la première décade de ce mois est prise en compte pour les céréales d'hiver.

Pour les céréales à paille et les prairies, le $DOWKI_{sech}$ est plus extrême à climat futur, ce qui signifie qu'un assèchement généralisé est observé. Les valeurs décennales de l'indice en 2050 (respectivement de -270 mm pour les prairies et -212 mm pour les céréales d'hiver) sont plus extrêmes que celles

calculées pour l'année 2003 (-240 mm pour les prairies et -205 mm pour les céréales d'hiver). **Un événement de sécheresse comme celui de 2003 sera donc plus fréquent à horizon futur.**

Le Tableau 8 présente l'évolution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ présentées Figure 41 sur les prairies et les céréales d'hiver.

Tableau 8. Evolution (%) des valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculé sur la France métropolitaine entre le climat 2000 et le climat 2050

Evolution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ entre le climat 2050 et le climat 2000	Périmètre des prairies	Périmètre des céréales d'hiver
$DOWKI_{sech}$ annuel moyen	40,3 %	29,4 %
$DOWKI_{sech}$ annuel médian	26,7 %	21,1 %
$DOWKI_{sech}$ décennal	32,5 %	21,2 %
$DOWKI_{sech}$ vingtennal	25,7 %	23,0 %
$DOWKI_{sech}$ cinquannal	13,0 %	14,2 %

D'après le Tableau 8, l'anomalie cumulée du bilan hydrique annuelle moyenne diminue de 40% sur le périmètre des prairies et de 30% sur le périmètre des céréales d'hiver. Cette différence s'explique par un nombre de sécheresses dont le déficit hydrique est plus important durant la deuxième partie du mois d'août. De plus, la valeur décennale du $DOWKI_{sech}$ diminue de plus de 30% sur le périmètre des prairies et de plus de 20% sur le périmètre des céréales d'hiver. **Les sécheresses décennales seront donc plus intenses en 2050. L'augmentation de l'intensité des sécheresses reste particulièrement marquée sur les événements rares (période de retour 20 ans et 50 ans) et est équivalente entre les céréales d'hiver et les prairies.**

Les valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculées sur le périmètre des prairies permettent de quantifier les sécheresses estivales et printanières. Une analyse de la distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ à l'échelle nationale (sur les 400 années) est réalisée pour étudier l'impact du changement climatique sur la forme de la distribution des valeurs de l'aléa sécheresse. Les résultats sont présentés en Figure 42. Cette figure montre le nombre de valeurs du $DOWKI_{sech}$ par classe de valeurs, avec des paliers de 20 mm avec seule la valeur minimale du palier représentée. Ainsi, la valeur la plus extrême en 2050 du $DOWKI_{sech}$ se situe entre -460 mm et -480mm.

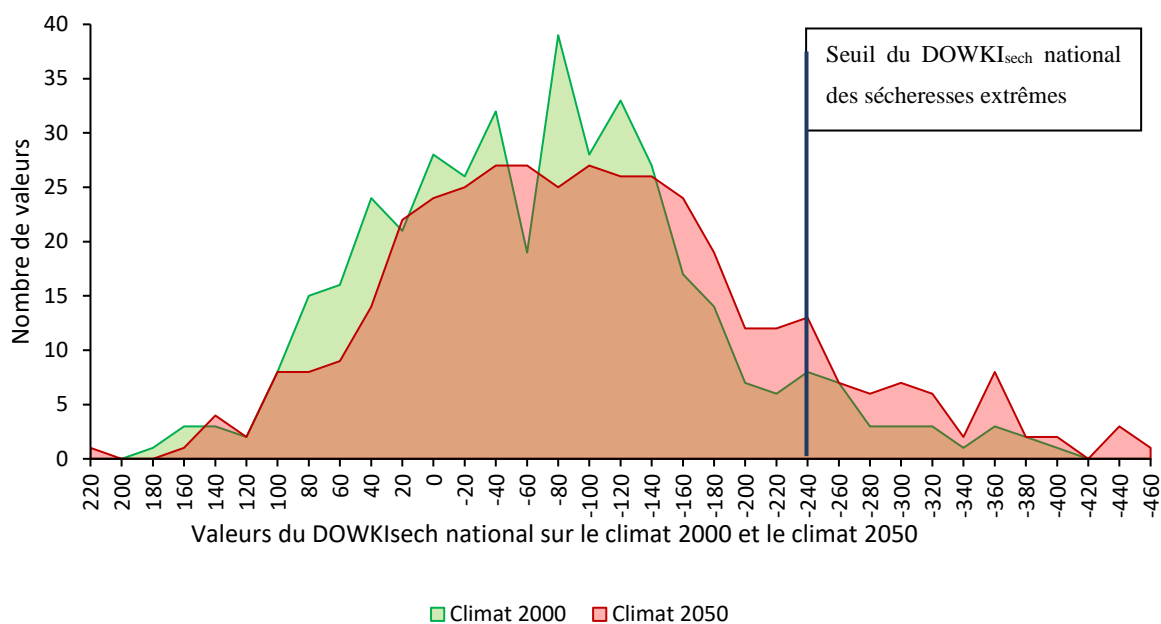


Figure 42. Distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ moyen national sur le climat 2000 (400 valeurs) et sur le climat 2050 (400 valeurs). En abscisse les valeurs représentent des paliers, le premier palier est compris entre 220 mm et 200 mm, le dernier palier commence à -460 mm et va jusqu'à -480 mm. La valeur de la sécheresse la plus extrême se situe entre ces deux valeurs sur le climat 2050 et entre les valeurs -400 mm et -420 mm sur le climat 2000.

D'après la Figure 42, la distribution du $DOWKI_{sech}$ est différente entre le climat 2000 et le climat 2050, rejoignant alors les hypothèses énoncées dans le paragraphe I.1.2 de ce chapitre :

- sur le climat futur, la courbe de distribution est décalée vers les valeurs extrêmes, et se prolonge avec des valeurs d'indice extrêmes non observées sur le climat actuel. Ce résultat montre que l'intensité des sécheresses extrêmes augmente ;
- l'aire sous la courbe sur les queues de distribution augmente en 2050, ce qui signifie une augmentation de la fréquence des sécheresses extrêmes.

Sur l'historique, la valeur minimale France entière du $DOWKI_{sech}$ pour les prairies est de -240 mm et deux événements correspondent à cette valeur : la sécheresse estivale de 2003 et la sécheresse printanière de 2011. La valeur minimale sur le climat 2000 est de -409 mm sur le périmètre des prairies, ce qui signifie que des événements de plus grande ampleur que les sécheresses de 2003 et 2011 pourraient déjà survenir aujourd'hui. Par ailleurs, la valeur minimale du $DOWKI_{sech}$ est de -478 mm en 2050 ce qui représente une évolution de plus de 15% sur le périmètre des prairies. **Ces résultats montrent que les sécheresses extrêmes seront plus intenses à horizon 2050 avec des records de valeurs de déficit hydrique encore jamais enregistrés.**

On définit le seuil de valeur d'indice de -240 mm qui représente les sécheresses extrêmes. Ainsi, ces sécheresses ont une période de retour de 15 ans sur l'historique. Sur le climat 2000, on compte 31 sécheresses comme représentées en Figure 42, ce qui correspond à une période de retour de 13

ans pour ces événements ce qui reste comparable à l'historique construit sur 30 ans. A climat futur, le nombre de sécheresses est de 57, ce qui signifie que ces sécheresses ont une période de retour de 7 ans. Ainsi, en 2050, la fréquence des sécheresses extrêmes telles qu'on les a connues sur l'historique double. Ces sécheresses, à climat actuel comme à climat futur impactent en moyenne 80% du territoire et posent la question de la résilience des exploitations agricoles.

Ces résultats sont cohérents avec les résultats du projet ClimSec qui analyse l'évolution d'indicateurs climatiques et des sécheresses extrêmes dans le futur sur la France métropolitaine (J.-P. Vidal et al. 2010) et avec des études menées sur l'impact du changement climatique sur l'évolution des sécheresses en utilisant les projections climatiques d'Euro-Cordex (Forzieri et al. 2016; Jacob et al. 2014; Russo et al. 2014; Spinoni et al. 2018).

III.2.2 Sécheresses estivales et sécheresses printanières

De nombreux auteurs montrent que la temporalité des sécheresses est impactée par le changement climatique, et mettent en évidence une augmentation de la durée des sécheresses (Mesbahzadeh et al. 2020; Roudier et al. 2016; Trnka et al. 2011). L'indice *DOWKI* est décadaire, il est donc possible de déterminer quand ont eu lieu les sécheresses. Ainsi, sur les sécheresses extrêmes identifiées précédemment, une étude spécifique est réalisée en analysant la décade à partir de laquelle le seuil de -240 mm est atteint. **Si celle-ci est sur les mois d'avril-mai-juin, la sécheresse est dite printanière, si le seuil est atteint à partir du mois de juillet, la sécheresse est dite estivale.**

Le Tableau 9 présente la part des sécheresses printanières et estivales sur les sécheresses extrêmes identifiées précédemment.

Tableau 9. Nombre de sécheresses extrêmes systémiques printanières et estivales sur le climat 2000 et le climat 2050

Sécheresses extrêmes systémiques	Climat 2000	Climat 2050
Part des sécheresses printanières	10%	14%
Part des sécheresses extrêmes estivales	90%	86%

D'après le Tableau 9, les sécheresses systémiques printanières représentent environ 10% des sécheresses extrêmes à climat actuel et 14% à climat futur. **Une légère augmentation du nombre de sécheresses printanière est observée sur le climat futur. Les sécheresses estivales représentent à climat actuel comme à climat futur, la grande majorité des sécheresses.**

Afin d'évaluer la durée des sécheresses extrêmes systémiques, le nombre de décades dont la valeur de l'anomalie cumulée est inférieure ou égale à -240 mm (seuil de sécheresse extrême) est calculé. **Sur le climat 2000, les sécheresses durent en moyenne 37 jours alors qu'elles durent 43 jours en moyenne**

à climat futur. Ces résultats vont dans le sens de l'augmentation de la durée des sécheresses observée par plusieurs auteurs (Trnka et al. 2011; Mesbahzadeh et al. 2020).

Par ailleurs, la Figure 43 représente la durée des sécheresses extrêmes systémiques sur le climat 2000 et le climat 2050. Chaque ligne représente un type de sécheresse qui peut survenir plusieurs fois sur le nombre total de sécheresses.

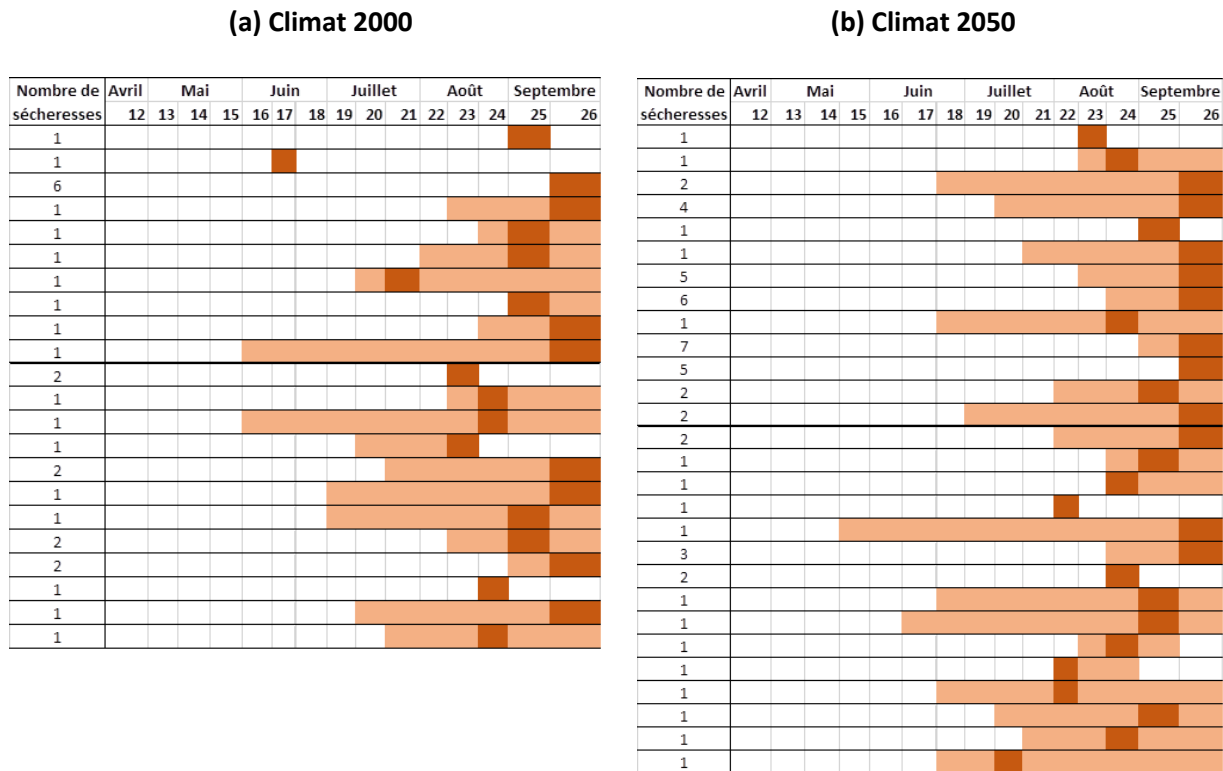


Figure 43. Durée des sécheresses extrêmes systémiques sur la France métropolitaine (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. En orange foncé, la valeur minimale de l'anomalie cumulée de bilan hydrique. En orange clair, les valeurs du $DOWKI_{sech}$ inférieures ou égales à -240 mm. Il est dénombré 31 sécheresses sur le climat 2000 et 57 sur le climat 2050.

D'après la Figure 43, la valeur du $DOWKI_{sech}$ minimale est régulièrement obtenue sur la dernière décade, soit la deuxième décade de septembre. Le $DOWKI$ étant une anomalie cumulée décadaire de bilan hydrique, cela signifie que la valeur de l'anomalie diminue tant qu'il n'y a pas eu de pluie excédentaire.

Les sécheresses extrêmes qui ne durent que 10 jours représentent 35% des sécheresses sur le climat 2000 et 9% environ sur le climat 2050.

La date de survenance de la sécheresse est importante, car elle détermine les cultures qui sont vulnérables à ce péril. Sur le climat 2000, d'après la Figure 43, 18 sécheresses se produisent après la deuxième décade d'août et n'engendrent donc pas de pertes de récoltes importantes sur les céréales d'hiver. Sur le climat 2050, ces sécheresses doublent et sont au nombre de 33. Ainsi, il n'existe pas d'évolution sur ces sécheresses à horizon futur, qui représentent 58% des sécheresses extrêmes systémiques sur le climat 2000 et sur le climat 2050.

A horizon 2050, les sécheresses extrêmes sont plus longues et les sécheresses dites printanières augmentent. Les sécheresses courtes (10 jours) diminuent très nettement à horizon futur. Cependant, la temporalité des sécheresses extrêmes évolue peu : 58% des sécheresses se produisent après la période de vulnérabilité des céréales d’hiver en 2000 et en 2050.

III.2.3 Cycles de sécheresses extrêmes

Le modèle ARPEGE-Climat permet de simuler 400 années sur le climat 2000 et 400 années sur le climat 2050. Ces simulations permettent alors de déterminer le nombre de cycles d’années de sécheresse, c’est-à-dire le nombre d’années successives de sécheresses. Reprenant les sécheresses extrêmes identifiées dans le Tableau 8 (31 années de sécheresses extrêmes au total sur le climat 2000 et 57 sur le climat 2050), le Tableau 10 classe ces sécheresses en fonction de leur durée.

Tableau 10. Durée des sécheresses systémiques extrême sur le climat 2000 et le climat 2050

Sécheresses extrêmes systémiques	Climat 2000	Climat 2050	Evolution (%)
Nombre de sécheresses extrêmes systémiques courtes (1 an)	23	45	95,6
Nombre de sécheresses extrêmes systémiques longues (supérieures) ou égales à 2 ans	4	5	25

Les sécheresses extrêmes systémiques identifiées sont en grande majorité des sécheresses qui durent une seule année sur les deux climats. Elles représentent respectivement 85% (climat 2000) et 90% (climat 2050) des sécheresses extrêmes systémiques. Cependant, le cycle des sécheresses extrêmes systémiques s’allonge : les événements qui durent plus de 2 ans augmentent de 25% en fréquence à horizon 2050. De plus, sur le climat 2000, les quatre sécheresses longues ont une durée de 2 ans alors que sur le climat 2050, 2 sécheresses longues ont une durée de 3 ans.

En moyenne, en 2050, les sécheresses longues engendrent des pertes de récoltes annuelles de 9,3% pour le blé tendre d’hiver (évolution de 94% par rapport au climat 2000), 11,5% pour l’orge d’hiver (évolution de 67% par rapport au climat 2000) et 29,8% pour les prairies (évolution de 14% par rapport au climat 2000).

Les sécheresses extrêmes systémiques durent en grande majorité un an. Cependant, à horizon 2050, leur cycle s’allonge, et deux sécheresses ont une durée de 3 ans engendrant des pertes de récoltes nationales annuelles d’une extrême ampleur.

Cette première analyse à l'échelle nationale de l'évolution des valeurs de l'indice montre un assèchement moyen généralisé et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses extrêmes. Des records de valeurs d'indice sont enregistrés dans le futur, et ce, dès les valeurs décennales. La fréquence des sécheresses extrêmes, comme on les a connu sur le passé, (sécheresse de 2003 et 2011) double dans le futur et ce type de sécheresse pourrait survenir tous les 7 ans. L'analyse de la temporalité de la sécheresse montre une augmentation de la durée moyenne de ce péril. Les sécheresses printanières augmentent, même si elles restent très minoritaires. La durée des cycles de sécheresses pluriannuelles augmente dans le futur, ce qui fragilise les exploitations agricoles et pose la question de la gestion de ces risques extrêmes.

III.2.4 Conséquences sur les pertes de récoltes

La Figure 44 présente le nombre de sécheresses en fonction de la moyenne annuelle de pertes de récoltes sur la France métropolitaine sur 100 simulations sur le climat 2000 et le climat 2050 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies.

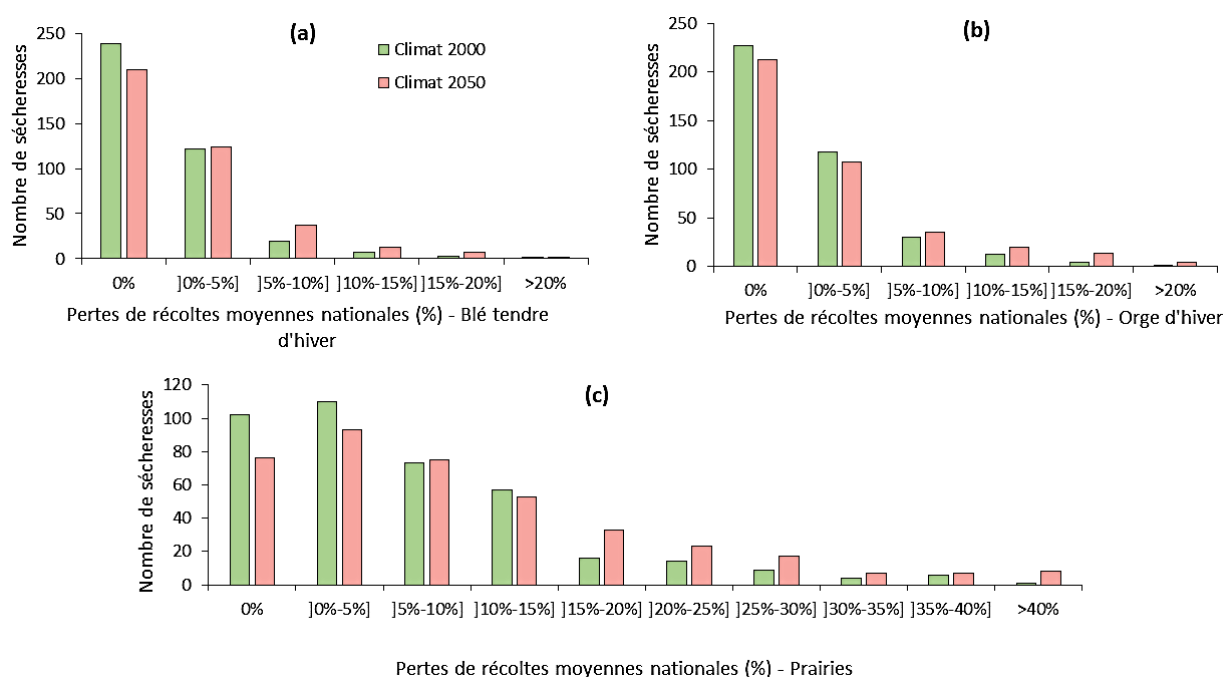


Figure 44. Nombre de sécheresses en fonction des pertes de récoltes moyennes (sur 100 simulations) nationales par classe de valeurs sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (rouge) pour (a) le blé tendre d'hiver, (b), l'orge d'hiver, (c) les prairies

La distribution des pertes de récoltes est différente entre les céréales d'hiver et les prairies. En effet, pour les céréales d'hiver, le nombre de sécheresses n'engendrant pas de pertes est le plus important et représente plus de 50% des sécheresses à climat actuel et à climat futur. Pour les prairies, le nombre de sécheresses engendrant des pertes de récoltes comprises entre 0% (strictement) et 5% est le plus

important. **Les prairies sont plus exposées au risque de sécheresse et les pertes de récoltes extrêmes nationales sont deux fois plus importantes en intensité que pour les céréales à paille.**

Pour les trois cultures, en 2050, la fréquence des sécheresses extrêmes augmente. Pour les prairies, la distribution s'allonge sur les queues de distribution avec une augmentation de l'intensité de ces sécheresses. Pour les céréales d'hiver, les pertes de récoltes extrêmes maximales sont comparables sur le climat 2000 et le climat 2050.

Une autre façon de représenter les pertes de récoltes est d'étudier leur période de retour. Ce type d'analyse est particulièrement réalisé dans le domaine de l'assurance et de la réassurance lorsqu'il s'agit d'étudier la fréquence de survenance des sinistres. La Figure 45 présente la distribution des pertes de récoltes calculées sur la France métropolitaine sur 100 simulations avec leur incertitude (quantiles 10-90) sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (en rouge) en fonction de leur période de retour pour le blé tendre d'hiver (a), l'orge d'hiver (b) et les prairies (c).

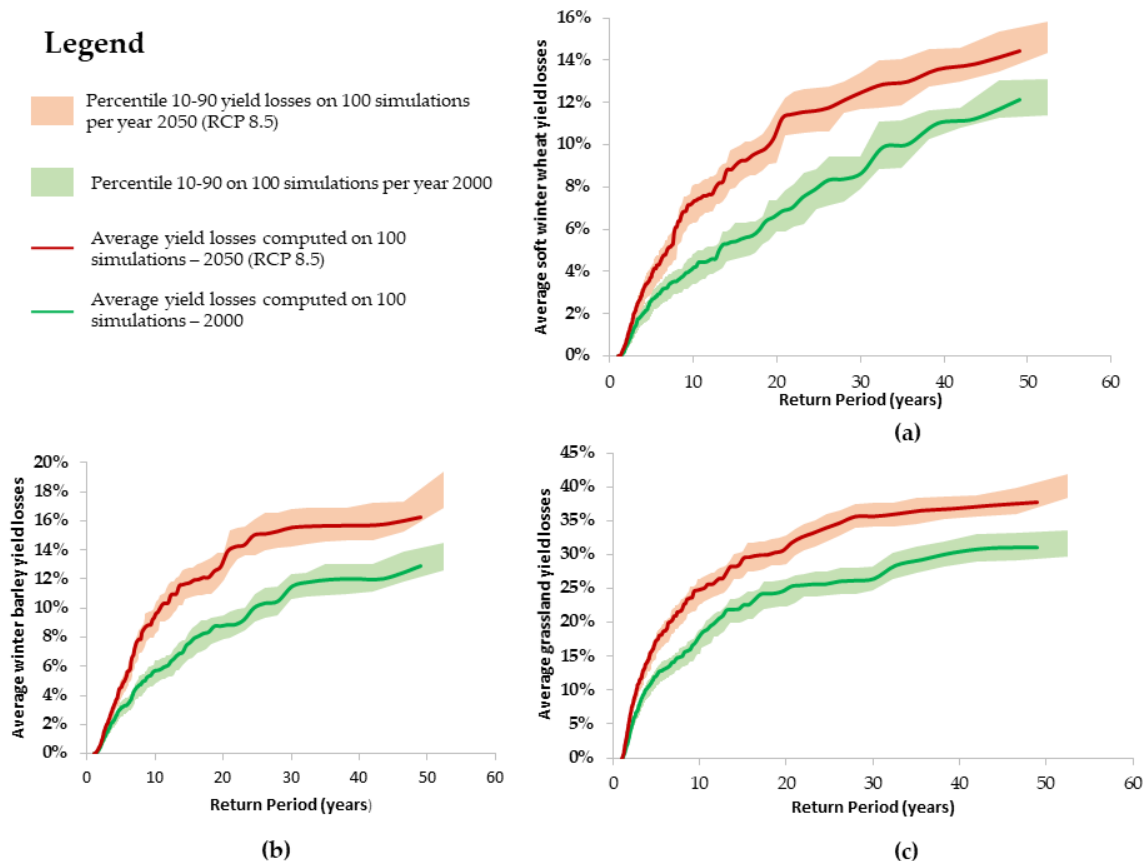


Figure 45. Période de retour des pertes de récoltes calculées sur France entière sur 100 simulations sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (rouge) pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver et (c) les prairies, d'après (Kapsambelis et al. 2022)

La Figure 45 met en évidence l'évolution des pertes de récoltes dues à la sécheresse à l'échelle de la France métropolitaine pour les trois cultures étudiées. Il apparaît en premier lieu que pour les trois

cultures, les courbes d'évolution des pertes de récoltes sur le climat 2000 et sur le climat 2050 ne se croisent pas, même avec l'incertitude de la simulation des pertes de récoltes prise en compte.

A l'échelle de la France métropolitaine, les pertes sont trois fois plus importantes pour les prairies que pour les céréales d'hiver pour une même période de retour considérée, indiquant la surexposition de ces productions végétales au risque de sécheresse. La forme de la courbe montre un plateau pour des périodes de retour entre 30 et 50 ans, indiquant que ces sécheresses engendrent des pertes de récoltes nationales égales. Les pertes de récoltes augmentent de nouveau au-delà des périodes de retour de 50 ans.

Cette figure permet d'évaluer l'évolution des pertes de récoltes dues à la sécheresse pour une même période de retour.

Les pertes de récoltes moyennes annuelles sur France entière augmentent de :

- 45% pour le blé tendre d'hiver. Elles passent de 1,6% à 2,4% ;
- 47% pour l'orge d'hiver. Elles passent de 2% à 2,9% ;
- 40% pour les prairies. Elles passent de 7,1% à 9,9% ;

Ces pertes de récoltes moyennes sont très faibles. Pour le blé tendre d'hiver, sur les 37,5 millions de tonnes produites en moyenne chaque année, la perte en 2050 est de 900 000 tonnes. Pour les prairies, la perte de production annuelle est de 3,6 millions de tonnes (sur les 36,2 millions de tonnes de production annuelle moyenne).

Les pertes de récoltes décennales sur France entière augmentent de :

- 75% pour le blé tendre d'hiver. Elles passent de 4,2% à 7,4% ;
- 79% pour l'orge d'hiver. Elles passent de 5,3% à 9,5% ;
- 35% pour les prairies. Elles passent de 18,5% à 25%.

Les pertes de récoltes vingtennales sur France entière augmentent de :

- 60% pour le blé tendre d'hiver. Elles passent de 6,7% à 10,7% ;
- 39% pour l'orge d'hiver. Elles passent de 8,8% à 12,2% ;
- 25% pour les prairies Elles passent de 24,9% à 31,1%.

L'évolution décennale est beaucoup plus marquée pour les céréales d'hiver car, comme nous le verrons par la suite, les valeurs d'indice augmentent significativement dans les régions particulièrement productrices en céréales. En 2050, pour le blé tendre d'hiver, cette perte de récoltes de 7,4% représente 2,8 millions de tonnes. Les pertes vingtennales pour la production de blé tendre d'hiver représentent 4 millions de tonnes de pertes soit presque l'équivalent de ce qui est utilisé pour l'alimentation animale dans cette branche.

Pour les prairies, les pertes décennales et vingtennales représentent déjà un déficit important dans la production fourragère. En effet, les pertes de récoltes décennales sont de 25% à horizon 2050 ce qui engendre une perte de production de 9,1 millions de tonnes. Les pertes vingtennales engendrent une perte de production de 11,3 millions de tonnes. Or, une étude réalisée par INRAE indique pour l'année 2015, les volumes consommés par le cheptel français sont de 70 à 72,5 millions de tonnes de matière sèche d'herbe dont 42 millions de tonnes sont consommés par du pâturage et environ 20 millions de tonnes par de l'herbe conservée (foin) (C. Cordier et al. 2020). Ces chiffres intègrent la production en superficie toujours en herbe (36 millions de tonnes) mais également les fourrages annuels dont le maïs ensilage (environ 20 millions de tonnes) et les prairies non permanentes (environ 15 millions de tonnes).

Une étude réalisée dans le bassin charolais sur les conséquences des pertes de rendement à la suite d'une sécheresse comme celle de 2003 montre que cet événement n'a pas d'impact sur la productivité de veaux ou de viande (Veysset, Bébin, et Lherm 2007). En revanche, les charges de l'exploitation pour l'alimentation du bétail ont augmenté d'environ 30% dans cette région. En 2003, le revenu moyen par éleveur diminue d'environ 8% (Veysset, Bébin, et Lherm 2007). Ainsi, les sécheresses extrêmes impactent fortement le revenu des exploitations agricoles d'élevage. Par ailleurs, l'achat de fourrage comme complément alimentaire peut, dans certains cas, représenter une menace pour le maintien des Appellations d'Origine Contrôlée (AOC). Par exemple, le cahier des charges de l'AOC du Reblochon impose une autonomie fourragère de 70% (Sérès 2010). Il n'est pas un cas particulier, puisque les principales appellations imposent l'autonomie fourragère (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2017a; 2017b). Ainsi, les éleveurs doivent s'adapter au changement climatique pour conserver leurs appellations. Les éleveurs peuvent, par exemple, augmenter la surface de pâturage du cheptel, ou implanter d'espèces plus résistantes à la sécheresse comme la luzerne (Sérès 2010). Ces adaptations nécessitent des investissements et constituent un coût supplémentaire pour les agriculteurs parfois difficile à supporter à la suite d'événements extrêmes.

Ainsi, les pertes décennales et vingtennales engendrent une baisse significative de production qui nécessite un ajustement pour les éleveurs : ils sont obligés de consommer leur stock de foin, épuisant leurs réserves ou s'ils n'ont pas assez de stock, ils doivent en acheter. Ainsi, ces sécheresses extrêmes impactent la marge dégagée sur l'exploitation d'élevage et conduisent à une baisse de leur revenu. Par ailleurs, la rigueur des cahiers des charges des AOP et AOC nécessite pour les agriculteurs de s'adapter au changement climatique pour conserver ces appellations. Cette adaptation peut engendrer des charges supplémentaires sur l'exploitation.

Les pertes de récoltes cinquantennales augmentent de :

- 18,5% pour le blé tendre d'hiver. Elles passent de 11,5% à 13,6% ;
- 30,8% pour l'orge d'hiver. Elles passent de 12% à 15,7% ;
- 21,4% pour les prairies. Elles passent de 30,4% à 36,9%.

Ces pertes, sont de grande ampleur et sont systémiques : elles affectent tout le territoire français métropolitain et aussi bien les céréales d'hiver que les prairies. Au niveau de l'exploitation agricole, les pertes sont d'autant plus importantes. Certains auteurs soulignent qu'elles peuvent entraîner la faillite des exploitations agricoles sans mesure de prévention (Bureau et Thoyer 2014).

Dans la partie précédente, nous avons proposé une classification des événements extrêmes en fonction de leur étendue spatiale (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 5%), de leur intensité (moyenne de pertes de récoltes sur la France métropolitaine) et de leur caractère extrême local (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 25%). Cette classification est reprise et présentée pour les trois cultures en Figure 46 sur les 31 sécheresses extrêmes identifiées sur le climat 2000 et sur les 57 sécheresses extrêmes identifiées sur le climat 2050.

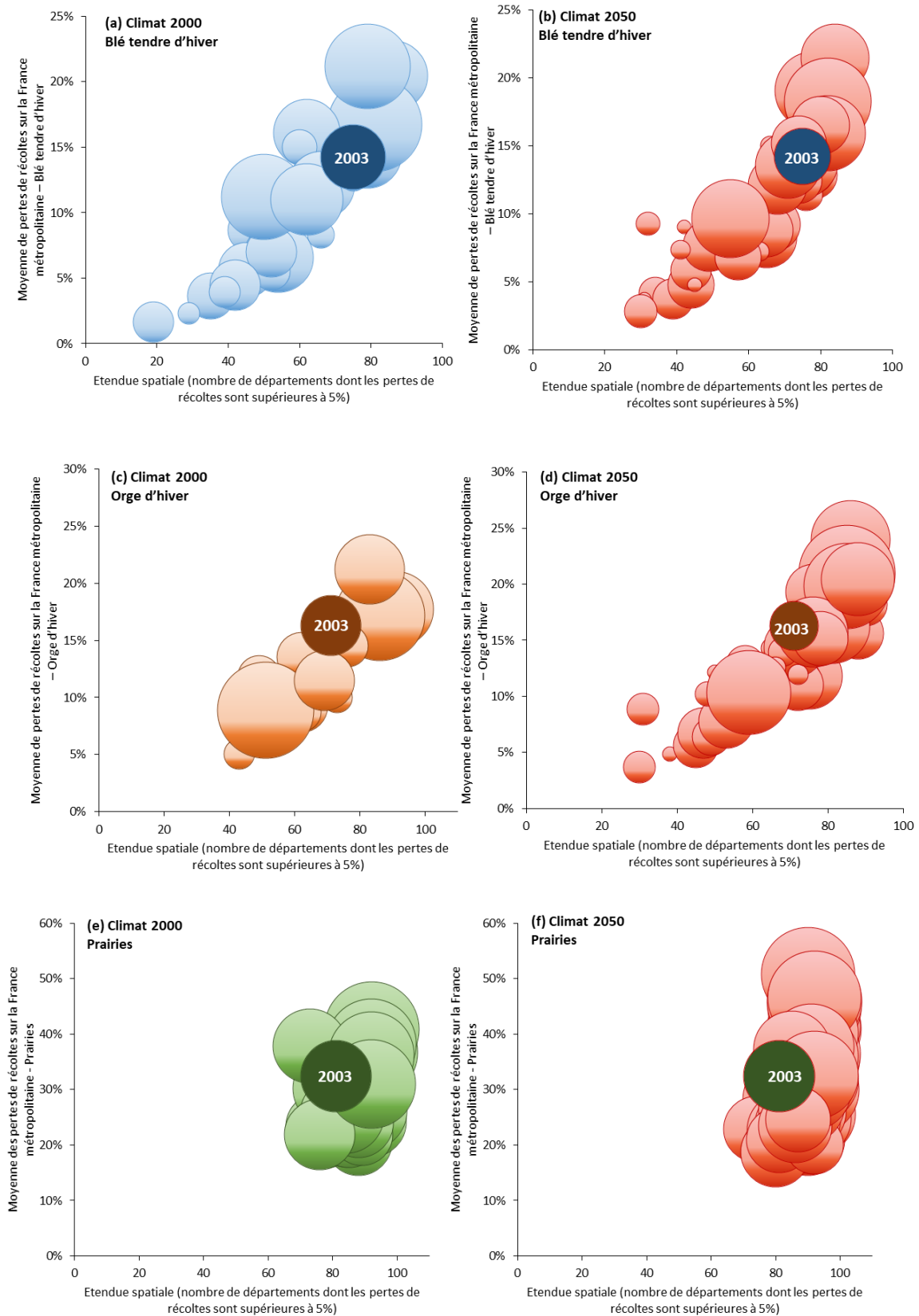


Figure 46. Classification des événements de sécheresses extrêmes en fonction de leur étendue spatiale (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 5%), de la moyenne nationale des pertes de récoltes et du caractère extrême local (nombre de départements dont les pertes sont supérieures à 25%), pour (a) le blé tendre d'hiver à climat 2000, (b) le blé tendre d'hiver à climat 2050, (c) l'orge d'hiver à climat 2000, (d) l'orge d'hiver à climat 2050, (e) les prairies à

climat 2000 et (f) les prairies à climat 2050. Le diamètre des disques les plus petits correspond à un nombre de département compris entre 4 et 10 pour les céréales d'hiver. La taille intermédiaire correspond pour les céréales d'hiver à un nombre de département en moyenne de 15 et pour les prairies à un nombre de départements de 50 en moyenne. La taille maximale des disques est de 45 départements et 86 départements impactés respectivement et les prairies

Cette figure présente l'impact des sécheresses définies comme extrêmes à partir de l'aléa climatique. Ce sont les mêmes événements pour les trois cultures. On constate une différence importante entre les céréales à paille et les prairies : ces dernières sont systématiquement caractérisées par des pertes de récoltes élevées sur l'ensemble du territoire. Dans le cas des céréales, certaines sécheresses se produisent à des périodes où les cultures ne sont pas vulnérables et les pertes de récoltes sont parfois minimales. La comparaison avec la sécheresse de 2003 montre que dans le futur, ce type d'événement surviendra régulièrement.

L'analyse sur les pertes de récoltes nationales montre une augmentation des pertes de récoltes extrêmes et ce dès les sécheresses décennales. Les pertes de récoltes sont particulièrement importantes pour les prairies, ce qui montre la surexposition des exploitations agricoles au risque de sécheresse dans le futur.

À horizon 2050, les sécheresses extrêmes sont plus fréquentes, plus intenses, systémiques et engendrent des niveaux de pertes jamais enregistrés auparavant. L'agriculture française doit s'adapter à ces risques. Les niveaux de pertes de récoltes engendrés laissent présager de la nécessité d'une répartition du coût des dommages entre les acteurs de la gestion du risque pour supporter ce coût et soutenir le revenu des exploitations agricoles.

III.3 Analyse géographique

III.3.1 Evolution des valeurs de l'indice climatique

De nombreux auteurs soulignent que l'évolution des sécheresses est différente selon les latitudes géographiques (IPCC 2014; 2021; 2019; Trnka et al. 2011). C'est pourquoi, il est important de s'interroger sur l'évolution des sécheresses à une échelle géographique plus fine. La Figure 47 présente la valeur moyenne annuelle du $DOWKI_{sech}$ à climat 2000 (a), à climat 2050 (b) et son évolution entre climat 2050 et climat actuel (c) calculé sur la période de vulnérabilité des prairies.

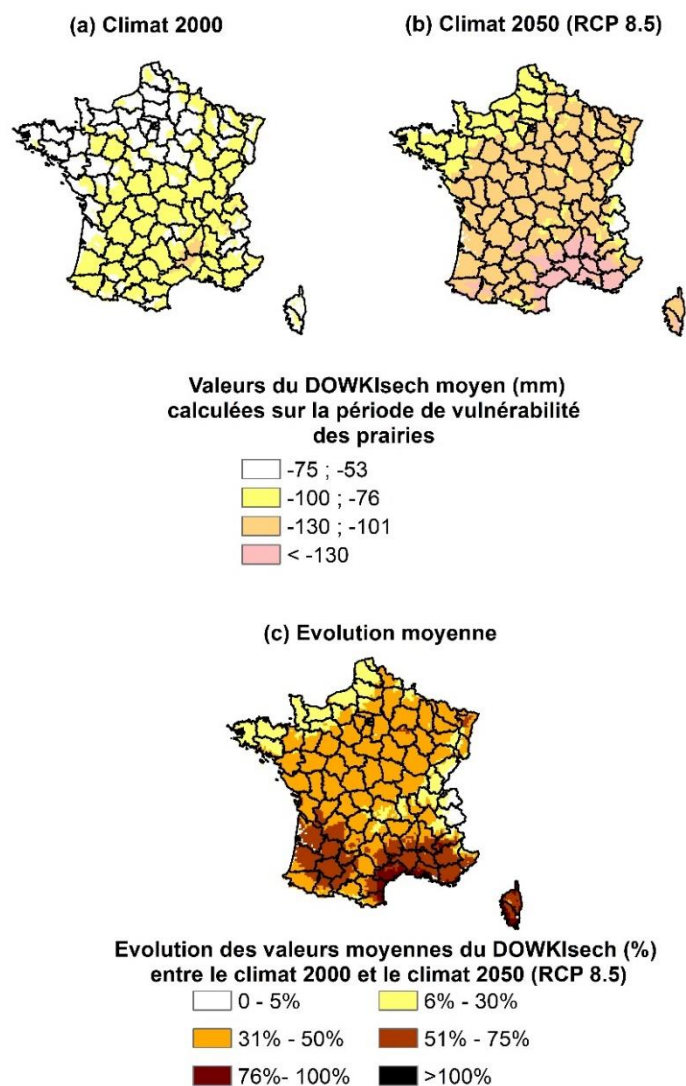


Figure 47. Valeurs annuelles moyennes du DOWKlsech (mm) calculé sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution moyenne des valeurs du DOWKlsech (%) entre le climat 2000 et le climat 2050

D'après la Figure 47, l'indice est relativement homogène sur le territoire métropolitain sur le climat 2000 avec une exposition moins importante des territoires dans la moitié Nord de la France (Bretagne et Ile-de-France particulièrement) que dans le Sud. **À climat futur, il est observé un assèchement généralisé sur la France. Le déficit hydrique est encore plus marqué sur le pourtour Méditerranéen.** L'évolution des valeurs moyennes de l'indice indique une augmentation du risque de sécheresse de plus de 50% en région Méditerranéenne et dans le Sud-Ouest. Ces résultats sont cohérents avec la revue de la littérature. En effet, de nombreuses études montrent que la région Méditerranéenne sera particulièrement exposée au risque de sécheresse (Blenkinsop et Fowler 2007; Beniston et al. 2007), avec des records de valeurs de déficit hydrique (IPCC 2014; J. P. Vidal et al. 2012).

Les résultats obtenus en calculant les valeurs de l'indice sur la période de vulnérabilité du blé tendre d'hiver sont similaires en termes d'évolution. On note des valeurs d'indice plus faibles dues au fait que toute la période estivale n'est pas prise en compte dans le calcul de la valeur annuelle de l'indice.

Afin d'analyser l'évolution des sécheresses extrêmes à horizon 2050, la même analyse est effectuée sur les valeurs décennales de l'indice. Les résultats sont présentés en Figure 48.

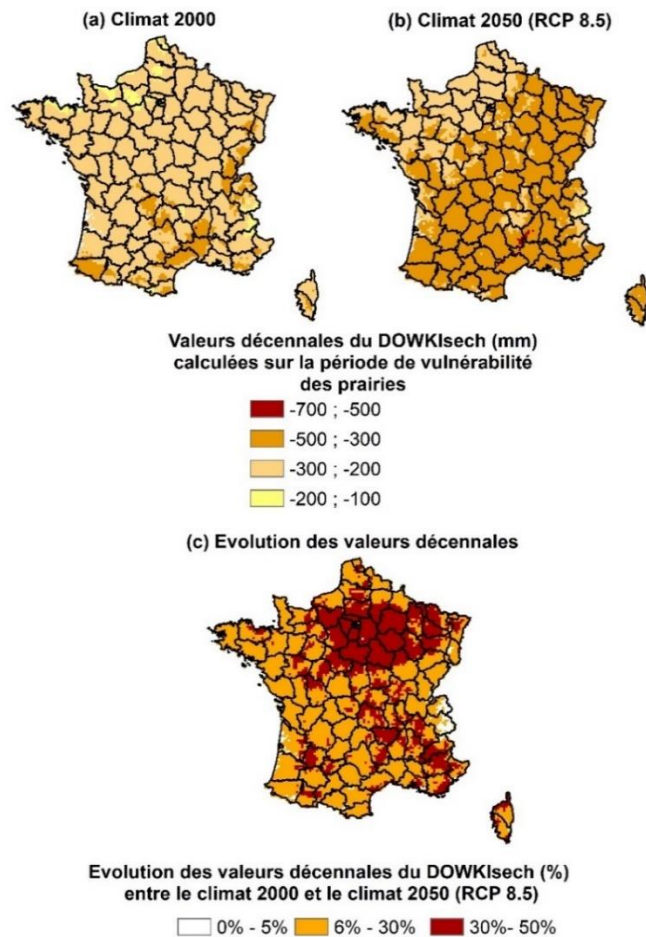


Figure 48. Valeurs décennales du DOWKIsch (mm) calculées sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution de l'intensité des valeurs décennales du DOWKIsch entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)

Plusieurs points importants sont à noter sur cette figure. Sur le climat 2000, les valeurs décennales de l'anomalie cumulée de bilan hydrique sont plus extrêmes dans le Sud de la France, soit sur le Sud-Ouest et sur le pourtour Méditerranéen. Sur le climat futur, les valeurs décennales du $DOWKIsch$ diminuent sur tout le territoire, mais l'évolution est particulièrement marquée dans la moitié Nord. Ces résultats sont en accord avec des études montrant que sur les risques extrêmes, l'évolution du déficit hydrique est particulièrement marquée dans la moitié Nord de la France (Deque 2007; Planton et al. 2008; J.-M. Soubeyroux et al. 2012; J. M. Soubeyroux et al. 2011).

Ainsi, la sécheresse décennale à horizon 2050 augmente en intensité, et l'anomalie cumulée du bilan hydrique tend à s'homogénéiser sur le territoire métropolitain. L'évolution entre le climat 2050 et le climat 2000, sur les événements décennaux, est beaucoup plus importante dans la moitié Nord de la France (entre 30% et 50%), dans les régions Centre, Ile-de-France, Grand-Est, régions fortement productrices en céréales d'hiver avec une très forte concentration des surfaces. Ceci justifie l'évolution beaucoup plus marquée des pertes de récoltes pour les céréales à paille que pour les prairies.

La Figure 49 présente l'évolution des valeurs cinquantennales de l'indice $DOWKI_{sech}$ entre le climat 2000 et le climat 2050.

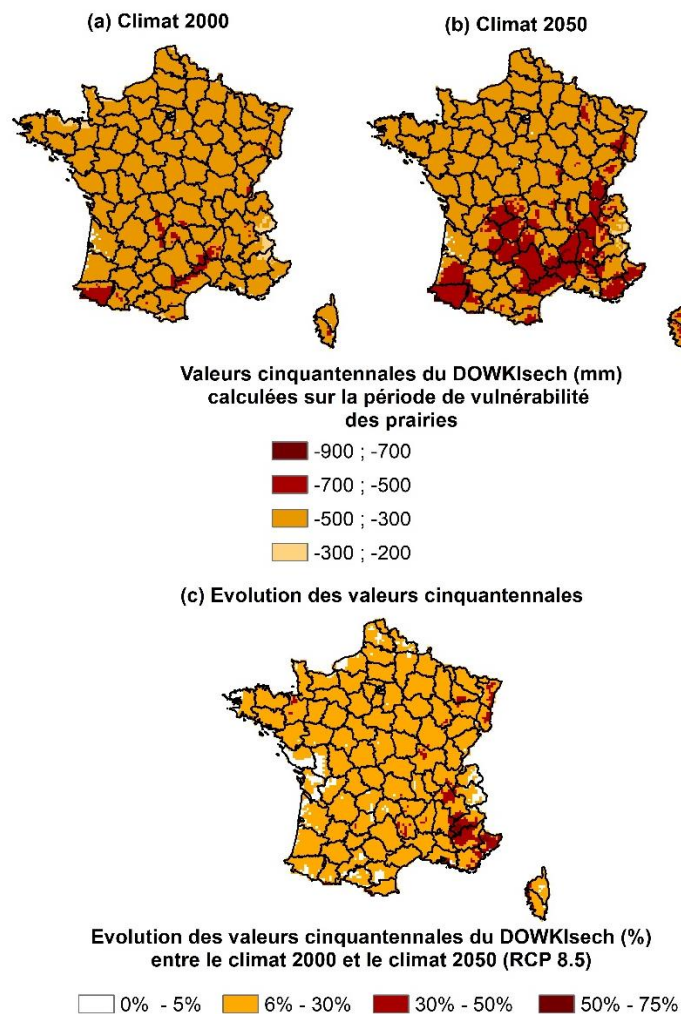


Figure 49. Valeurs cinquantennales du $DOWKI_{sech}$ (mm) calculées sur la période de vulnérabilité des prairies sur (a) le climat 2000 et (b) le climat 2050. (c) Evolution de l'intensité des valeurs cinquantennales du $DOWKI_{sech}$ entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5)

D'après la Figure 49, les valeurs cinquantennales du $DOWKI_{sech}$ sur le climat 2000 sont homogènes sur le territoire métropolitain. Sur le climat 2050, les valeurs du $DOWKI_{sech}$ montre que le Sud est plus exposé à la sécheresse. L'évolution des valeurs cinquantennales du $DOWKI_{sech}$ sur le territoire

métropolitain est en moyenne 16% et elle est homogène sur tout le territoire, engendrant alors des pertes de récoltes importantes pour les trois cultures. Sur ces événements, le risque n'est pas mutualisable à l'échelle nationale.

L'analyse géographique de l'aléa montre que sur les sécheresses décennales particulièrement, l'exposition des territoires n'est pas homogène : le Centre de la France et le Nord-Est voient une évolution plus marquée du déficit hydrique. Ces régions concentrent une partie très importante des surfaces cultivées en céréales d'hiver et le risque de sécheresse généré est atypique sur des cultures particulièrement vulnérables. Cependant, même si l'augmentation de l'intensité de ces risques est plus importante dans la moitié Nord de la France, la Méditerranée reste la région qui enregistre les valeurs de déficits hydriques les plus importantes. Il semblerait donc que l'exposition au risque de sécheresse dans la moitié Nord de la France se rapproche de celle observée aujourd'hui dans le Sud de la France générant un risque systémique extrême plus important.

III.3.2 Evolution des pertes de récoltes

De la même façon que pour le déficit hydrique, une analyse géographique de l'évolution des pertes de récoltes a été réalisée. La Figure 50 présente les pertes de récoltes moyennes départementales pour les trois cultures en 2050 ainsi que l'évolution de ces pertes entre le climat 2000 et le climat 2050.

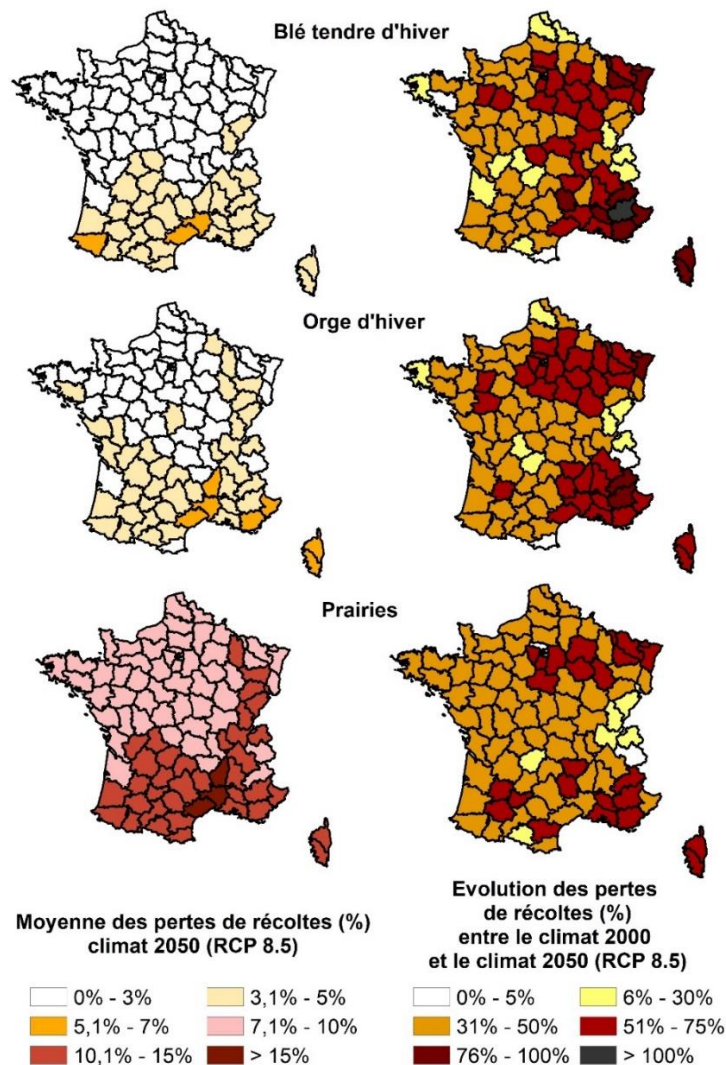


Figure 50. Pertes de récoltes moyennes annuelles départementales sur le climat 2050 et évolution des pertes de récoltes annuelles moyennes entre le climat 2000 et le climat 2050 pour le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies

D'après la Figure 50, les pertes de récoltes moyennes à climat futur sont plus importantes dans le Sud de la France pour les trois cultures ce qui souligne encore une fois l'exposition accrue de ces territoires au risque de sécheresse et est cohérent avec l'évolution du déficit hydrique. Les pertes de récoltes départementales montrent une exposition plus importante des prairies au risque de sécheresse. En ce qui concerne l'évolution des pertes de récoltes en 2050, elle est particulièrement importante dans le Sud-Est, Méditerranée, Corse et dans le Nord-Est de la France.

Il est important de noter qu'actuellement, le portefeuille de l'assurance MRC n'est développé que dans le Nord-Est de la France pour les prairies, ce qui, au vu des résultats, semble l'exposer particulièrement dans le futur.

La Figure 51 présente la période de retour des pertes de récoltes supérieures ou égales à 25% sur le département pour les trois cultures sur le climat 2050 et son évolution entre le climat 2000 et le climat

2050. Cette figure permet de mettre en évidence les territoires les plus exposés aux sécheresses extrêmes locales et la récurrence de ce risque.

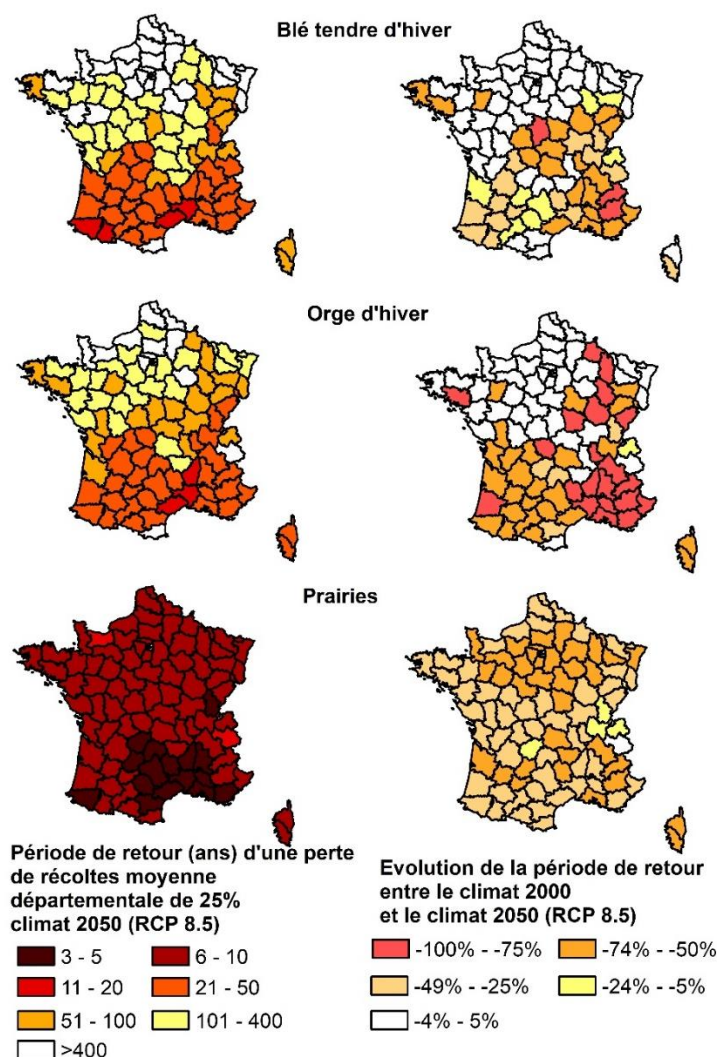


Figure 51. Période de retour en 2050 d'une perte de récolte moyenne départementale de 25% et évolution de cette perte de récolte entre le climat 2000 et le climat 2050 (RCP 8.5) pour le blé tendre d'hiver, l'orge d'hiver et les prairies

D'après la Figure 51, le Sud de la France enregistre les fréquences les plus élevées de ces pertes de récoltes extrêmes pour les trois cultures à horizon 2050. Pour les prairies, une perte de récolte de 25% est très récurrence à l'échelle départementale : sa période de retour est comprise entre 3 et 10 ans sur tout le territoire.

Pour les céréales d'hiver, on observe un gradient Nord/Sud : pour la moitié Sud de la France, la perte de récolte de 25% a une période de retour inférieure à 50 ans alors qu'elle serait supérieure à 100 ans dans la moitié Nord de la France.

L'évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 montre une augmentation en fréquence de ces pertes de récoltes départementales extrêmes sur tout le territoire pour les prairies, et sur la moitié Sud de la France pour les céréales à pailles.

Cette thèse a permis la construction d'un atlas des sécheresses sur le climat 2000 et sur le climat 2050. Cet atlas, dont les 3200 cartes ont été générées automatiquement, présente la cartographie des valeurs de l'indice $DOWKI_{sech}$ calculé sur la période de vulnérabilité des prairies et la cartographie des pertes de récoltes pour les trois cultures pour les 400 années sur le climat 2000 et les 400 années sur le climat 2050. Deux exemples de cartographies de l'aléa et des pertes de récoltes sont présentés en annexe 3.

L'analyse sur les pertes de récoltes départementales révèle que le Sud de la France est plus exposé. Par ailleurs, l'évolution à horizon 2050 des sécheresses est différente selon les cultures : pour les céréales à pailles, leur fréquence augmente dans le Sud de la France principalement, alors que pour les prairies, elle augmente sur tout le territoire métropolitain. L'analyse géographique révèle que le caractère extrême local des sécheresses est généralisé pour les prairies et se concentre dans la moitié Sud de la France pour les céréales à paille.

IV LES EVENEMENTS EXTREMES D'EXCÈS D'EAU A HORIZON 2050

IV.1 Analyse sur la Ferme France

IV.1.1 Evolution France entière du $DOWKI_{exces}$ entre le climat 2000 et le climat 2050

La Figure 52 présente la distribution des valeurs du $DOWKI_{exces}$ sur le climat 2000 et le climat 2050. Il est rappelé que pour l'excès d'eau, le $DOWKI$ est calculé uniquement sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver (3^{ème} décade d'avril – 1^{ère} décade d'août).

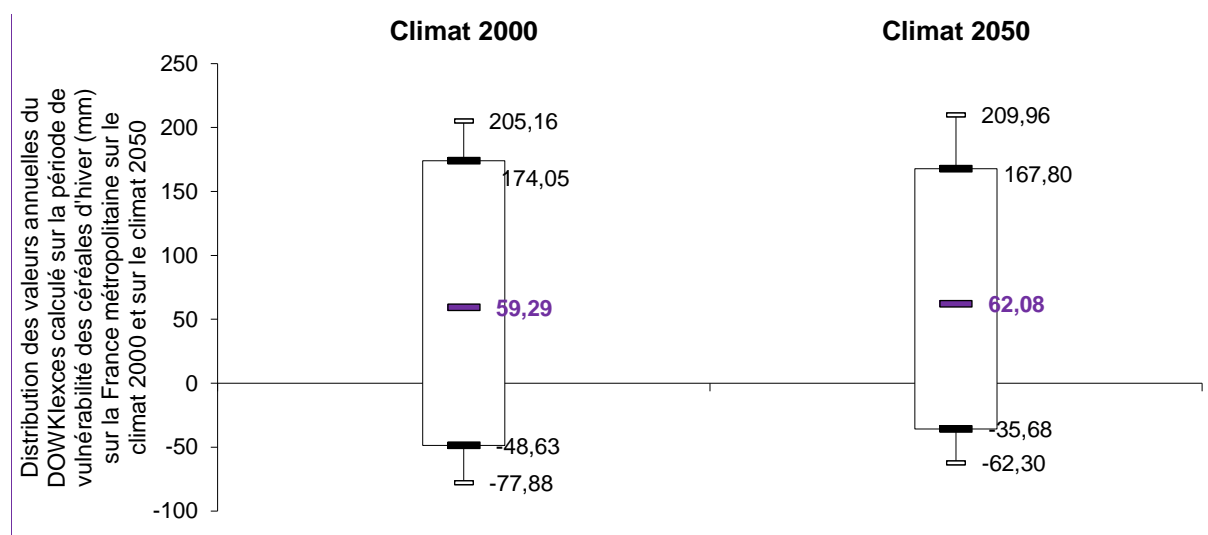


Figure 52. Distribution des valeurs annuelles du $DOWKI_{exces}$ calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver (mm) sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et sur le climat 2050. En violet : la valeur annuelle moyenne

D'après la Figure 52, il existe peu d'évolution entre le climat 2000 et le climat 2050. Ce résultat est cohérent avec l'assèchement généralisé observé en étudiant les valeurs du $DOWKI_{sech}$. Le $DOWKI_{exces}$ annuel moyen augmente de 4,7% entre le climat 2000 et le climat 2050, ce qui n'apparaît pas comme une évolution significative. Les valeurs décennales et vingtennales de l'indice ne montrent pas non plus d'évolution significative (évolution inférieure à 4%).

La Figure 53 permet de visualiser la distribution des valeurs du $DOWKI_{exces}$ à l'échelle de la France métropolitaine sur les 400 ans à climat 2000 et à climat 2050.

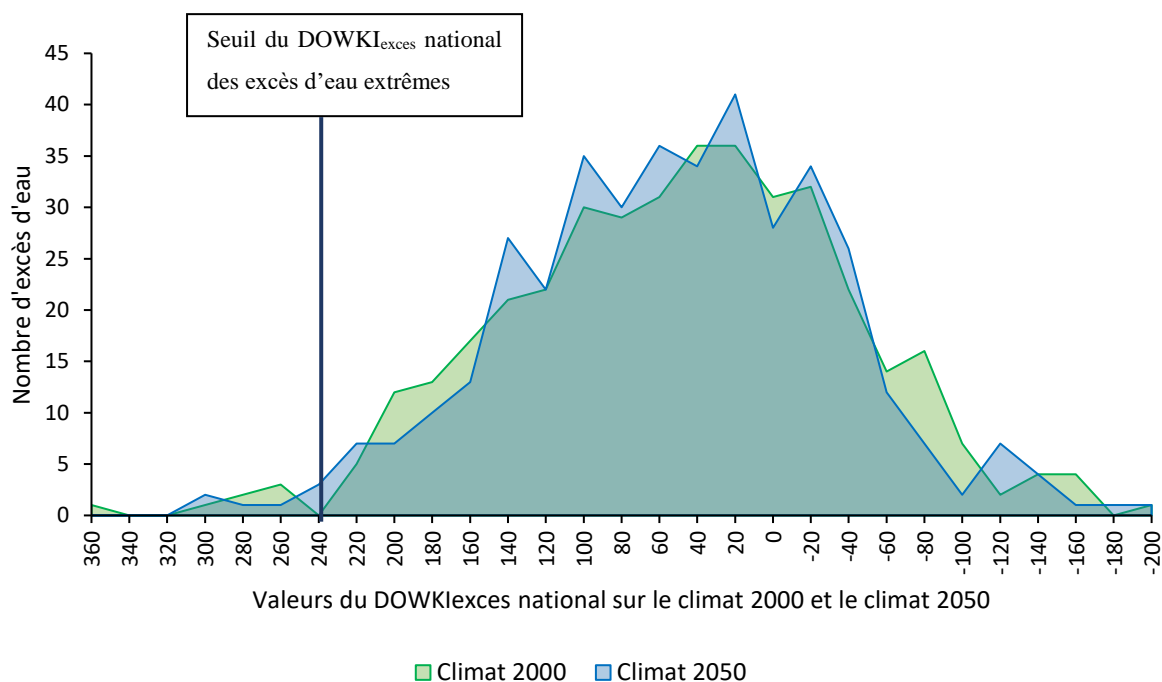


Figure 53. Distribution des valeurs du $DOWKI_{exces}$ moyen national sur le climat 2000 (400 valeurs) et sur le climat 2050 (400 valeurs). En abscisse les valeurs représentent des paliers, le premier palier est compris entre 340 mm et 360 mm, le dernier palier commence à -180 mm et va jusqu'à -200 mm. La valeur de l'excès d'eau le plus extrême se situe entre 340 et 360 mm sur le climat 2000 et entre 300 et 320 mm sur le climat 2050.

D'après la Figure 53, les formes de la distribution de l'indice $DOWKI_{exces}$ sont similaires à climat 2000 et climat 2050. **Sur les excès d'eau extrêmes, la queue de distribution est plus courte sur le climat futur ce qui est cohérent avec les résultats précédemment observés d'un assèchement généralisé.**

Sur l'historique, la valeur maximale du $DOWKI_{exces}$ est environ de 238 mm et elle est obtenue pour l'année 2016. On définit ce seuil de 238 mm pour analyser les excès d'eau extrêmes à climat actuel et à climat futur. Sur le climat 2000 comme le climat 2050, on dénombre 8 excès d'eau extrêmes qui dépassent ce seuil. Ces événements ont donc une période de retour de 50 ans à horizon 2050 et leur fréquence n'évolue pas entre le climat 2000 et le climat 2050. Leur intensité est également comparable entre les deux climats : la valeur moyenne du $DOWKI_{exces}$ de ces événements augmente de 3,6% à horizon 2050. Cependant, l'événement le plus extrême est représenté uniquement sur le climat 2000.

IV.1.2 Conséquences sur les pertes de récoltes

Pertes de récoltes en fonction de leur période de retour

La Figure 54 présente la distribution des pertes de récoltes liées aux événements d'excès d'eau sur le climat 2000 et sur le climat 2050 pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver.

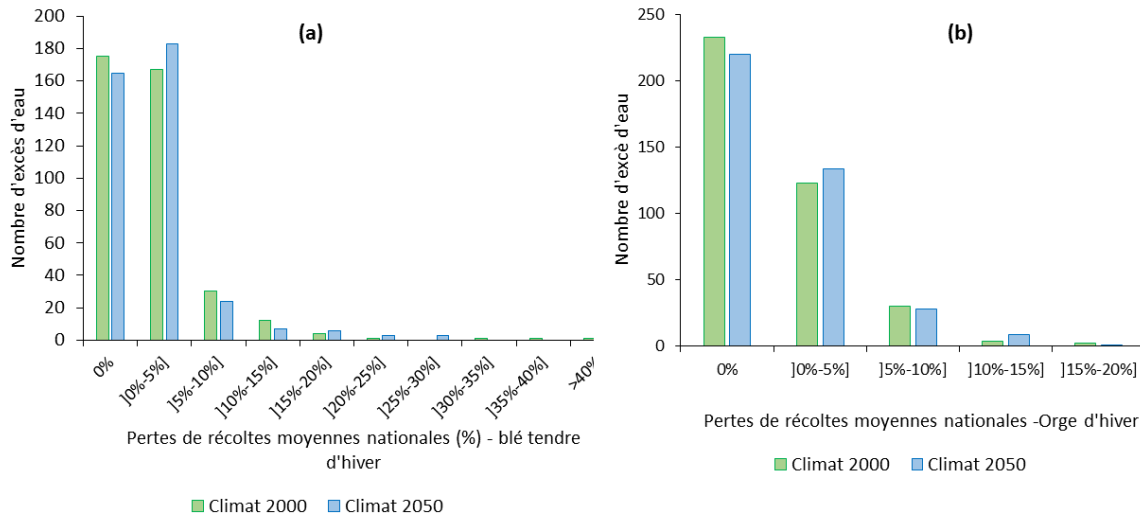


Figure 54. Distribution des pertes de récoltes moyennes nationales dues aux événements d'excès d'eau pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver sur le climat 2000 (vert) et le climat 2050 (bleu)

Plusieurs résultats importants sont à noter sur cette figure. Premièrement, les résultats sur les pertes de récoltes concordent avec ceux de l'indice $DOWKI_{excès}$, c'est-à-dire qu'il y a peu de différence entre le climat 2000 et le climat 2050 pour les deux cultures. De plus, les distributions de pertes de récoltes entre le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver sont différentes : le blé tendre d'hiver semble plus exposé au risque d'excès d'eau. En effet, la distribution des pertes de récoltes est décalée vers la droite et les pertes de récoltes extrêmes nationales sont deux fois plus importantes et deux fois plus nombreuses que pour l'orge d'hiver.

Cette différence ne s'explique pas par la période de calcul de l'indice car elle est identique pour les deux cultures. Ces pertes de récoltes extrêmes, sur l'historique, concernent un seul événement : l'excès d'eau de 2016. C'est donc sur ce péril que repose le calibrage du modèle (et donc la simulation des pertes de récoltes) sur les valeurs extrêmes de l'indice. Or, les pertes de récoltes sur cet événement sont bien plus importantes pour le blé tendre d'hiver (26,5%) que pour l'orge d'hiver (16,5%). C'est pourquoi, les pertes de récoltes sont beaucoup plus extrêmes pour le blé tendre que pour l'orge d'hiver. Cette différence entre les deux cultures est liée au fait que le blé tendre d'hiver est une culture plus traitée contre les maladies phyto-sanitaires que l'orge d'hiver, celle-ci étant plus résistante aux maladies, et il a été vu dans le chapitre précédent que celles-ci ont été les conséquences de cet excès d'eau et une des causes importantes de ces pertes de récoltes en 2016.

La Figure 55 présente la période de retour des pertes de récoltes pour le blé tendre d’hiver (a) et l’orge d’hiver (b) sur le climat 2000 et sur le climat 2050. L’incertitude des résultats est prise en compte, et un intervalle de confiance, construit sur 100 simulations des pertes de récoltes, est donné.

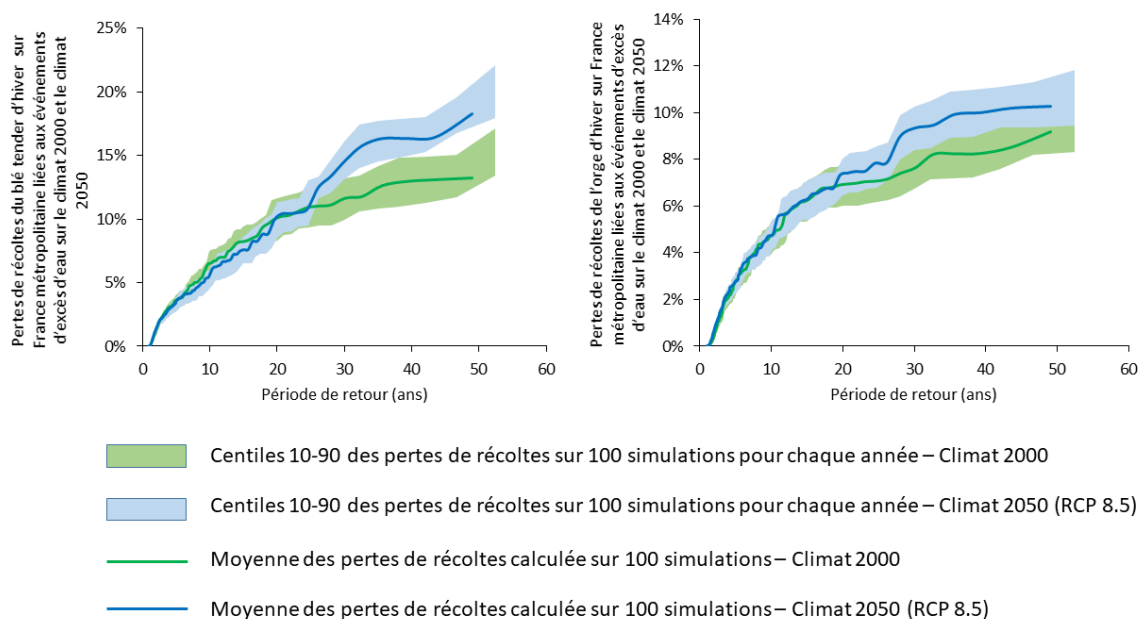


Figure 55. Pertes de récoltes liées à des événements d'excès d'eau en fonction de leur période de retour sur la France métropolitaine et simulées sur 100 simulations avec les quantiles 10-90 pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver

Les deux courbes se superposent pour les deux cultures pour les faibles périodes de retour des événements : il n’y pas d’évolution significative pour ces événements dans le futur. En ce qui concerne les excès d’eau extrêmes, pour le blé tendre d’hiver, les périodes de retour diminuent à horizon 2050 (pour les événements dont les périodes de retour sont supérieures ou égales à 30 ans) et pour l’orge, on observe ce même phénomène mais qui n’est pas complètement significatif.

Les pertes de récoltes annuelles moyennes sont de :

- 2,7% en 2050 soit pas d’évolution par rapport au climat 2000 pour le blé tendre d’hiver ;
- 1,8% en 2050 soit une augmentation 8,4% par rapport au climat 2000 pour l’orge d’hiver.

Les pertes de récoltes décennales sont de :

- 6,5% en 2050 soit une diminution de 10% par rapport au climat 2000 pour le blé tendre d’hiver ;
- 4,7% en 2050 c’est-à-dire pas d’évolution par rapport au climat 2000 pour l’orge d’hiver.

Les pertes de récoltes vingtennales sont de :

- 10,2% en 2050, c'est-à-dire pas d'évolution par rapport au climat 2000 pour le blé tendre d'hiver ;
- 7,4% en 2050 soit une augmentation de 6,3% par rapport au climat 2000 pour l'orge d'hiver.

Les pertes de récoltes cinquantennales sont de :

- 18,6% en 2050 pour le blé tendre d'hiver, soit une augmentation de 36,5% par rapport au climat 2000 ;
- 10,3% en 2050 pour l'orge d'hiver, soit une augmentation de 12,2% par rapport au climat 2000.

Ces pertes de récoltes sont supérieures à celles engendrées par des sécheresses cinquantennales pour le blé tendre d'hiver (et inférieures en revanche, pour l'orge d'hiver).

Pour les sécheresses, nous avons vu qu'en 2003, le revenu des céréaliers n'a pas été fortement impacté car la hausse des prix a compensé les pertes de récoltes au niveau des exploitations agricoles. Or, pour les excès d'eau, ce phénomène ne se produit pas. En effet, un excès d'eau comme celui de 2016 favorise l'apparition de maladies phytosanitaires et les agriculteurs sont dans l'incapacité de réaliser les épandages nécessaires pour protéger les cultures du fait de la stagnation de l'eau sur les parcelles. Les céréales récoltées sont non seulement en plus faible quantité mais sont également de moins bonne qualité ce qui diminue leur prix de vente (FranceAgriMer 2019). Ainsi, la perte est double pour les agriculteurs qui peuvent enregistrer une baisse importante sur leur revenu, plus importante que sur un événement de sécheresse. Avec l'augmentation du risque de sécheresse, et le maintien du risque d'excès d'eau, les exploitations agricoles seront plus vulnérables à horizon 2050 et les systèmes de gestion du risque doivent tenir compte du changement climatique pour soutenir le revenu des exploitations agricoles.

Classification des événements extrêmes d'excès d'eau

La Figure 56 présente la classification des événements d'excès d'eau sur le climat 2000 et le climat 2050 pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver sur les 8 événements extrêmes d'excès d'eau définis à partir de l'aléa climatique.

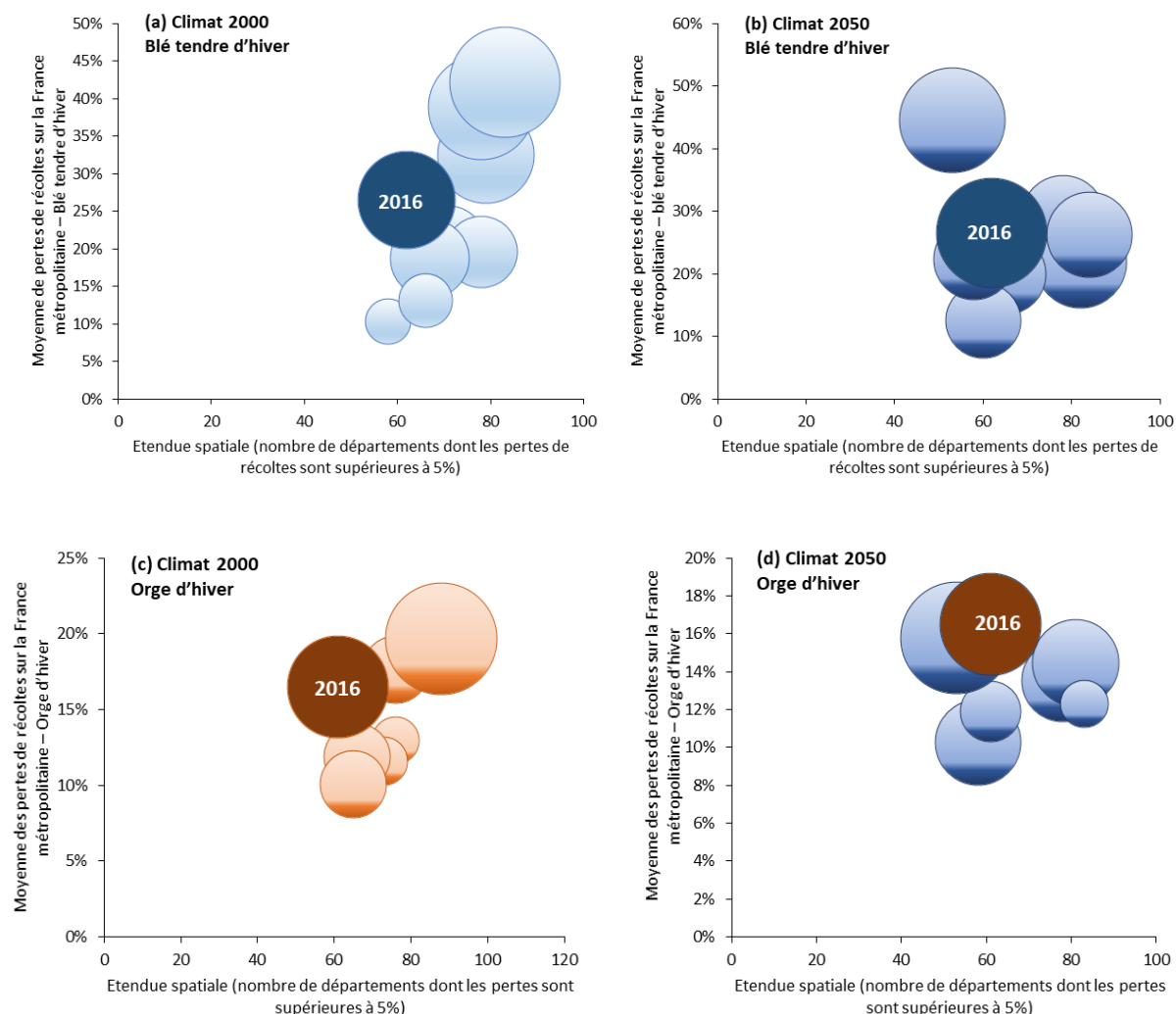


Figure 56. Classification des événements d'excès d'eau extrêmes en fonction de leur étendue spatiale (nombre de départements dont les pertes de récoltes sont supérieures à 5%), de la moyenne nationale des pertes de récoltes et du caractère extrême local (nombre de départements dont les pertes sont supérieures à 25%) pour (a) le blé tendre d'hiver à climat 2000 (b) l'orge d'hiver à climat 2000, (c) le blé tendre d'hiver à climat 2050, (d) l'orge d'hiver à climat 2050

D'après la Figure 56, des excès d'eau encore plus extrêmes que celui de 2016 pourraient survenir à climat actuel et engendreraient des pertes de récoltes supérieures à 40% pour le blé tendre d'hiver et de l'ordre de 20% pour l'orge d'hiver. **Ces pertes, d'une extrême intensité, n'ont encore jamais été enregistrées par le passé et représentent une perte de production de 15,7 millions de tonnes.**

Pour le blé tendre d'hiver, les excès d'eau extrêmes engendrent en moyenne 25% de pertes de récoltes sur le climat 2000 et le climat 2050. Pour l'orge d'hiver, les excès d'eau extrêmes engendrent en

moyenne 12,5% de pertes de récoltes sur le climat 2000 et le climat 2050 avec un caractère extrême local peu étendu (5% des départements impactés).

IV.2 Analyse géographique

IV.2.1 Evolution des valeurs de l'indice climatique

La Figure 57 présente les valeurs moyennes annuelles du $DOWKI_{excès}$ sur le climat 2000 (a), le climat 2050 (b) et l'évolution de ces valeurs entre le climat 2000 et le climat 2050 (c).

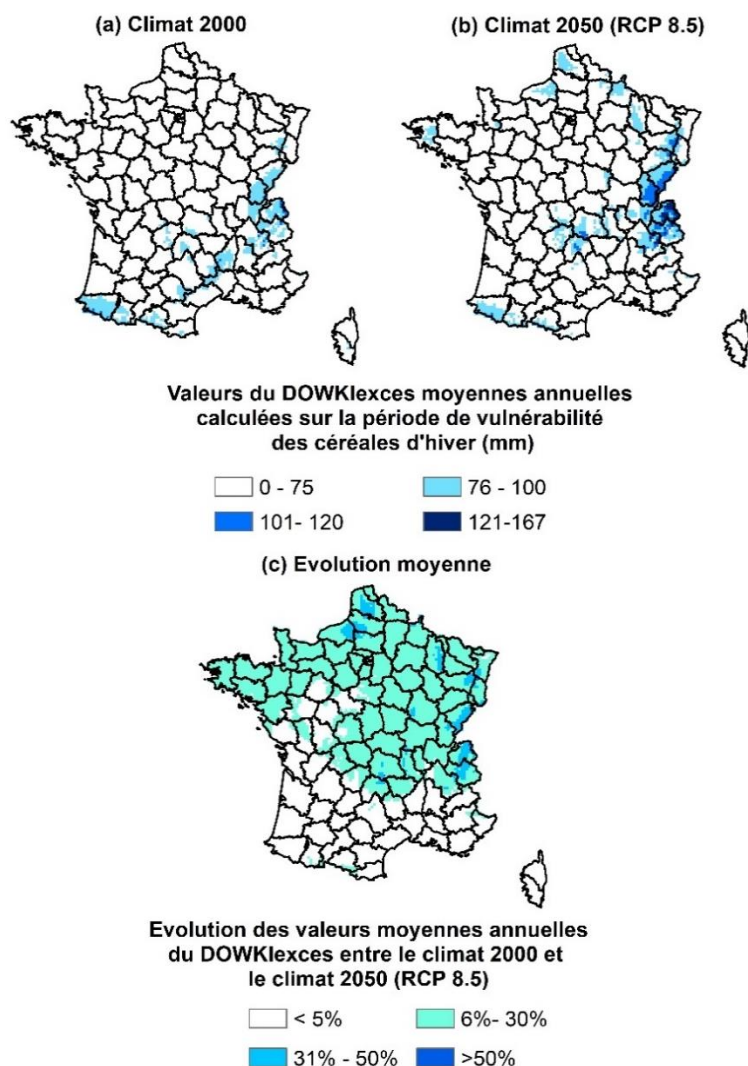


Figure 57. Valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{excès}$ calculées sur la période de vulnérabilité des céréales d'hiver (mm) sur (a) le climat 2000, (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs moyennes annuelles entre le climat 2000 et le climat 2050

L'évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 montre une régionalisation de ce risque : le risque d'excès d'eau augmente entre 6% et 30% dans la moitié Nord de la France, il diminue dans la moitié

Sud de la France. Cette régionalisation du risque, sur ces valeurs moyennes, montre que celui-ci pourrait être à priori mutualisable sur la France métropolitaine à horizon futur.

La Figure 58 présente les valeurs décennales du $DOWKI_{exces}$ sur le climat 2000 (a), le climat 2050 (b) et l'évolution de ces valeurs entre le climat 2000 et le climat 2050 (c) afin d'analyser l'évolution des événements extrêmes.

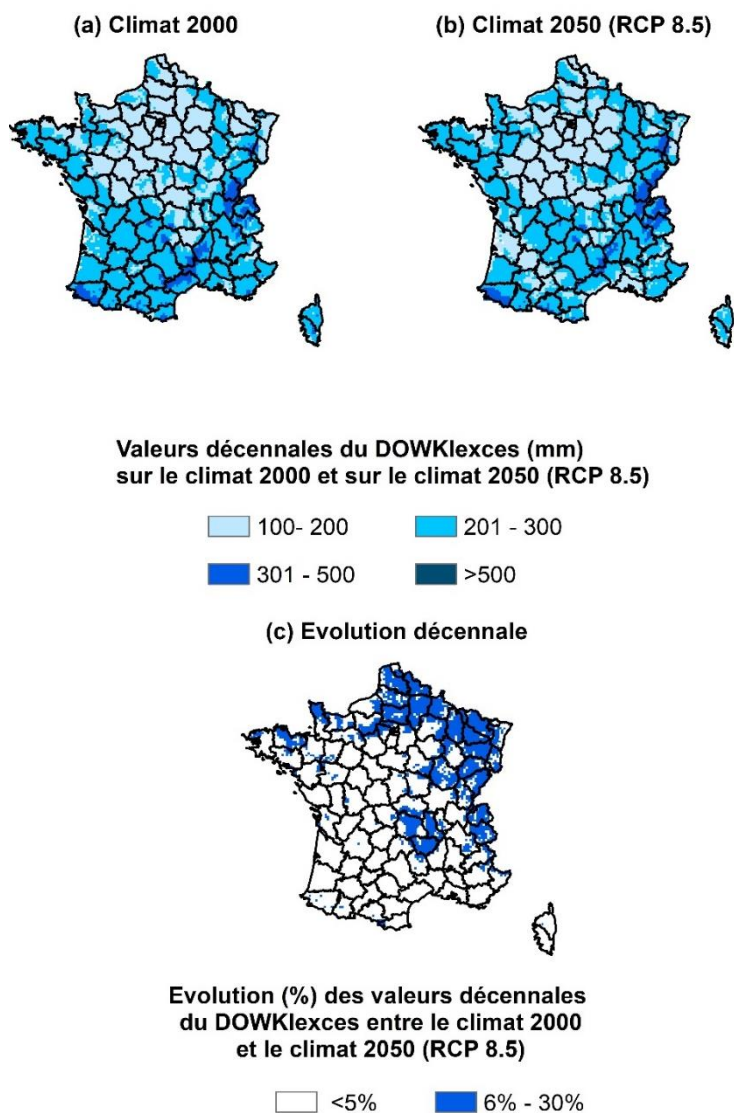


Figure 58. Valeurs décennales du $DOWKI_{exces}$ (mm) sur (a) le climat 2000 (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs décennales entre le climat 2000 et le climat 2050

D'après la Figure 58, les valeurs décennales du $DOWKI_{exces}$ sont plus importantes dans le Sud de la France et en particulier sur les zones de montagne (Pyrénées, Alpes, Massif Central) sur le climat 2000 comme sur le climat 2050. Ces résultats concordent avec les résultats du GIEC qui affirment que le Sud de la France est plus exposé aux événements de précipitations intenses (IPCC 2022). Il est à noter que

les fortes précipitations dans ces régions peuvent représenter d'autres types de risque (comme le risque cévenol).

Cependant, la cartographie de l'évolution des valeurs décennales entre le climat 2000 et le climat 2050 montre que le risque d'excès d'eau augmente dans la moitié Nord de la France, productrice en céréales. Des records de pertes de récoltes ont été enregistrés lors de l'excès d'eau de 2016 pour le blé tendre d'hiver dans ces régions. Ainsi, bien que le risque extrême d'excès d'eau évolue peu à horizon futur, il n'est pas à négliger.

La Figure 59 présente les valeurs cinquantennales du $DOWKI_{excès}$ à climat 2000 et 2050 et leur évolution.

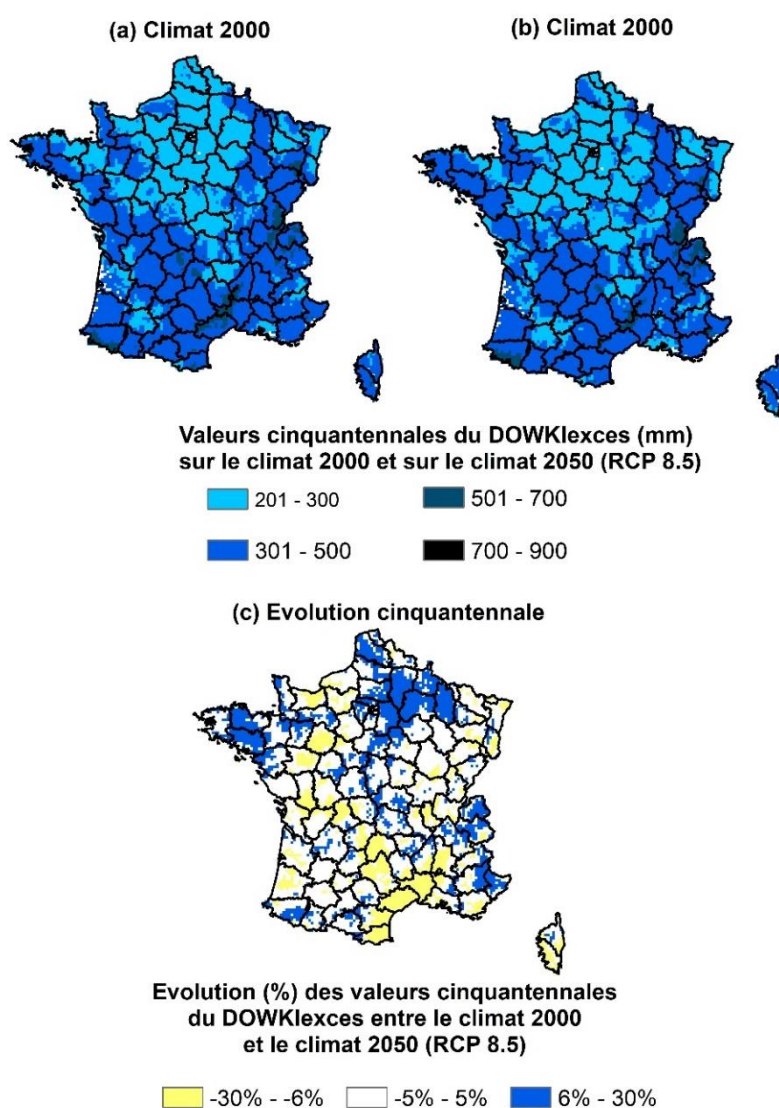


Figure 59. Valeurs cinquantennales du $DOWKI_{excès}$ (mm) sur (a) le climat 2000 (b) le climat 2050 et (c) évolution des valeurs décennales entre le climat 2000 et le climat 2050

Les cartographies des valeurs cinquantennales du $DOWKI_{excès}$ sur le climat 2000 et le climat 2050 sont similaires et les plus fortes valeurs de l'indice sont situées sur la moitié Sud de la France, en Bretagne

et dans les massifs montagneux (Alpes, Vosges, Jura, Pyrénées et Corse). Globalement, la cartographie montre peu d'évolution de ces valeurs entre le climat 2000 et le climat 2050.

Cette analyse montre que le risque d'excès d'eau n'évolue pas à horizon 2050 en termes de fréquence et intensité à l'échelle de la France métropolitaine. Un excès d'eau comme celui de 2016 a une période de retour de 50 ans à climat actuel et futur. Cependant, sur l'historique, ces événements ont engendré les pertes de récoltes les plus importantes jamais enregistrées pour les cultures de blé tendre d'hiver et d'orge d'hiver. À horizon futur, ce sont également ces événements qui génèrent les pertes de récoltes les plus intenses (près du double des pertes engendrées par les sécheresses). L'analyse géographique de l'indice climatique indique que le risque d'excès d'eau extrême augmente de 30% dans la moitié Nord de la France, dans des régions particulièrement productrices. Cependant, cette évolution reste très inférieure à celle observée concernant le risque de sécheresse extrême.

V CORRELATION DES EVENEMENTS DE SECHERESSE ET D'EXCES D'EAU

V.1 Caractérisation de ces risques

Sur l'historique, il a pu être identifié que l'événement de 2018 est un événement qui combine à la fois une sécheresse dans la région Grand-Est, engendrant des pertes de récoltes importantes sur les prairies, et à la fois un excès d'eau dans le Sud-Ouest de la France, engendrant des pertes de récoltes importantes pour les céréales d'hiver. Il est intéressant d'analyser la fréquence et l'intensité de ce type d'événements, qui combinent à la fois un événement d'excès d'eau et à la fois un événement de sécheresse, qui surviennent la même année mais sur des territoires différents.

Sur le climat 2000, 20 événements combinent à la fois un excès d'eau extrême et une sécheresse extrême, ils ont une période de retour de 20 ans. Sur le climat 2050, ils sont 38, ce qui représente une évolution de 90%. **À climat futur, ces événements ont une période de retour de 10 ans. Ainsi, à horizon 2050, la fréquence de ce type d'événement double.**

Il est important de caractériser ces événements en termes d'intensité et de territoire impacté. Ainsi, la Figure 60 présente la valeur moyenne du $DOWKI_{sech}$ et du $DOWKI_{exces}$ sur le territoire impacté par les deux aléas (sécheresse et excès d'eau) pour ces événements à climat actuel et à climat futur.

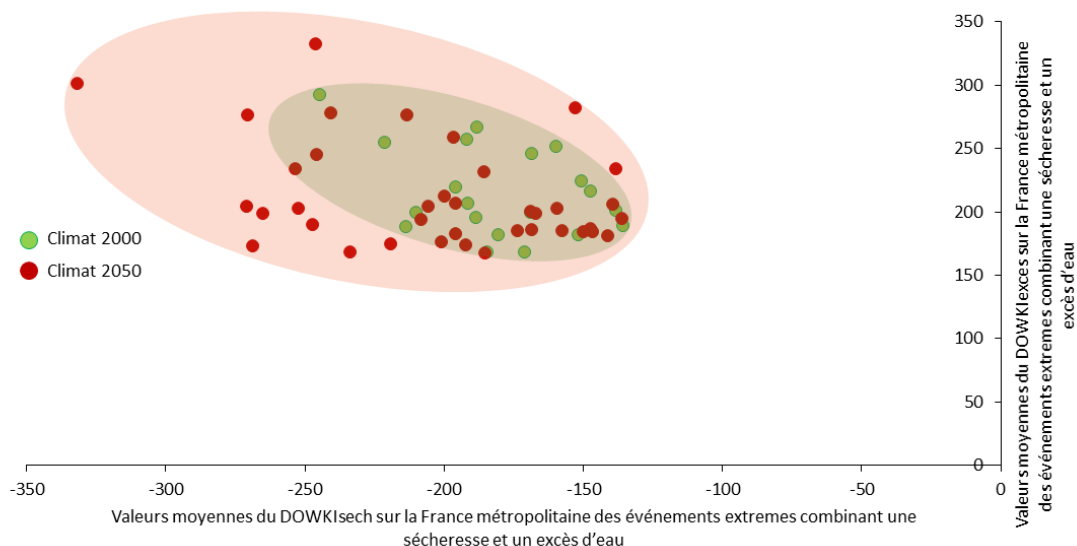


Figure 60. Caractérisation des valeurs de l'aléa des événements extrêmes combinant sur le territoire métropolitain une sécheresse extrême et excès d'eau extrême sur le climat 2000 et sur le climat 2050

D'après la Figure 60, les événements tendent à être plus extrêmes à horizon 2050, avec une intensité marquée aussi bien par l'épisode de sécheresse que par l'épisode d'excès d'eau. En effet, un événement

à horizon 2050 est particulièrement extrême et se situe à gauche sur le graphique. Cet événement engendre des pertes de récoltes à l'échelle nationale d'environ 23% pour le blé tendre d'hiver, 12% pour l'orge d'hiver et 3% pour les prairies. Les épisodes de sécheresse se situent en grande majorité sur le pourtour Méditerranéen (Languedoc-Roussillon, Corse, PACA). **Une sécheresse méditerranéenne, combinée à un excès d'eau qui survient dans le Grand-Est et en Bourgogne-Franche Comté sont les épisodes les plus répandus à climat actuel comme à climat futur.**

L'analyse d'événements qui combinent à la fois une sécheresse extrême et un excès d'eau extrême révèle que leur fréquence double à horizon 2050. Dans le futur, le plus souvent, ces événements enregistrent une sécheresse extrême dans le Sud de la France et un excès d'eau sur le Grand-Est ou le littoral Atlantique. Ces événements augmentent en intensité à horizon 2050.

V.2 Distribution des pertes de récoltes combinant sécheresse et excès d'eau

La Figure 61 présente la période de retour des pertes de récoltes dues au cumul des aléas de sécheresse et d'excès d'eau pour le blé tendre d'hiver (a) et l'orge d'hiver (b) sur le climat 2000 et sur le climat 2050.

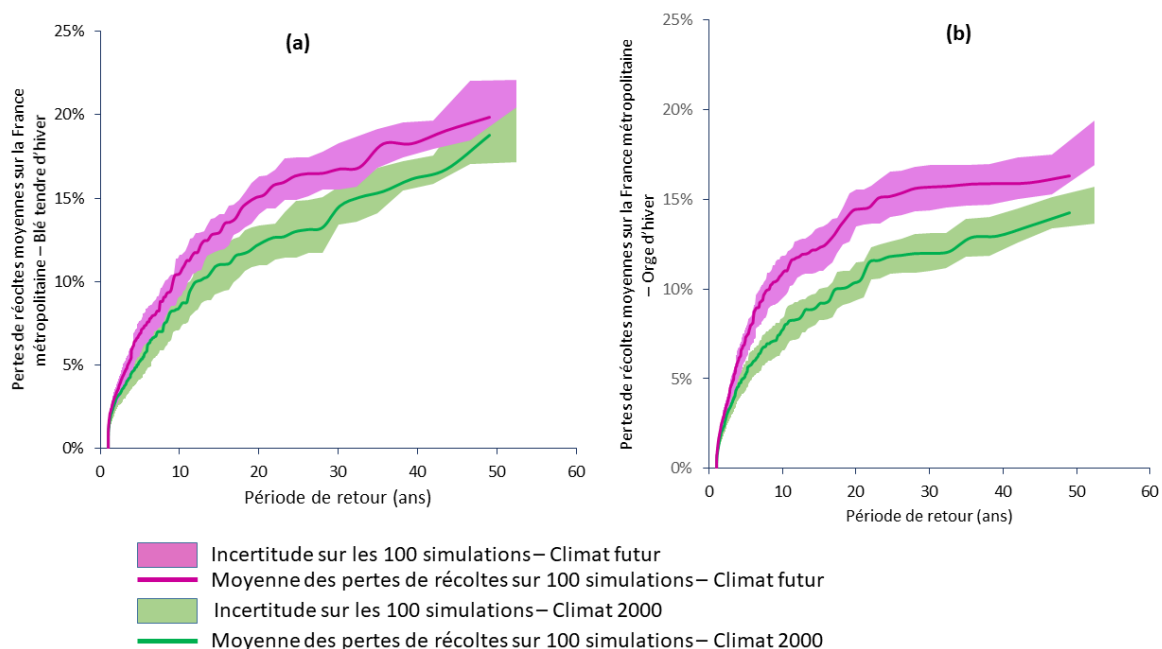


Figure 61. Pertes de récoltes sur la France métropolitaine dues aux événements combinés de sécheresse et d'excès d'eau en fonction de la période de retour pour (a) le blé tendre d'hiver et (b) l'orge d'hiver

Les pertes moyennes annuelles combinant les deux périls sont de :

- 5% en 2050 pour le blé tendre d'hiver, soit une augmentation de 18% par rapport au climat 2000 ;
- 4,7% en 2050 pour l'orge d'hiver, soit une augmentation de 30% par rapport au climat 2000.

Ainsi, combinées, ces pertes de récoltes sont plus importantes qu'en prenant uniquement les pertes dues à chacun des aléas. Ces pertes restent faibles à l'échelle de la France métropolitaine malgré leur augmentation importante à horizon 2050.

Les pertes décennales sur la France métropolitaine combinant les deux périls sont de :

- 10,5% en 2050 pour le blé tendre d'hiver, soit une augmentation de 24% par rapport au climat 2000 ;
- 10,9% en 2050 pour l'orge d'hiver, soit une augmentation de 41% par rapport au climat 2000.

Les pertes décennales sont du même ordre de grandeur pour les deux cultures et sont supérieures aux pertes décennales enregistrées par chaque péril indépendamment. De plus, leur augmentation est importante à horizon 2050.

Les pertes vingtennales sur la France métropolitaine combinant les deux périls sont de :

- 15,1% e 2050 pour le blé tendre d'hiver, soit une augmentation de 24% environ par rapport au climat 2000.
- 14,4% en 2050 pour l'orge d'hiver, soit une augmentation de 38% environ par rapport au climat 2000.

Les pertes cinquantennales sur la France métropolitaine combinant les deux périls sont de :

- 20,2% e 2050 pour le blé tendre d'hiver, soit une augmentation de 7% environ par rapport au climat 2000.
- 16,6% en 2050 pour l'orge d'hiver, soit une augmentation de 16% environ par rapport au climat 2000.

Les pertes de récoltes vingtennales en 2050 sur le blé tendre d'hiver sont supérieures à celles enregistrées sur chacun des périls indépendamment. Ces pertes sont dues à la combinaison d'événements importants d'excès d'eau et de sécheresse sur des territoires différents. Les pertes de récoltes cinquantennales sont dues à des événements d'excès d'eau uniquement.

V.3 Cycles de sécheresse-excès d'eau extrêmes sur plusieurs années

Lors de la concertation du Varenne agricole de l'eau, les assureurs et les exploitants agricoles se sont beaucoup interrogés sur la fréquence d'événements extrêmes successifs comme il est survenu ces 5 dernières années avec notamment l'alternance d'événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau comme cela a été le cas sur la période 2015-2017. Il a été démontré sur les sections précédentes que la fréquence des sécheresses extrêmes double à horizon 2050 et que les événements d'excès d'eau extrêmes gardent la même fréquence. Ainsi, il est légitime de s'interroger sur une éventuelle augmentation de la succession de ces risques extrêmes systémiques qui engendrent des pertes de récoltes importantes.

Sur le climat 2000, il n'existe qu'un seul cycle sécheresse extrême- excès d'eau extrême. Il dure 2 ans. Il entraîne les pertes de récoltes sur la France métropolitaine suivantes :

- 20,6% de pertes de récoltes moyennes annuelles pour le blé tendre d'hiver ;
- 12,4% de pertes de récoltes moyennes annuelles pour le blé tendre d'hiver ;
- 11,3% de pertes de récoltes moyennes annuelles pour les prairies (la première année les pertes de récoltes sont de 23,3% mais il n'y a pas de pertes de récoltes la deuxième année car les prairies ne sont pas sensibles à l'excès d'eau).

Sur le climat 2050, il existe trois événements de ce type, le nombre d'événements augmente donc à horizon 2050. Deux événements ont une durée de 2 ans, et un événement a une durée de trois ans. L'événement de trois ans est constitué d'une sécheresse systémique de 2 ans suivie d'un excès d'eau l'année suivante. Le Tableau 11 présente les pertes de récoltes moyennes annuelles sur la France métropolitaine dues à ces trois événements.

Tableau 11. Moyenne des pertes de récoltes annuelles par culture pour les 3 événements combinés sur le climat 2050

Événements combinés	Années 39-40-41	Année 173-174	Année 233-234
Blé tendre d'hiver	14,2%	14,0%	9,5%
Orge d'hiver	13,5%	10,3%	8,6%
Prairies	21,7%	12,9%	9,5%

D'après le Tableau 11, les pertes de récoltes sont particulièrement importantes pour les trois cultures, sur les deux premiers événements. Pour les céréales d'hiver, l'événement sur trois ans, en termes de pertes de récoltes, est similaire à la sécheresse de 2003, ce qui signifie qu'un événement engendrant des pertes aussi importantes que 2003 pourrait avoir une durée de 3 ans dans le futur. Pour les prairies, ce même événement a une perte de récoltes annuelle moyenne proche de celle de 2011. En effet, les prairies ne sont pas sensibles à l'excès d'eau et ainsi, les deux premières années enregistrent des pertes de récoltes très importantes (supérieures à 30%) et la troisième année n'enregistre pas de pertes.

VI DISCUSSION

VI.1 Fiabilité de l'utilisation d'un seul modèle climatique

Ce travail de thèse utilise un seul modèle climatique, le modèle ARPEGE-Climat car il est le seul aujourd'hui à posséder un large panel de simulations à climat constant, intégrant le changement climatique. Les sorties du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France, sont par ailleurs débiaisées en utilisant la grille de réanalyse SAFRAN. Cependant, la fiabilité des résultats obtenus peut être interrogée dans la mesure où un seul modèle est utilisé. C'est pourquoi, une analyse spécifique a été réalisée sur le $DOWKI_{sech}$ pour comparer les résultats obtenus sur les valeurs de l'indice à l'échelle de la France métropolitaine avec d'autres modèles. La méthodologie est décrite dans le paragraphe suivant.

VI.1.1 Méthodologie de calcul du $DOWKI_{sech}$

Les modèles EURO-CORDEX

Les données de précipitations et d'évapotranspiration ont été téléchargées sur la base de données DRIAS qui a l'avantage de posséder les données débiaisées sur la grille de réanalyse SAFRAN et une étude menée en Roumanie a montré que ces modèles sont adaptés pour une étude sur l'impact du changement climatique sur les productions végétales (Bartok et al. 2021) . Ainsi, le $DOWKI_{sech}$ est calculé sur la maille de 8kmx8km sur la France métropolitaine pour 5 modèles :

- IPSL-CM5A (simulation IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4, soit le modèle global ISL et le modèle régional associé (RCM) RCA4). Ce modèle développé par l'Institut Pierre Simon Laplace (ISPL), couple le modèle d'atmosphère LDMZ, le modèle d'océan OPA, le modèle de glace LIM et le modèle de surface ORCHIDEE. Le modèle est évolutif et permet d'intégrer de nouvelles composantes telles que les composantes du cycle de carbone, l'évolution de la végétation, la fonte des glaces (Marti et al. 2006). La version CM5A est une extension de la version CM4 qui comprend la nouvelle version du modèle LDMZ et une nouvelle version du modèle LIM. Tous ces modèles sont couplés à OASIS (coupleur de modèles). Le modèle IPSL-CM4 a notamment été utilisé pour le quatrième rapport du GIEC.
- CNRM-CM5 (simulation CNRM-CERFACS-ALADIN63, soit le modèle global CNRM et le modèle régional (RCM) ALADIN) Ce modèle est développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et est utilisé pour l'étude de scénarios climatiques. Il est constitué de plusieurs modèles qui sont couplés grâce au coupleur OASIS-3. Ainsi, il intègre le modèle ARPEGE-Climat pour l'atmosphère, le modèle d'océan NEMO, le modèle de glace de mer GEMATO, le modèle de surface continentale et flux océan-atmosphère SURFEX et le modèle TRIP pour simuler le transport de l'eau douce des fleuves vers les océans (Voltaire et

al. 2013). Il est utilisé notamment dans le cinquième rapport du GIEC pour les prévisions climatiques à horizon futur.

- NCC (simulation NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5, soit le modèle global Nor-ESM1 et le modèle régional (RCM) HIRHAM5 v3). Ce modèle est développé par le centre du climat de Norvège et l'Université de Corporation for Atmospheric Research en Norvège (Bentsen et al. 2013). Il intègre un modèle d'océan, un modèle atmosphérique, un modèle de glace, un module pour le cycle de carbone et est utilisé pour des prévisions climatiques (Iversen et al. 2013).
- MPI (simulation MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009, soit le modèle global MPI-RSM et le modèle régional REMO2009). Ce modèle est développé par Max-Planck-Institut für Meteorologie. Il couple un modèle d'océan, d'atmosphère et de surface continentale (Gutjahr et al. 2018).
- MOHC (simulation MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17, soit le modèle global Had2GEM2 et le modèle régional CCLM4-8-17). Ce modèle est utilisé dans le cinquième rapport du GIEC pour les prévisions climatiques. Il est développé par le Met Office Hadley Centre et intègre un modèle d'océan, un modèle d'atmosphère et un modèle de surface continentale (Bellouin et al. 2011).

Une dernière simulation intégrant les valeurs de tous ces modèles est également réalisée et se nomme « multi-modèles ».

Ces modèles ne possèdent pas plusieurs représentations d'une année cible, et il existe qu'une seule valeur pour 2050. Ainsi, pour représenter le climat 2000, le $DOWKI_{sech}$ est calculé sur la période 1985-2005 qui correspond à la période de référence de ces modèles et pour représenter le climat 2050, le $DOWKI_{sech}$ est calculé sur la période 2040-2060 (selon le scénario RCP 8.5 du GIEC). Cela permet d'avoir un panel de 20 événements sur les deux périodes. L'indice est calculé à l'échelle de la maille et sa valeur moyenne annuelle est ensuite calculée sur France entière, ainsi que la valeur décennale France entière sur le climat 2000 et le climat 2050.

La méthodologie sur ARPEGE-Climat

Il a fallu adapter la méthodologie pour comparer les valeurs simulées sur EURO-CORDEX et sur ARPEGE-Climat. En effet, un panel de 400 événements ne peut pas être comparé à un panel de 20 événements. Les valeurs du $DOWKI_{sech}$ sur ARPEGE-Climat ont donc été calculées sur 20 années successives du modèle ce qui permet d'obtenir 100 tirages de valeurs de l'indice sur ARPEGE-Climat selon cette méthodologie, avec un indice calculé sur 20 ans, même période que sur EURO-CORDEX.

La distribution des valeurs moyennes et des valeurs décennales des 100 tirages de ARPEGE-Climat est étudiée et est comparée avec les résultats sur les modèles EURO-CORDEX.

VI.1.2 Les résultats obtenus sur la comparaison entre ARPEGE-Climat et les modèles EURO-CORDEX

Les résultats sur les valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{sech}$ sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050 sont présentés en Figure 62 (a) et l'évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 est présentée en Figure 62 (b).

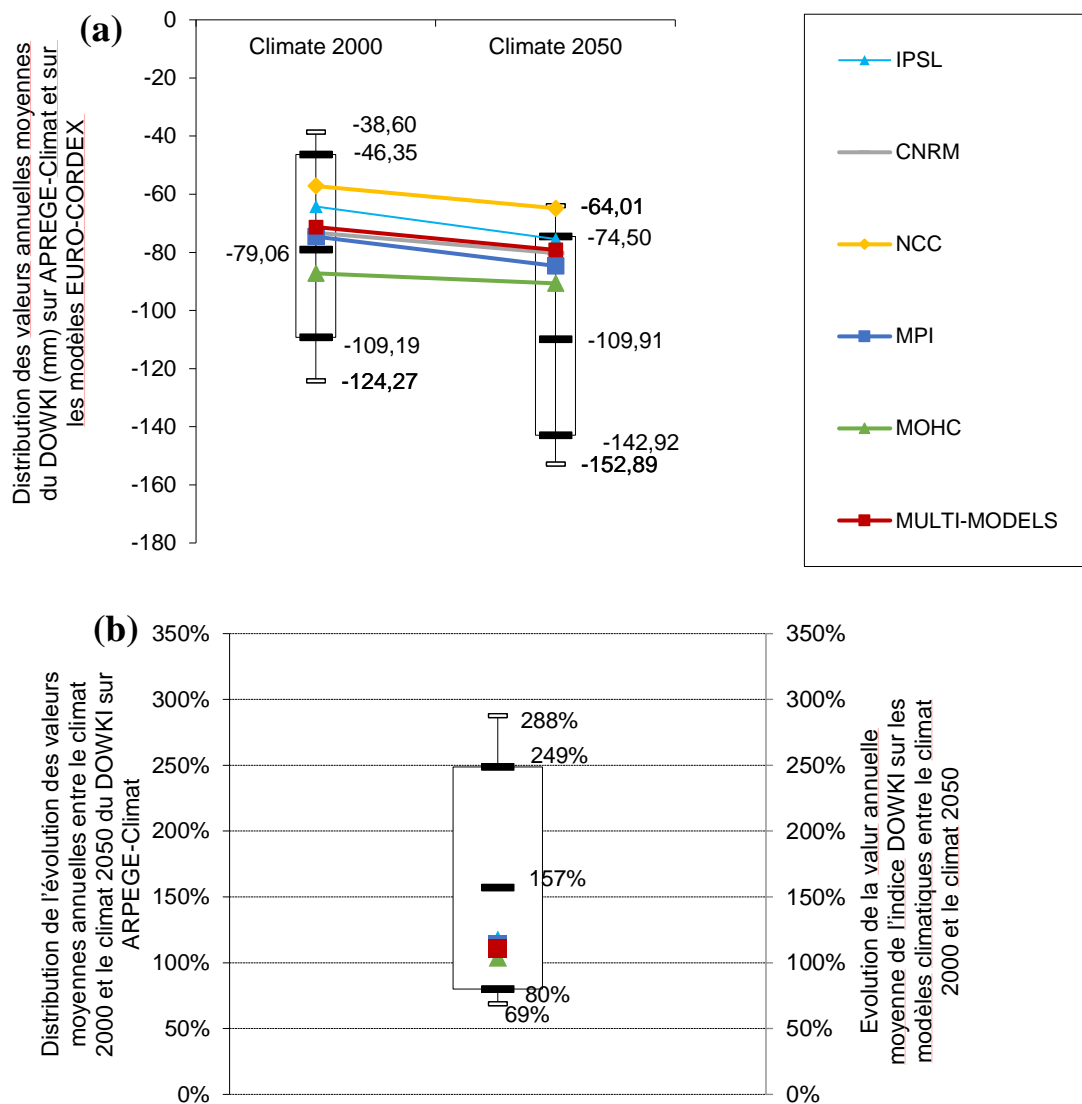


Figure 62. (a) Valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{sech}$ sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050 calculées avec 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ sur 100 simulations de ARPEGE-Climat, (b) évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 des valeurs annuelles moyennes calculées sur France métropolitaine de 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution de l'évolution sur 100 simulations d'ARPEGE-Climat

D'après la Figure 62, la distribution des valeurs annuelles moyennes du $DOWKI_{sech}$ d'ARPEGE-Climat contient les valeurs annuelles moyennes des 5 modèles et du multi-modèle. La distribution d'ARPEGE-Climat permet de mieux prendre en compte les incertitudes (quantile 90 et 95). De plus, les valeurs extrêmes sont mieux représentées avec ARPEGE-Climat du fait du nombre important de représentations

de l'année cible. Ainsi, concernant les valeurs annuelles moyennes, le modèle ARPEGE-Climat permet de déceler des événements extrêmes ce qui ne semble pas possible avec les autres modèles. L'utilisation de plusieurs modèles permet de confirmer l'assèchement généralisé observé.

Les résultats sur les valeurs décennales, soit sur les événements extrêmes sont présentés en Figure 63.

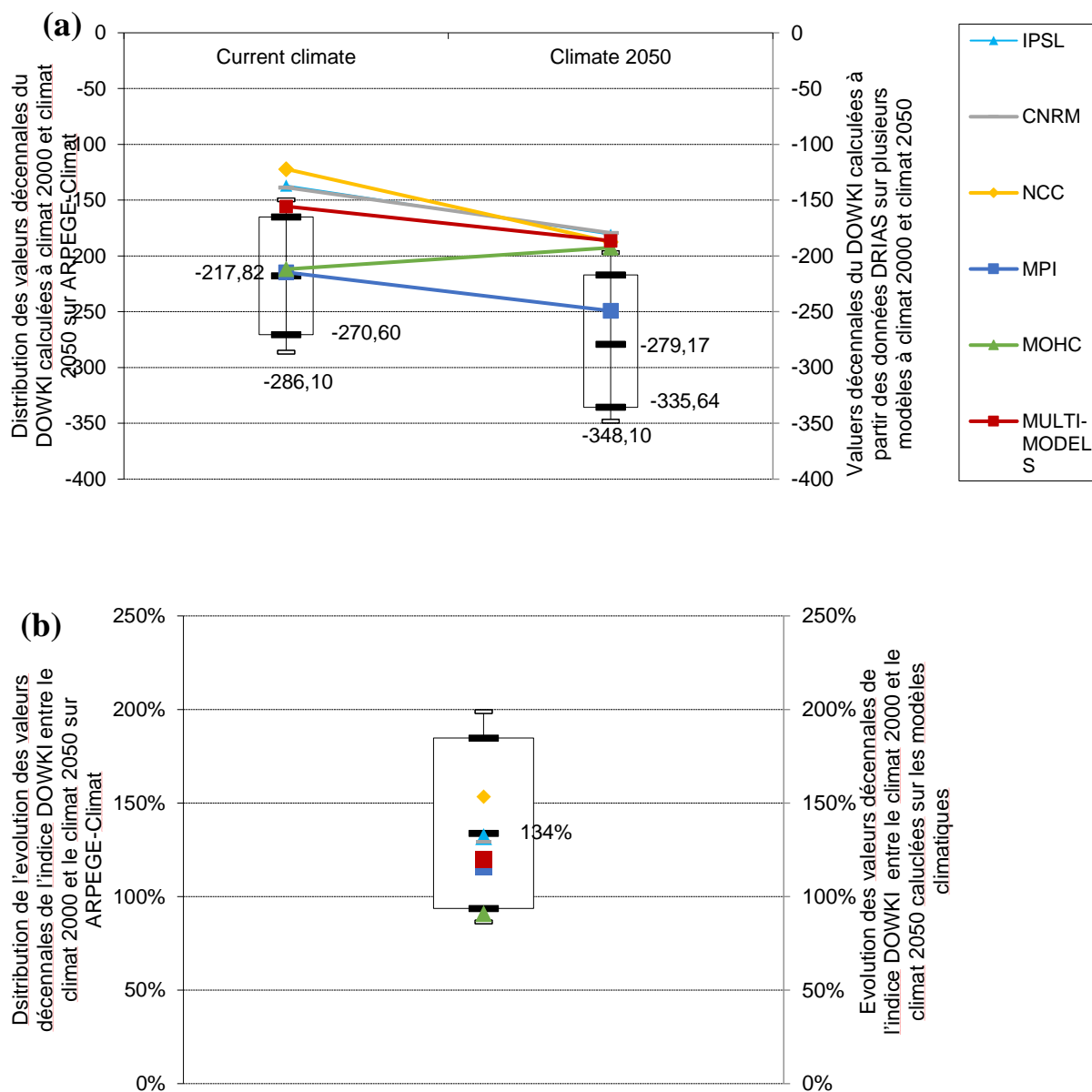


Figure 63. (a) Valeurs décennales du DOWKIsech sur la France métropolitaine sur le climat 2000 et le climat 2050 calculées avec 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution des valeurs déennales du DOWKIsech sur 100 simulations de ARPEGE-Climat, (b) évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 des valeurs décennalescalculées sur France métropolitaine de 5 modèles d'EURO-CORDEX et distribution de l'évolution sur 100 simulations d'ARPEGE-Climat

D'après la Figure 63, la distribution de l'évolution des valeurs décennales d'ARPEGE-Climat contient toutes les évolutions des autres modèles, ce qui valide la robustesse du modèle ARPEGE-Climat. De plus, avec uniquement 20 ans, les valeurs décennales de l'indice sur les autres modèles ne sont calculées que sur 2 valeurs, ce qui entraîne de nombreuses incertitudes. Il est d'ailleurs observé que pour un

modèle, la valeur décennale de l'indice est moins extrême en 2050 que sur le climat 2000 ce qui paraît peu probable au vu des résultats obtenus et de l'analyse de l'état de l'art.

Cette étude met en évidence la nécessité d'avoir une large profondeur de données pour l'analyse des événements extrêmes. De ce fait, l'utilisation du modèle ARPEGE-Climat semble beaucoup plus appropriée que l'utilisation des modèles EURO-CORDEX pour cette analyse qui se concentre sur les événements extrêmes.

VI.2 Influence de la période de référence

Il est important de s'interroger sur le choix de la période de référence pour la valeur de la normale dans le calcul de l'indice. Il a été vu que nous considérons un scénario médian. Tous les résultats calculés dans cette thèse sur l'évolution entre le climat 2000 et le climat 2050 sont donc relatifs à cette période de référence. Cependant, il est possible de calculer les valeurs du *DOWKI* selon trois scénarios :

Le scénario optimiste : les valeurs de référence du déficit hydrique sont calculées sur les 400 années de 2050. Ce scénario est optimiste puisqu'il consiste à considérer l'année 2050 comme une année « normale » par rapport à l'historique. Les événements extrêmes seront alors extrêmes par rapport aux événements définis sur 2050.

Le scénario pessimiste : les valeurs de référence du déficit hydrique sont calculées sur les 400 années du climat 2000. Ce scénario considère alors que l'année cible 2050 est de toute évidence impactée par le changement climatique. Dans ce cas, les événements extrêmes analysés sont encore plus extrêmes que ceux observés sur le climat 2000.

Le scénario médian : les valeurs de référence du déficit hydrique sont calculées sur une distribution jointe des 400 années à climat 2000 et des 400 années à climat 2050.

Il est important de comparer les distributions du *DOWKI* obtenues selon les trois scénarios pour déterminer si ces distributions sont significativement différentes. Les nombreuses répétitions des années cibles 2000 et 2050 permettent de réaliser un test statistique pour répondre à cette question. Ainsi, les distributions annuelles moyennes du *DOWKI_{sech}* calculées à l'échelle nationale entre les trois scénarios sont comparées en utilisant un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney. Ce test est couramment utilisé pour comparer les médianes de 2 échantillons qui ne suivent pas une distribution gaussienne. Les résultats du test sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12. Comparaison des scénarios pour le choix de la période de référence de calcul de la normalisation de l'indice DOWKI avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France

Comparaison des scénarios avec ARPEGE-Climat	p-value
Climat 2000 – Climat 2050 Scénario Optimiste	0.3
Climat 2000-Climat 2050- Scénario Médian	0.027
Climat 2000-Climat 2050 Scénario pessimiste	1.8e-4

D'après le Tableau 12, l'hypothèse nulle du test selon laquelle les distributions sont continues avec des médianes égales n'est pas rejetée pour le scénario optimiste, ce qui signifie qu'entre le climat 2000 et le climat 2050, les deux distributions sont comparables. Cependant, l'hypothèse du test est rejetée pour le scénario médian et le scénario pessimiste.

La Figure 64 présente les résultats obtenus sur la distribution annuelle moyenne sur la France métropolitaine du $DOWKI_{sech}$ entre le scénario médian et le scénario pessimiste calculé sur la période de vulnérabilité des prairies.

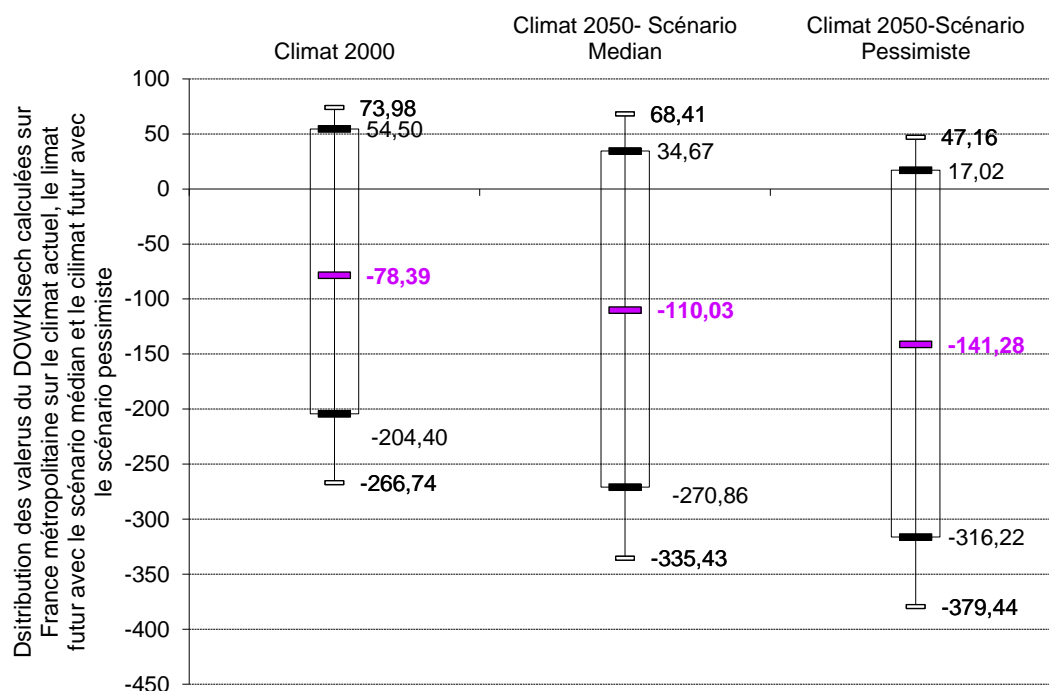


Figure 64. Distribution des valeurs du $DOWKI_{sech}$ calculées sur la France métropolitaine et sur le périmètre des prairies sur le climat 2000 sur le climat 2050 selon le scénario médian et sur le climat 2050 selon le scénario pessimiste

D'après la Figure 64, avec le scénario pessimiste, l'assèchement généralisé est encore plus marqué et les valeurs du $DOWKI_{sech}$ sont encore plus extrêmes. Avec le scénario pessimiste, l'évolution moyenne

des valeurs d'indices diminuerait de 80%, soit le double par rapport au scénario médian. Pour les valeurs décennales, l'évolution serait de 50% entre le climat pessimiste et le climat 2000 (30% avec le scénario médian). Ainsi, comparé au climat 2000, le climat 2050 est encore plus extrême. **En utilisant cette référence, les sécheresses extrêmes systémiques (telles qu'elles sont définies dans le paragraphe III.1.1) sont au nombre de 81 à horizon 2050, ce qui représente une période de retour de 5 ans.**

Cette étude met en évidence l'importance de l'influence de la période de référence pour calculer l'impact du changement climatique. C'est pourquoi les études sur le changement climatiques doivent toujours détailler cette période de référence. Le scénario qualifié de pessimiste est interprété comme un scénario sur lequel aucune adaptation n'a été réalisée et pour lesquelles les pertes de récoltes sont maximales. Le scénario médian considère qu'il y a une certaine forme d'adaptation des cultures à l'évolution du climat et les pertes de récoltes doivent être considérées comme « à minima » ce qu'elles seront en 2050.

VII CONCLUSION

L'originalité de la méthodologie établie est la simulation à climat constant d'un panel d'événement fictifs, soit 400 répétitions du climat 2000 et 400 répétitions du climat 2050. Cette méthodologie permet d'analyser la fréquence et l'intensité des événements extrêmes dans le futur, données qui sont rares par définition. Les simulations sont réalisées avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France sous le scénario RCP 8.5 du GIEC pour intégrer les effets du changement climatique. Ce modèle donne en sortie les variables de précipitations et d'évapotranspiration. L'indice *DOWKI* est alors calculé et les pertes de récoltes simulées, en intégrant les incertitudes.

Les résultats indiquent que, sur l'aléa, les sécheresses de 2003 et 2011 doublent en fréquence à horizon 2050 ayant alors une période de retour de 7 ans. Ces sécheresses n'ont pas toutes la même temporalité et n'impactent pas de la même façon les prairies et les céréales à paille. L'intensité de ces sécheresses augmente de manière significative pour les prairies. Pour les céréales à paille, ces sécheresses n'engendrent pas toutes des pertes de récoltes extrêmes car la moitié ne se produisent pas sur la période de vulnérabilité de ces cultures.

L'étude de sécheresses d'une période de retour supérieure à 10 ans, montre une augmentation en intensité particulièrement accrue dans la moitié Nord de la France de l'aléa, ce qui augmente d'autant plus les pertes de récoltes sur les céréales à pailles particulièrement productrices dans ces régions (augmentation de 75% des pertes de récoltes). Sur les prairies, l'évolution des pertes de récoltes décennales est moins importante, mais ces pertes de récoltes restent particulièrement élevées. Le Sud de la France va rester particulièrement exposé au risque de sécheresse qui sera plus étendu dans le futur.

L'analyse des cycles de sécheresses montrent qu'elles seront pluriannuelles à horizon 2050 mettant en danger la résilience des exploitations agricoles, et en particulier le secteur de l'élevage, pour lequel les pertes de récoltes sur la France métropolitaine enregistreront des records dans le futur (jusqu'à 50% de pertes).

L'étude des excès d'eau montre que ceux-ci n'évoluent pas en fréquence et en intensité à horizon 2050 : un événement comme celui de l'excès d'eau de 2016 a une période de retour de 50 ans à climat 2000 et à climat 2050. Ces événements ne sont cependant pas à négliger : sur les céréales à paille, ils engendrent des pertes de récoltes nationales deux fois supérieures aux événements de sécheresse.

Enfin, les événements combinant les deux périls augmentent en fréquence et en intensité dans le futur. Ces événements affectent des territoires différents et leur profil indique en général une sécheresse dans le Sud de la France et un excès d'eau dans le Nord de la France.

Cette étude menée sur les événements extrêmes montre la surexposition des céréales à paille et des prairies au changement climatique. Les résultats vont dans le sens des observations réalisées par d'autres

auteurs sur l'impact du changement climatique sur les productions végétales et posent la question de l'adaptation de l'agriculture française au changement climatique. Ces travaux considèrent la ferme France comme identique en 2050 du point de vue de la répartition des cultures. Ils n'intègrent donc pas les futures mesures d'adaptation de l'agriculture française et les résultats produits sont donc « toutes choses égales par ailleurs ».

CHAPITRE II : APPLICATION A LA GESTION DES RISQUES EN AGRICULTURE

Le chapitre précédent a permis de donner des éléments chiffrés en termes de pertes de rendement sur les conséquences du changement climatique sur quelques productions végétales. Comme on l'a vu, l'agriculture est un secteur de l'économie française qui est naturellement soumis aux risques climatiques. Les agriculteurs évaluent le risque auquel ils sont soumis, ce qui les amène à adopter des stratégies différentes de gestion du risque : mise en place de mesures de prévention sur l'exploitation (diversification des cultures, irrigation, filets paragrêle, etc.), souscription à des contrats d'assurance, épargne de précaution. Ces choix permettent à l'agriculteur de limiter l'impact du risque climatique sur son revenu. Cependant, le chapitre précédent a montré que des événements de grande ampleur comme la sécheresse de 2003 augmentent en fréquence dans le futur et deviennent récurrents (période de retour de 7 ans à horizon 2050). Ces événements d'intensité spectaculaire par leur étendue à l'échelle nationale et leur amplitude, fragilisent l'économie agricole et pose la question de la résilience des exploitations dans le futur. L'enjeu de la gestion des risques agricoles est alors non seulement micro-économique (soutenir le revenu des exploitations agricoles) mais également macro-économique (soutenir une filière de production au niveau national). Dans un contexte où ce type d'événements verrait sa fréquence doubler, en moyenne, d'ici 2050, le maintien d'une agriculture compétitive, la sécurité alimentaire et l'adaptation au changement climatique apparaissent comme des enjeux clés de l'agriculture de demain. La question qui se pose alors est de déterminer si les outils de gestion des risques mis en place aujourd'hui seront efficaces sur le long terme. Cette importance du risque climatique est présente historiquement en France et a permis notamment la création du Régime des Calamités Agricoles en 1964, le développement d'instruments de marché comme les contrats d'assurance récoltes dont les primes sont subventionnées par l'Etat.

Aujourd'hui, la question de la gestion des risques en agriculture et de l'articulation des différents outils mis à disposition des agriculteurs est au cœur des préoccupations des différents acteurs du domaine : Etat (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et Ministère des Finances), assureurs, ré-assureurs, syndicats agricoles, Organismes Professionnels Agricoles. L'enjeu de la réforme de la gestion des risques 2022 est alors de concevoir une meilleure articulation des différents outils, entre Fonds National de Gestion des Calamités Agricoles (FNGRA) et assurance MultiRisques Climatique (MRC), revoir la conception des outils dans le but d'une meilleure protection des exploitations agricoles. Il s'agit en particulier d'adapter la gouvernance des risques catastrophiques entre les différents acteurs.

Ce chapitre développe les questions suivantes :

- **Comment aborder les pertes économiques à partir des pertes de récoltes ?**
- **A partir des pertes de récoltes et des pertes économiques qui y sont liées à l'échelle de l'exploitation et de la filière, peut-on éclairer la réflexion nationale sur l'évolution des politiques de gestion des risques en agriculture en France pour faire face aux changements climatiques ?**

Ce chapitre commence par décrire les différents systèmes de gestion des risques en France, et le rôle de chacun des acteurs : Etat, assureur et agriculteur. Cette deuxième partie abordera également la définition du revenu des exploitations agricoles afin de quantifier sur celui-ci l'impact des événements extrêmes climatiques.

La troisième partie de ce chapitre présentera la méthodologie mise en place dans cette thèse pour évaluer la perte économique à climat actuel et climat 2050, à l'échelle de l'exploitation et de la filière de production. Ainsi, il sera présenté :

- La détermination d'un prix de vente des productions végétales ;
- La descente d'échelle du département vers l'exploitation agricole grâce à l'utilisation de la base de données publique RICA. Il est rappelé que la descente d'échelle est nécessaire pour appliquer les conditions générales et particulières des contrats d'assurance récoltes (seuil de déclenchement et franchise).

La quatrième partie de ce chapitre présentera les résultats de simulation des événements climatiques à l'échelle de l'économie de l'exploitation agricole et à l'échelle macro-économique par culture. Elle proposera un chiffrage des scénarios économiques de politiques publiques, actuels ou en construction, intégrant l'évolution du climat. Le chiffrage des scénarios permettra d'évaluer l'équilibre financier des systèmes publics et privés (assurabilité) face à l'accroissement des risques climatiques qui se dessine pour les prochaines décennies.

Une discussion générale sur les formes d'adaptation de l'agriculture, qu'elles soient agronomiques, techniques, technologiques ou sur les systèmes de gestion des risques et l'implication des acteurs est présentée en dernière partie de ce chapitre.

I LES SYSTEMES DE GESTION DES RISQUES EN FRANCE

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons vu comment la gestion du risque peut s'articuler, de manière générale, en fonction du niveau de risque entre trois acteurs principaux qui sont l'agriculteur lui-même, l'assureur et l'Etat. Nous détaillons dans ces paragraphes la perception du risque par l'agriculteur ainsi que les systèmes de gestion des risques actuels et en construction en France.

I.1 Perception du risque par l'agriculteur

La perception du risque par l'agriculteur joue un rôle fondamental dans les stratégies adoptées par celui-ci pour gérer le risque auquel est soumis son exploitation. Des études ont montré que la sensibilisation des agriculteurs aux risques a augmenté ces dernières années (OCDE 2012). Lorsque l'agriculteur perçoit un risque sur son exploitation agricole, il va tenter de modifier ce risque pour rendre son niveau acceptable. A ce moment, l'agriculteur commence par faire de la prévention (telle que des méthodes d'irrigation) et il a deux techniques fondamentales pour modifier son niveau de risque : la diversification (mais elle augmente les coûts de production) ou la cession d'une partie du risque (assurance). Les mesures prises par l'agriculteur sont fonction de son aversion au risque, son niveau des capitaux propres, et les caractéristiques de son territoire.

Chez un individu, la motivation de souscrire à un contrat d'assurance dépend de son appétence au risque. Selon certaines études, les agriculteurs sont, en majorité, averses au risque c'est-à-dire qu'ils vont préférer générer un revenu certain inférieur à la moyenne des revenus incertains (Bureau et Thoyer 2014; Femenia 2010). Cependant, des théories sur l'économie comportementale indiquent que lors d'événements extrêmes de fréquence rare, le comportement le plus observé des individus est la sous-assurance (Séronie 2018). En effet, les individus misent sur l'incertitude de la survenance de l'aléa. Dès lors que l'aléa survient, les individus souscrivent en masse par effet de traumatisme face à la perte subie. Ces mêmes individus quittent de nouveau le système assurantiel quelques années plus tard, au fur et à mesure que la mémoire des événements s'efface et considérant le produit assurantiel trop coûteux (Gabuthy, Jacquemet, et L'Haridon 2021). Ces études vont dans le sens de l'évolution du portefeuille de l'assurance : on observe une augmentation significative de souscription aux contrats après l'événement extrême d'excès d'eau de 2016 (CCR 2018). Cet effet d'opportunisme a été également par certains auteurs (Enjolras et Sentis 2011; Blank et McDonald 1995).

Différentes analyses ont été effectuées pour déterminer les motivations des agriculteurs sur le choix de l'assurance récolte comme gestion des risques climatiques (Enjolras et Sentis 2011). Des premières études menées dans les années 1990 ont conclu que les petites exploitations agricoles souscrivent plus à des systèmes d'assurance car les coûts directs d'une possible détresse financière sont moins

proportionnels à la taille de l'entreprise (Blank et McDonald 1995). De plus, les grandes exploitations adopteraient plus de stratégies directes sur l'exploitations comme la diversification (J. Wu 1999; Nance, Smith Jr., et Smithson 1993). Cependant, ces premiers résultats sont aujourd'hui contrastés. En effet, le développement de l'assurance multirisques climatique a conduit à une augmentation des primes d'assurance (l'assurance couvre alors un ensemble de risques climatiques alors qu'elle n'assurait les exploitations que contre le risque grêle initialement). Cet outil est alors jugé trop cher pour les petites exploitations agricoles. De plus, les plus grandes exploitations, ayant des cultures diverses et géographiquement dispersées seraient plus intéressées pour souscrire à une assurance multi-péril. Ainsi, d'autres études dans les années 2000 (Haushalter 2000) suggèrent au contraire une relation positive entre la taille des exploitations agricoles et la souscription à un contrat d'assurance. En effet, la décision de souscrire à une assurance récolte est positivement influencée par le degré de volatilité des rendements, celle-ci étant directement liée aux conditions météorologiques. Il a aussi été constaté que plus les agriculteurs ont choisi de mettre en place des mesures de prévention tel que la diversification, l'irrigation, les filets paragrêle, moins ils sont sensibles à la souscription de contrats d'assurance (Enjolras et Sentis 2011; Blank et McDonald 1995; Smith et Goodwin 1996). Enfin, on remarque également un rôle important du passé dans la décision de s'assurer. Les agriculteurs assurés l'année $n-1$ auront tendance à souscrire de nouveau à un contrat d'assurance pour l'année n , effet de fidélité de relation clientèle (Enjolras, Capitanio, et Adinolfi 2012).

D'après (Enjolras et Sentis 2011), l'étude réalisée sur les données du RICA indique que les exploitations agricoles assurées sont plutôt situées en basse et moyenne altitude allant de pair avec leur spécialisation (grandes cultures et viticulture) et la taille des exploitations agricoles. Les travaux menés par CCR sur le suivi du développement de l'assurance multirisques climatique rejoignent ces observations (CCR 2019a; 2019b; 2020).

Enfin, certains auteurs démontrent que l'intervention ex-post de l'Etat pour soutenir le revenu des exploitations agricoles peut nuire au développement de l'assurance récolte (Koenig et al. 2019). En effet, si les agriculteurs anticipent un soutien de crise de l'Etat, alors la demande en assurance récolte diminue (Bagnarosa, Cordier, et Gohin 2021a; Deryugina et Kirwan, s. d.). Or, l'Etat intervient d'autant plus que le taux de diffusion de l'assurance récolte est faible. Les auteurs qualifient la position de l'Etat comme être face au dilemme du Samaritain (Hardelin 2010; Innes 2003).

I.2 Les systèmes de gestion des risques existants

I.2.1 L'assurance grêle

Traditionnellement, les agriculteurs ont eu recours très tôt à des assurances comme l'assurance grêle (Vinet 2002). Cet auteur indique qu'elle apparaît pour la première fois en France, en 1803 à Toulouse pour les cultures de céréales, fondée par P.B. Barrau et prend son essor à partir de 1816 (Vinet 2002). L'assurance grêle est la première couverture historique assurantielle sur les récoltes. La grêle est perçue comme un fléau, elle est imprévisible, brutale et les pertes de récoltes engendrées sont de grande ampleur (Desplat 1996). Redoutée pour ses dégâts, c'est donc l'assurance grêle sur les récoltes qui se développa en premier lieu et la première société à la proposer est la « Société d'assurances réciproques » (Hamon 1930). Ensuite, les assurances mutuelles pratiquant l'assurance-incendie proposèrent des contrats d'assurance grêle, la première société par action spécialisée dans le risque grêle apparaît en 1856, du nom de l'Abeille. Les compagnies d'assurance développent ensuite l'assurance grêle sur les récoltes dans les années 1920. En 1998, les contrats Groupama représentent 50% des encaissements et ont des franchises allant de 5% (pour le blé) jusqu'à 20% pour les fruits. Il existe également des contrats à l'exploitation avec une franchise de 10% (Bouche 1998). L'équilibre de l'assurance grêle est fragilisé dans le début des années 1990 avec des ratio S/P supérieurs à 100% par manque de mutualisation entre tous les producteurs, les régions et les différentes productions mais aussi en raison de l'antisélection. En effet, du fait des taux de primes élevés (autour de 15% dans les années 1990), uniquement les agriculteurs percevant leur risque comme quasi-certain s'assurent (Bouche 1998).

I.2.2 Le régime des calamités agricoles

Le financement du FNGRA

La loi du 10 juillet 1964 crée une distinction entre les risques considérés comme assurables et qui relèvent donc de l'assurance privée et les risques non assurables et relèvent donc du FNGRA, fonds de solidarité national. En effet, l'article L-361-5 du code rural et de la pêche maritime définit les calamités agricoles comme « les dommages résultant de risques, autres que ceux considérés comme assurables, d'importance exceptionnelle dus à des variations anormales d'intensité d'un agent naturel climatique lorsque les moyens techniques de lutte préventive ou curative employés habituellement dans l'agriculture, compte tenu des modes de productions considérés n'ont pu être utilisés ou se sont révélés insuffisants ou inopérants » (« Chapitre Ier : Dispositions générales (Articles L361-1 à L361-8) - Légifrance » s. d.). La notion de « risque assurable » a évolué depuis 1964 notamment avec le développement de l'assurance MRC. Les grandes cultures sortent de ce système en 2009 et la viticulture en 2010.

Ce régime d'indemnisation constitue le dispositif public de protection du revenu des exploitations agricoles contre les risques climatiques et sanitaires. Il inclut ainsi une indemnisation systématique en cas d'aléas climatiques. Cependant, à l'origine, ce fonds n'avait pas pour unique but l'indemnisation des risques inassurables. Il avait aussi pour objectif de développer la prévention des risques climatiques en agriculture et les produits d'assurance. Ce sont notamment ces deux derniers aspects qui sont très fortement discutés dans les récentes réformes de la gestion des risques en agriculture.

La loi du 10 juillet 1964 prévoit un financement paritaire entre les agriculteurs et l'Etat. L'Etat verse une subvention au FNGRA. Les agriculteurs payent une taxe additionnelle prélevée sur les cotisations d'assurance couvrant les dommages relatifs aux bâtiments et au bétail mort, aux véhicules utilitaires des exploitants agricoles. Le taux de contribution des agriculteurs est de 5,5%, fixé selon la loi des finances de 2016, il était de 11% avant. La diminution de la contribution du fonds a rendu le financement entre l'Etat et les exploitants agricoles égalitaire, mais a réduit très fortement les fonds du FNGRA (Bouche 1998).

Le Tableau 13 présente les recettes du FNGRA (contribution de l'Etat et des agriculteurs) de 2011 à 2018.

Tableau 13. Recettes du FNGRA (M€) de 2011 à 2018 (Source : CCR)

Recette (M€)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Contribution des agriculteurs	101,4	113,3	120	122,5	124,5	57,8	60	60
Subvention de l'Etat pour les calamités agricoles	34,2	130,2	22,2	19,2	24,3	81	0	75

Les montants d'indemnisations du FNGRA

Le caractère de calamité agricole est reconnu pour une zone par arrêté préfectoral sur la base des données de Météo-France. Les dommages sont évalués de manière forfaitaire sur la base d'un barème à l'échelle départementale. Ce barème est établi pour chaque département par un Comité Départemental d'Expertise (CDE) et validé par la Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF). Ce barème n'est pas individuel c'est-à-dire qu'il ne tient pas compte des caractéristiques des exploitations agricoles en matière de rendements et de prix de vente des produits agricoles.

Un double seuil est alloué pour recevoir une indemnisation. Les pertes de récoltes doivent dépasser 30% de la production annuelle (ou 42% pour les productions végétales bénéficiant d'une aide couplée de la PAC) par rapport au rendement théorique de l'ensemble des cultures composant la production et un montant des dommages dépassant 13% du produit brut théorique de l'exploitation (aides de la PAC comprises). Pour les pertes de fonds, il existe un plafond de 1000 euros et seuls les dommages supérieurs

à ce plafond sont indemnisés. Les taux d'indemnisation sont différents selon les cultures et les types de pertes de fonds.

La Figure 65 présente la part que représente le montant des indemnisations par péril climatique et par année. Cette figure ne présente pas les indemnisations versées dues aux parasites.

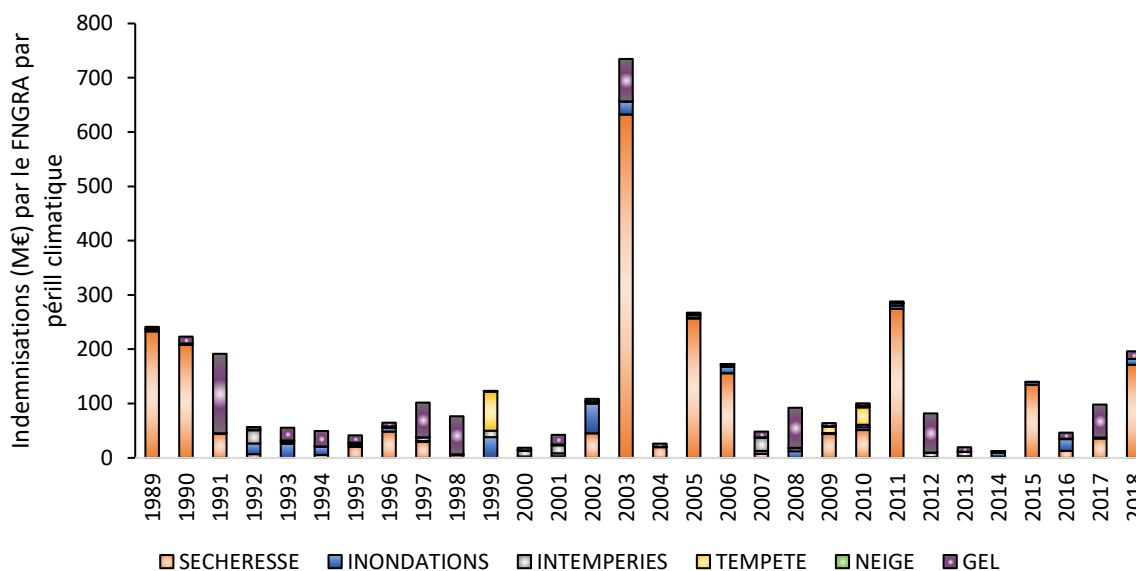


Figure 65. Part des indemnisations du FNGRA (%) par type de péril de 1980 à 2018

Sur cette figure, plusieurs points sont à noter :

- L'année 2003 est celle qui a nécessité le plus de capacité de décaissement du fonds, les indemnisations s'élevant à environ 735 M€ dont 86% des indemnisations sont pour le péril sécheresse.
- Sur la période 1989-2018, l'indemnisation moyenne annuelle tous périls est environ de 237 M€.
- Il est important de noter le caractère systémique des sécheresses, qui représente régulièrement plus de 80% des indemnisations.
- Les productions végétales ne semblent pas très sensibles au risque de neige et de tempêtes qui ont peu de poids dans le montant total des indemnisations.
- A partir de 2009, les pertes de récoltes en grandes cultures sont sorties du régime. C'est pourquoi l'excès d'eau de 2016 ne ressort pas sur le tableau car celui-ci a particulièrement impacté cette catégorie de cultures.

L'indemnisation annuelle moyenne de la sécheresse est d'environ 84 M€, celle du gel de 25 M€. Sur la période 1989-2018, le montant total des indemnisations est de 3,8 Md€, la sécheresse représentant 65% de cette somme (soit 2,4 Md€). Ces analyses montrent que la sécheresse est le péril qui représente le plus de poids en termes d'indemnisations pour le FNGRA avec une fréquence élevée.

Ces résultats montrent que lors d'un événement extrême, pour supporter les montants d'indemnisation, le FNGRA a besoin de constituer des réserves. Or, le chapitre précédent a montré que la fréquence et l'intensité de ces événements va augmenter dans le futur. Ces résultats montrent que dans un système de gestion des risques avec intervention d'un fonds de solidarité nationale, il est nécessaire pour celui-ci constituer des réserves afin de faire face aux sécheresses à venir.

1.2.3 L'assurance MRC

Fonctionnement de l'assurance

L'assurance récolte est définie dans le code rural et de la pêche maritime (article L-361-4) et dans le code des assurances (article L. 122-7) et est mise en place à partir de 2005. A partir du programme de la PAC 2014-2020, l'assurance MRC fait partie du second pilier de la PAC, dans le règlement relatif au soutien de développement rural avec la possibilité de l'introduire dans les programmes de développement rural (PDR) (CGAAER 2017). L'assurance est alors subventionnée par le FEADER (Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural).

Les événements couverts par les contrats assurantiels sont les suivants :

- Sécheresse, excès de température, coup de température et coup de soleil ;
- Excès d'eau, pluies violentes, pluies torrentielles, humidité excessive ;
- Températures basses, coup de froid, gel ;
- Grêle ;
- Poids de la neige ou du givre ;
- Tempête, tourbillon, vent de sable ;
- Manque de rayonnement solaire.

Il existe deux types de contrats pour l'assurance MRC : un contrat au groupe de cultures et un contrat à l'exploitation dont les caractéristiques de seuil de déclenchement et franchises sont différentes. De plus, l'assurance fonctionne sur trois niveaux :

- un niveau socle, où le prix assuré des cultures correspond à un barème (soit à un coût de production inférieur au prix de vente). Ce niveau est subventionné à 65% ;
- un deuxième niveau, « garanties optionnelles » subventionné à 45%. Il permet aux agriculteurs d'assurer leurs productions à un prix inférieur ou égal au prix de vente estimé de la nature de récolte ;
- un troisième niveau de l'assurance récolte est le « niveau de garanties non subventionnables » qui permet à l'agriculteur de disposer de l'offre dont il a besoin. Ce niveau n'est pas

subventionné. Ainsi, l'agriculteur peut choisir d'abaisser le seuil de déclenchement et la franchise, de couvrir les pertes à un prix assuré supérieur ou prix de vente réel et même de couvrir les frais de re-semis.

De plus, l'assurance fonctionne avec un seuil de déclenchement et une franchise qui varient selon le type des contrats et des cultures entre 20 et 30%. Le seuil de déclenchement correspond au niveau de pertes de récoltes minimales pour obtenir une indemnisation. En d'autres termes, le régime d'assurance récolte ne « se déclenche » que si les pertes de récoltes sont supérieures à 30%. Les pertes de récoltes sont calculées par rapport à un rendement de référence individuel qui correspond à la moyenne olympique sur 5 ans. Une fois le seuil de déclenchement dépassé une franchise de 30% est appliquée pour les contrats au groupe de culture et de 20% pour les contrats à l'exploitation. Il s'agit d'une franchise absolue définie comme « la part de dommage qui reste à charge de l'assuré et qui vient en déduction de l'indemnité de l'assurance ».

Cette description succincte de l'assurance MRC avec une modalité de deux types de contrats différents et trois niveaux présente déjà la complexité du dispositif dont les détails sont exposés dans la Figure 66.

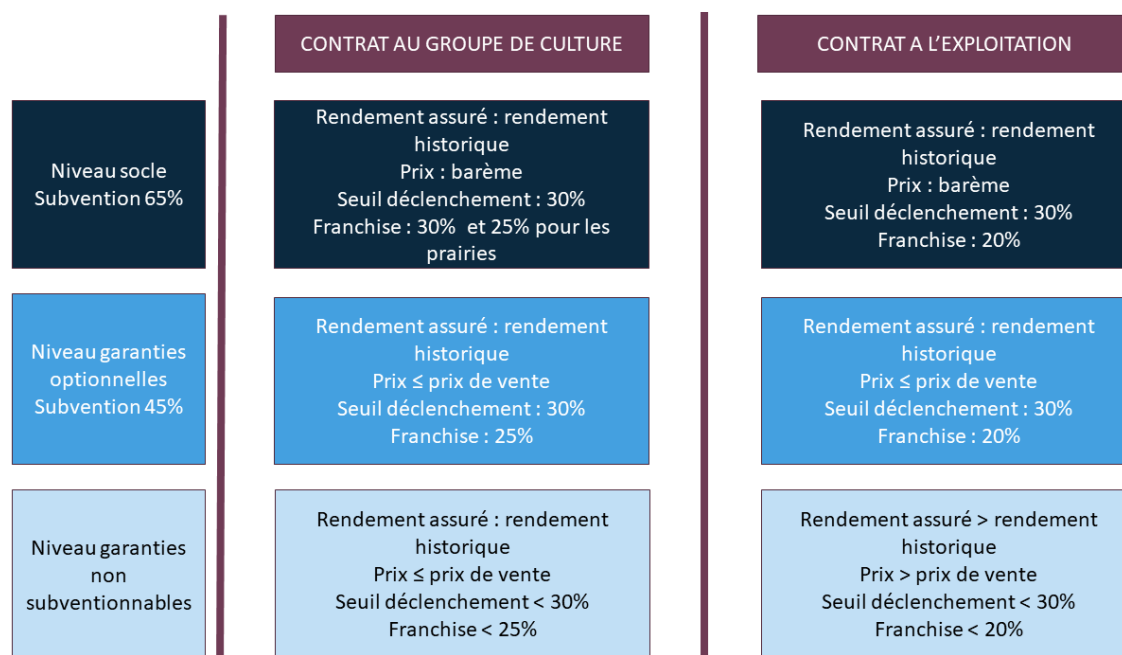


Figure 66. Présentation du fonctionnement de l'assurance MRC

Chiffres clés de l'assurance MRC

Le Tableau 14 présente les taux de diffusion de l'assurance MRC de 2016 à 2019 par type de culture. Ces chiffres montrent que l'assurance peine à se développer, particulièrement sur les prairies (le taux de

diffusion est inférieur à 2%). Pour ces cultures, la concurrence avec le dispositif des Calamités Agricoles et le coût du produit assurantiel en sont des facteurs explicatifs.

Tableau 14. Taux de diffusion (%) de l'assurance MRC pour les exercices 2016 à 2019 par type de cultures

Taux de diffusion (%)	2016	2017	2018	2019
Céréales et fourrages	23,9	27,1	28,4	29,8
Oléagineux	25,4	28,4	31,2	31,7
Protéagineux	26,5	29,9	29,1	31,1
Cultures industrielles	22,5	32,4	38,1	39,7
Légumes	24,2	9,0	12,5	14
Viticulture	19,7	20,2	25,5	26,6
Arboriculture	1,8	2,2	2,5	3,0
Prairies	0,4	0,7	0,8	1,2

Afin de comparer les données entre le FNGRA et l'assurance MRC, le Tableau 15 représente par année pour les exercices 2016 à 2019, la subvention (M€), les cotisations totales (M€) et le nombre d'exploitations agricoles assurées. Les cotisations totales sont calculées sur les trois niveaux de l'assurance : elles regroupent donc les niveaux subventionnés (1 et 2) et le niveau non subventionné de l'assurance. Ces données ne sont disponibles qu'à partir de 2016.

Tableau 15. Cotisations totales (M€), subvention (M€) et nombre d'exploitations assurées pour l'assurance MRC sur la période 2016 à 2019 (Données issues des notes de synthèses publiées par CCR sur le site du MAA)

Recette (M€)	2016	2017	2018	2019
Cotisations totales des agriculteurs	225,6	264,5	307,4	329,8
(M€)				
Subvention (M€)	94	108	125	136
Nombre d'exploitations agricoles assurées	52 329	55 269	57 227	57 236

Les cotisations totales sur la période 2016-2018 sont en moyenne de 4822,8 € par agriculteur, soit 35,7 fois supérieure à la contribution par exploitation agricole pour le FNGRA. Cependant, cette contribution est en partie subventionnée. En 2019, la subvention moyenne versée par exploitation agricole est de 2376 €. Sur la période 2016 à 2018, la subvention moyenne par exploitation agricole est de 1978€. En moyenne, sur la période 2016-2018, la charge de l'assurance MRC qui revient à l'agriculteur est de 2844,6 €, soit 21,1 fois supérieure à la contribution versée pour le FNGRA.

Les exploitants agricoles sont peu nombreux à choisir le dernier niveau non subventionnable et la subvention pour la campagne 2019 est de 136 M€. Les cotisations subventionnables (niveau socle et deuxième niveau) représentent 69,6% des cotisations totales.

Les données de sinistralité ne sont disponibles que sur les exercices 2017 à 2019, par type de culture et non par péril. Le Tableau 16 présente les rapports sinistres à primes (S/P) par type de culture.

Tableau 16. Valeurs des S/P par catégorie de culture de l'assurance MRC de 2017 à 2019

S/P	2017	2018	2019	Moyenne sur 3 ans
Grandes cultures	58,5%	112%	122%	97,5%
Viticulture	377,7%	74%	176%	209,2%
Arboriculture	65,5%	77%	115%	85,8%
Prairies	110,7%	447%	149%	235,6%

Il est généralement admis dans le domaine de l'assurance qu'un produit est rentable s'il présente un S/P inférieur à 80%. En effet, au-delà de l'équilibre technique, l'assureur doit couvrir ses frais internes et générer un bénéfice. Sur cet historique très court, nous pouvons déjà constater que seule l'arboriculture s'approche de ce résultat.

I.3 La réforme de 2022 : système de gestion des risques en devenir

Le dispositif de la gestion des risques en agriculture en France est remis en question aujourd'hui. Une des principales critiques, outre la complexité de l'assurance récolte, est l'articulation entre le système des Calamités Agricoles et celui de l'assurance MRC.

Il existe une concurrence entre ces deux systèmes pour les cultures qui sont éligibles au FNGRA. En effet, le système du calcul des pertes de récoltes est différent pour les deux outils ce qui conduit à des situations inéquitables. Par exemple, considérons deux agriculteurs éleveurs dans la même zone. L'agriculteur (A) est assuré, l'agriculteur (B) est non assuré. L'agriculteur (A) a subi des pertes conséquentes, mais le calcul des pertes de récoltes par la moyenne olympique aboutit à un pourcentage de pertes inférieur au seuil de déclenchement. Il est alors non indemnisé. L'agriculteur (B), lui, a subi le même pourcentage de pertes de récoltes et se trouve, tout comme l'agriculteur (A) dans une commune éligible au FNGRA. Il est donc indemnisé. Ces situations contradictoires entraînent une méfiance des agriculteurs vis-à-vis du dispositif, et s'assurer est alors perçu par les agriculteurs comme une prise de risque. Cette contradiction est jugée comme néfaste au développement de l'assurance MRC et est reprise par de nombreux acteurs de la concertation agricole. D'autre part, le prix de l'assurance, jugé trop élevé par les agriculteurs est un frein à son développement (Boucher et al. 2019).

Cependant, la réforme de la gestion des risques en agriculture a pour objectif de mieux soutenir le revenu des exploitations agricoles, et pour ce faire, un des axes choisis est le développement de l'assurance MRC. Afin de permettre ce développement, le système proposé est un système à trois étages qui propose que chaque acteur, l'agriculteur, l'assureur et l'Etat, supporte une partie du coût des dommages liés aux événements extrêmes climatiques.

Sur ce nouveau dispositif, la franchise de l'assurance MRC serait abaissée à minima à 25% pour toutes les cultures, voire à 20% les premières années pour permettre l'application du règlement OMNIBUS (réflexions en cours lors des réunions de concertation entre les différents acteurs). En dessous de ce seuil, les pertes de récoltes sont donc à la charge de l'agriculteur. A partir du seuil de pertes défini par la franchise et jusqu'à un certain niveau de pertes de récoltes, le montant des dommages est pris en charge par l'assureur par l'assurance MRC pour les agriculteurs assurés. Cette assurance est subventionnée à 65% et des réflexions sont en cours pour permettre l'application du règlement OMNIBUS et une subvention de l'assurance récolte à 70%. Au-delà d'un certain seuil de pertes, dit seuil d'intervention sur la Figure 67, le montant des dommages est pris en charge par l'Etat par la création d'un fonds de solidarité nationale (FSN). Ce fonds serait alors doté de 600 M€ annuels. Le niveau d'intervention du fonds sera fixé par décret et plusieurs pistes sont en réflexion. Ces pistes prévoient un seuil d'intervention différent entre les différentes catégories de cultures (50% pour les grandes cultures et la viticulture et 30% pour les prairies et l'arboriculture). Cette intervention différenciée entre les cultures vise à développer l'assurance sur le secteur de l'élevage particulièrement exposé aux risques de sécheresse. Par ailleurs, pour les agriculteurs non assurés, l'Etat intervient à hauteur de la prise en charge de 45% des indemnisations à partir du seuil défini. Les paramètres sont ajustables d'une campagne à l'autre et il est notamment prévu une dégressivité du pourcentage d'indemnisation pris en charge par le FSN pour les non assurés sur les trois prochaines années passant de 45% en 2023 à 35% en 2025.

Ce système à trois étages est résumé en Figure 67.

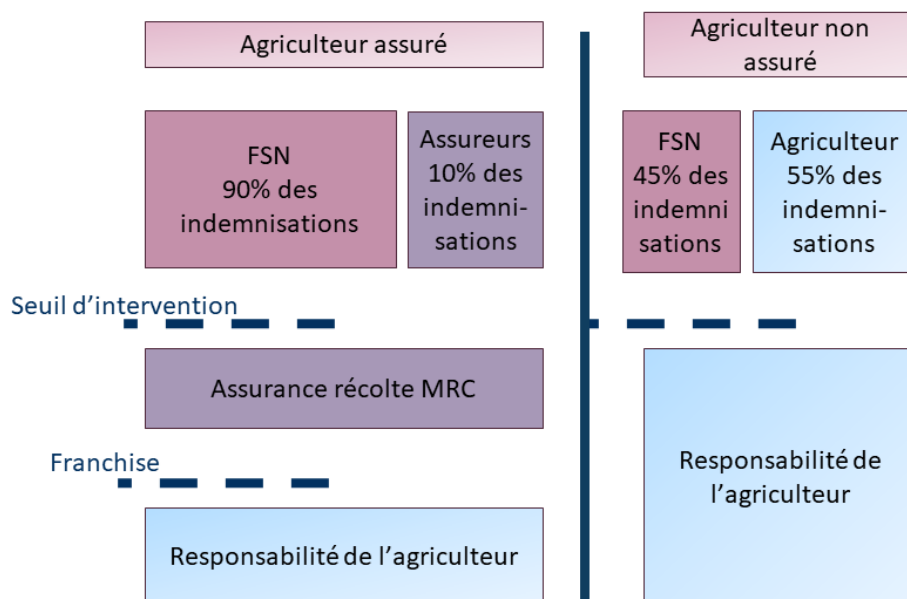


Figure 67. Fonctionnement du nouveau dispositif de gestion des risques en agriculture pour l'année 2023 à la suite de la réforme 2022 : Articulation entre le fonds de solidarité nationale (FSN) et l'assurance MRC

Le système de gestion des risques proposé par la réforme de Descrozaille propose une répartition de la gestion des risques entre l'agriculteur, l'assureur et l'Etat, telle que la gestion des risques est présentée par l'OCDE (voir Figure 1 Introduction générale). Cette réflexion en cours, où l'Etat indemniserait uniquement de moitié les agriculteurs non assurés a pour objectif de promouvoir le développement de l'assurance, tout en maintenant les prix de l'assurance du fait de l'intervention de l'Etat. L'objectif est de soutenir le revenu des exploitations agricoles.

Ces premiers éléments montrent qu'il n'est pas facile de dessiner un schéma de gestion des risques à l'équilibre pour l'ensemble des acteurs tout en soutenant le revenu des exploitations agricoles. La question se pose d'autant plus dans le contexte du changement climatique, avec une augmentation de l'intensité et de la fréquence des risques climatiques extrêmes.

II CHIFFRER LE RISQUE CLIMATIQUE EN TERMES DE COUTS ECONOMIQUES

Cette partie détaille les mécanismes de calcul du revenu de l'exploitation agricole pour évaluer les conséquences des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole.

II.1 Quantifier l'impact d'une baisse de production sur le revenu de l'exploitation agricole

Pour l'exploitation agricole, l'événement climatique se répercute sur son revenu. Nous avons vu dans les chapitres précédents que les risques de sécheresses et d'excès d'eau peuvent entraîner des pertes de récoltes très importantes à l'échelle de la France métropolitaine. À ce moment, l'agriculteur propose une offre (sa production) en quantité réduite par rapport à une année dite « normale » (sans aléa climatique). Ceci peut directement affecter la marge opérationnelle sur l'exploitation agricole. Le risque climatique sur une exploitation agricole se traduit donc économiquement par diminution du revenu agricole ou de la marge dégagée sur la ou les culture(s) impactée(s) (J. Cordier 2008). D'après certains auteurs, la succession de risques extrêmes climatiques peut entraîner la faillite de l'exploitation agricole (Bureau et Thoyer 2014).

Pour mieux comprendre comment le risque climatique peut affecter le revenu d'une exploitation agricole, le calcul de marge d'une exploitation agricole sur l'année n est donné dans l'équation ci-après. En effet, par simplification, pour étudier le revenu des exploitations agricoles nous évaluons la marge dégagée par l'activité de production.

$$Marge_n = CA_n + AI_n - CO_n - CS_n$$

Où n est l'année, CA est le chiffre d'affaires, AI sont les aides perçues par l'agriculteur, CO sont les charges opérationnelles et CS les charges de structures.

On considère que les charges de structure sont fixes dans le temps. Elles concernent les amortissements des bâtiments et de la mécanisation, les charges de location de la terre, la main d'œuvre hors période de récolte, l'impôt foncier, certaines assurances (comme l'assurance sur le bâti) et divers frais de gestion fixes. Elles sont donc indépendantes de la survenance d'un aléa climatique.

Les charges opérationnelles, quant à elles, sont liées à la production. Elles concernent les charges d'intrants (semences, engrais, produits phytosanitaires), la main d'œuvre de récoltes, le carburant. Les charges d'intrants dépendent de la production semée et des choix de l'agriculteur. Elles sont donc indépendantes des aléas climatiques. Le prix du carburant évolue dans le temps et certaines crises comme la crise de l'Ukraine en 2022 peuvent conduire à une hausse des prix importante. Néanmoins,

cette variation reste indépendante des aléas climatiques. Enfin, la main d'œuvre de récoltes peut diminuer l'année d'un aléa extrême si le rendement diminue, en particulier sur les exploitations arboricoles (non étudiées ici). Par ailleurs, une étude réalisée par INRAE sur le bassin Charolais indique que les éleveurs ont eu une augmentation de leur charges d'approvisionnement en alimentation du troupeau en 2003 du fait des faibles rendements des prairies à la suite de la sécheresse (Veysset, Bébin, et Lherm 2007). Dans d'autres régions, des charges supplémentaires peuvent être allouées à l'irrigation sur les céréales, l'année de sécheresse extrême. **Par simplification, on considère ces charges comme fixes dans la suite de ce travail. En effet, l'objectif de cette partie est d'analyser l'équilibre financier entre les différents acteurs dans le cadre de systèmes de gestion des risques basés sur une perte de production, ainsi, les charges opérationnelles n'ont pas besoin d'être quantifiées.**

Les aides sont en grande partie composées des aides directes du premier pilier de la PAC, auxquelles peuvent s'ajouter des aides du second pilier comme les aides compensatrices pour les mesures agro-environnementales, indemnité compensatoire de handicap naturel. Le montant des aides perçu par l'agriculteur peut évoluer d'une année sur l'autre mais n'est pas directement lié à la survenance d'une catastrophe naturelle. On considère donc ces aides comme fixes dans la définition de la marge sur une exploitation agricole

Le chiffre d'affaires, quant à lui, dépend directement de la quantité produite à qualité égale, celle-ci étant directement impactée lors d'un aléa climatique.

Ainsi, si nous reprenons l'équation précédente de la marge d'une exploitation agricole (année n), le paramètre qui influence le plus la marge, en cas d'événement climatique est donc le chiffre d'affaires et en particulier sa variation. Le chiffre d'affaires correspond à la production économique de l'exploitation agricole, c'est-à-dire la production (les cultures produites sur l'exploitation) multipliée par les prix de vente. Les premiers auteurs qui ont étudié le revenu des exploitations agricoles indiquent que selon eux, ses déterminants sont en effet les volumes et les prix des productions (Klatzmann 1959; Bourdon 1994). D'autres auteurs montrent qu'il existe de nombreuses définitions du revenu agricole et que l'usage de l'une ou l'autre définition dépend de l'étude que l'on veut mener (Laroche-Dupraz et Ridier 2021).

Comme évoqué dans le premier chapitre, le prix de vente peut être influencé par un aléa climatique de grande ampleur. En effet, tout dépend de l'étendue de l'événement extrême au niveau mondial (nombre de pays producteurs impacté par l'événement) et du poids des pays impactés dans la production mondiale de la ou les cultures étudiées. Le prix de vente d'une culture dans l'Union Européenne suit aujourd'hui les cours mondiaux même si cela n'a pas été le cas pendant longtemps (à ses débuts, la PAC soutenait la production agricole européenne avec des prix garantis). Le prix de vente est désormais déterminé sur les marchés à terme (Begue Turon et al. 2016; J. Cordier 2001; Séronie 2018; Bureau et Thoyer 2014). En 2003, du fait de l'ampleur de la sécheresse au niveau mondiale, les quantités produites

en céréales ont été plus faibles que la moyenne, entraînant mécaniquement selon le mécanisme de l'offre et de la demande sur les marchés, une augmentation du prix de vente des productions, appelé effet de King (Femenia et Gohin 2010). La hausse des prix mondiaux permet de compenser la diminution de quantité produite sur le revenu des agriculteurs, en particulier des céréaliers (COPA COGECA 2003; Amigues et al. 2006). En 2016 en revanche, l'excès d'eau ayant conduit à une baisse importante de la production en grandes cultures en France, n'a pas impacté le reste des pays au niveau mondial. Les agriculteurs français ont donc subi une perte conséquente de leur revenu d'autant que le blé produit était de moins bonne qualité ce qui a d'autant plus baissé son prix (FranceAgriMer 2019).

Cependant, l'ouverture des marchés mondiaux sur les produits agricoles permet notamment une certaine stabilité des prix car le caractère rare de l'offre diminue (Femenia et Gohin 2010). En effet, le prix est alors beaucoup moins corrélé à la quantité produite localement. C'est pourquoi l'étude des prix des productions agricoles montrent peu d'évolution d'une année sur l'autre : l'évolution est quantifiable sur le long terme.

Cette thèse analyse les conséquences de baisse de production liées aux aléas climatiques uniquement sur le territoire français. Dans ce cadre, on peut considérer le prix comme indépendant des quantités produites et est donc fixé. Le paragraphe suivant détaille le choix du prix des productions agricoles.

II.1.1 Choix du prix des productions agricoles

Les prix de ventes déterminés sur les marchés à terme

Les prix de vente des productions agricoles ne sont pas déterminés à l'échelle nationale uniquement mais dépendent des marchés mondiaux. La volatilité des prix agricoles constitue un des risques sur l'exploitation agricole. Certaines études montrent que des écarts annuels de 30% par rapport à la moyenne sont considérés comme fréquents (Deaton et Laroque 1990). Nous avons démontré dans la partie I.1 de ce chapitre que l'origine de cette fluctuation du prix peut provenir des aléas climatiques, qui affectent la quantité produite et donc la relation entre l'offre et la demande. Les fluctuations des prix de ventes sont alors dites exogènes, provoquées par des éléments qui ne dépendent pas directement des agriculteurs. D'autres origines des fluctuations exogènes des prix existent : les aléas sanitaires, les politiques publiques de marché. Les fluctuations des prix peuvent également être endogènes au marché. Les marchés agricoles sont dynamiques et évoluent au cours du temps (Boussard 2010). Ils ne réagissent pas de manière instantanée et il s'écoule toujours du temps entre les variations de l'offre et le prix, ce qui peut conduire à des erreurs d'anticipation du prix, trading, achats déconnectés des conditions d'offre et demande (J. Cordier 2013). L'ensemble de ces aléas couplés au caractère rigide de la demande (la demande est inélastique) explique les fluctuations des prix de vente des produits agricoles.

Les prix directeurs des productions agricoles s'établissent sur les marchés à terme. Ce sont des marchés financiers où il est possible de vendre ou d'acheter des contrats à terme, c'est-à-dire des engagements financiers entre acheteur et vendeur. Ces engagements portent sur la qualité, la quantité, la date et le lieu de livraison du produit. Il existe de nombreux marchés à terme de céréales : trois au Etats-Unis (Chicago Board of Trade, Kansas City Board of Trade, Minneaolis Grain Exchange), un au Canada (Winnipeg Commodity Exchange), un en Europe (Euronext). Afin de déterminer un prix de vente des productions agricoles, nous avons observé les fluctuations du prix de vente de certaines productions agricoles sur le marché Euronext. La Figure 68 présente, à titre d'exemple, l'évolution du prix du blé tendre sur le marché à terme Rouen issu de Euronext. Sur la figure, les différents événements ayant impacté les cours des productions agricoles sont donnés.

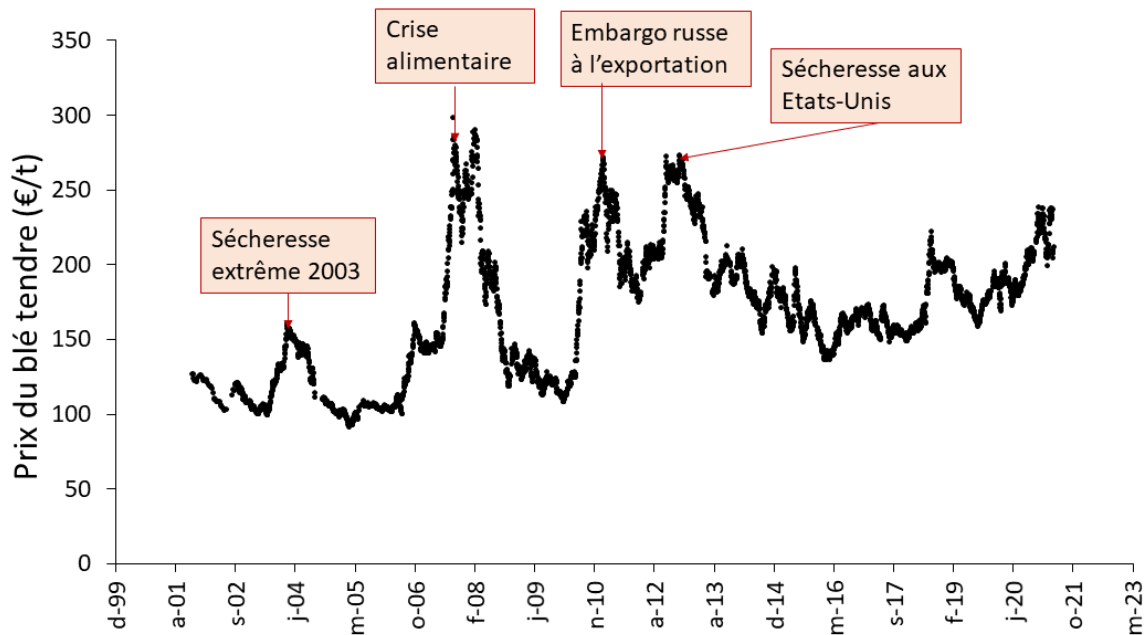


Figure 68. Evolution du prix de vente du blé sur les marchés à termes au code 2000 à 2020 (Source Euronext)

D'après cette figure, la moyenne des vingt dernières années du prix du blé est de 168 €/t, celle sur les dix dernières années est de 185 €/t. Il n'est donc pas aisé de déterminer un prix. De plus, les fluctuations non prévisibles du marché, rendent le prix des productions agricoles non projetable.

Ainsi, pour l'analyse du coût économique des événements extrêmes climatiques, nous utiliserons comme prix, la moyenne sur vingt ans qui correspond à l'historique étudié avec les sécheresses extrêmes de 2003, 2011 et l'excès d'eau de 2016 et un prix intermédiaire entre les deux niveaux de prix proposés

dans l'assurance récolte pour les deux cultures céréalières. **Ce prix est de 185 €/t pour le blé tendre d'hiver et de 174 €/t pour l'orge d'hiver.**

En revanche, il n'existe pas un prix caractérisant les surfaces toujours en herbes, puisque ce prix est fonction de la variété cultivée. Il a donc été décidé par simplification d'utiliser comme prix le barème proposé pour les prairies dans le cahier des charges de l'assurance récolte. **Ce prix est de 900 €/ha.**

II.2 Etat de l'art sur les simulations des rendements à l'échelle de l'exploitation agricole

À partir des années 1970, de nombreuses études sont réalisées sur la simulation de la distribution des rendements agricoles. En effet, les données de rendements sont souvent disponibles à grande échelle (Just et Pope 1999) ce qui conduit à l'étude de lois paramétriques et non paramétriques pour simuler les rendements agricoles. Les méthodes non paramétriques ont l'avantage d'être libre de disposer de forme fonctionnelle et d'hypothèses de distribution (A. M. Featherstone, Moghnieh, et Goodwin 1995; A. Featherstone et Kastens 2000; Goodwin et Ker 1998; Ker et Goodwin 2000). Les méthodes paramétriques quant à elles fonctionnent bien sur des petits échantillons.

Plusieurs études ont été menées pour déterminer les lois d'ajustement qui représentent le mieux la distribution des rendements agricoles. Il existe un consensus des chercheurs sur le fait que les données de rendement ne suivent pas une loi normale, malgré le fait que les tests statistiques peuvent valider son utilisation. Cependant, les chercheurs ne s'accordent pas toujours sur le type d'asymétrie observée (Ramirez, Misra, et Fields 2003). Certains auteurs voient une asymétrie sur les rendements très élevés (Day 1965) et d'autres sur les rendements les plus faibles (Gallagher 1987). Certains auteurs ont mené des études pour évaluer le potentiel des lois de distributions paramétriques pour modéliser les rendements à l'échelle de l'exploitation agricole (Claassen et Just 2011). Ceux-ci, ayant testé différentes lois d'ajustement de distribution des rendements agricoles considèrent que la loi lognormale inverse est préférable (Claassen et Just 2011). D'autres auteurs ont comparé les distributions normale, lognormale, logistique et Weibull dans l'ajustement de rendements de maïs et de soja au niveau des exploitations de l'Illinois (Sherrick, Zanini, et al. 2004; Sherrick, Barry, et al. 2004). Les résultats indiquent que la loi Weibull pourrait être appropriée pour ces cultures sur cette région. Une autre loi, la loi SU de Johnson est utilisée pour estimer le risque de rendement (Ramirez, Misra, et Fields 2003). Celle-ci est basée sur la transformation sinus hyperbolique de la loi normale. Son application aux données RICA sur le colza (Boucher et al. 2019) met en évidence une queue de distribution particulièrement plus épaisse sur les faibles rendements. **Ainsi, la loi normale est souvent utilisée comme une première approche, simplifiée, pour étudier la distribution des rendements. Cependant, elle ne montre pas l'asymétrie de la distribution des rendements, ce qui peut amener à sous-estimer le risque (Phélippe-**

Guinvarc'H, Cordier, et Guinvarc 2019). Ainsi, d'autres lois paramétriques sont utilisées pour simuler les rendements, notamment les lois de valeurs extrêmes.

Cette partie a permis de déterminer le choix d'un prix par culture pour les trois cultures étudiées. Il a été choisi, pour les céréales à paille, un prix qui représente les tendances de prix sur les marchés et qui, de plus, a une valeur proche des prix de l'assurance récolte. Pour les prairies, du fait d'un manque d'information sur cette culture, il a été choisi le barème pratiqué par l'assurance récolte. De plus, la revue de la littérature sur la simulation des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole permet de tester différentes hypothèses de lois paramétriques.

III METHODOLOGIE DE CALCUL DES PERTES ECONOMIQUES

Afin de caractériser les coûts engendrés par les événements extrêmes à horizon futur pour les agriculteurs, il est nécessaire de réaliser une descente d'échelle. Celle-ci permet d'intégrer la variation des pertes des agriculteurs autour d'une perte de récolte nationale et de caractériser les événements extrêmes climatiques en 2050 selon le nombre d'agriculteurs impactés. La méthodologie de descente d'échelle est détaillée dans les paragraphes ci-après.

III.1 Descente d'échelle : passage de données départementales à des données à l'échelle de l'exploitation agricole

III.1.1 *Calcul de pertes de rendements à l'échelle de l'exploitation agricole sur l'historique à partir du RICA*

Une étude a été réalisée pour sélectionner les exploitations agricoles sur le RICA et calculer leur pertes de récoltes (Kapsambelis, 2018). Les paragraphes suivants reprennent les différentes étapes de ce travail.

Dans un premier temps, seules les exploitations agricoles avec dix années d'historique ou plus ont été conservées. Ce choix permet de sélectionner les exploitations avec un historique suffisamment long pour qu'il contienne des années extrêmes. De plus, pour plus de robustesse dans la constitution de l'échantillon, les exploitations à OTEX¹⁹ variant sont écartées de l'analyse. Nous avons donc conservé uniquement les OTEX 15 et 16 qui correspondent aux exploitations agricoles spécialisées en grandes cultures. Afin de déterminer un rendement par culture, les surfaces ont été calculées en réalisant la moyenne entre les bornes des classes. Il a été ensuite calculé un écart entre la valeur retenue de surface (moyenne entre les bornes) et la valeur de la borne inférieure. Il a été constaté que l'écart est supérieur à 15% pour les trois premières classes de surfaces (inférieures à 15 hectares) et c'est pourquoi celles-ci sont écartées de l'étude. Les exploitations agricoles ayant au minimum 10 années d'historique et à OTEX non variant sont peu nombreuses (754 agriculteurs sur tout l'historique cultivant du blé tendre). De plus, elles ne cultivent pas nécessaire les mêmes cultures sur tout leur historique disponible.

¹⁹ OTEX : Orientation technico-économique d'une exploitation agricole. L'OTEX représente une classification des exploitations agricoles en fonction de leur spécialisation et de leur taille économique : une exploitation est spécialisée dans un domaine dès lors que la production brute standard de la culture concernée (ou les cultures d'une même catégorie) dépasse les deux tiers de la production brute totale de l'exploitation. Cette classification est européenne.

Ces contraintes liées à la qualité des données rendent difficile le calcul de la moyenne olympique de rendement glissante sur 5 ans. C'est pourquoi, la moyenne olympique de rendement est calculée sur tout l'historique pour chaque culture des exploitations sélectionnées.

Une fois la moyenne olympique calculée, il est possible de calculer les pertes de récoltes (%) par culture et sur chaque exploitation agricole selon l'équation suivante :

$$Pertes\ de\ récoltes_{i,n} = \frac{rdt_{i,n} - ((\sum_{1 \rightarrow j}^j rdt_i - \max_{1 \rightarrow j} rdt_i - \min_{1 \rightarrow j} rdt_i)/k - 2)}{((\sum_{1 \rightarrow j}^j rdt_i - \max_{1 \rightarrow j} rdt_i - \min_{1 \rightarrow j} rdt_i)/k - 2)}$$

où i représente la culture ; n l'année sur laquelle le rendement est calculé; $1 \rightarrow j$ représente la période sur l'exploitation agricole sur laquelle est cultivée la culture i (cette période est comprise entre les années 2000 et 2016) et k représente le nombre total d'année où la culture i est cultivée sur l'exploitation.

Une distribution des pertes de récoltes par culture à l'échelle de l'exploitation agricole et par année sur la période 2000-2016 est obtenue. Outre les pertes de récoltes, ce travail permet de faire une analyse statistique sur le nombre d'agriculteurs ayant des pertes par année et a fait l'objet d'une publication (Moncoulon et Kapsambelis 2021). Il a également été vérifié que la moyenne des pertes de récoltes sur le RICA est cohérente avec la moyenne AGRESTE. Il convient alors de relier la distribution annuelle des pertes des exploitations agricoles au taux de pertes moyen national annuel.

III.1.2 Relation entre les pertes de récoltes nationales et les pertes de récoltes des exploitations agricoles

Les pertes de récoltes du modèle climatique (chapitre II partie I) sont simulées à l'échelle nationale et départementale par culture. Pour simuler les pertes à l'échelle de l'exploitation agricole, il est nécessaire de faire le lien entre le taux de pertes national (ou départemental) et celui à l'échelle de l'exploitation agricole par culture. Pour cela, nous avons besoin de simuler la dispersion des pertes de récoltes des agriculteurs pour chaque événement. Pour l'étudier, dans un premier temps, la dispersion des pertes de récoltes annuelles à l'échelle de l'exploitation agricole sur l'historique est analysée. A titre d'exemple, la Figure 69 présente les résultats pour le blé tendre d'hiver.

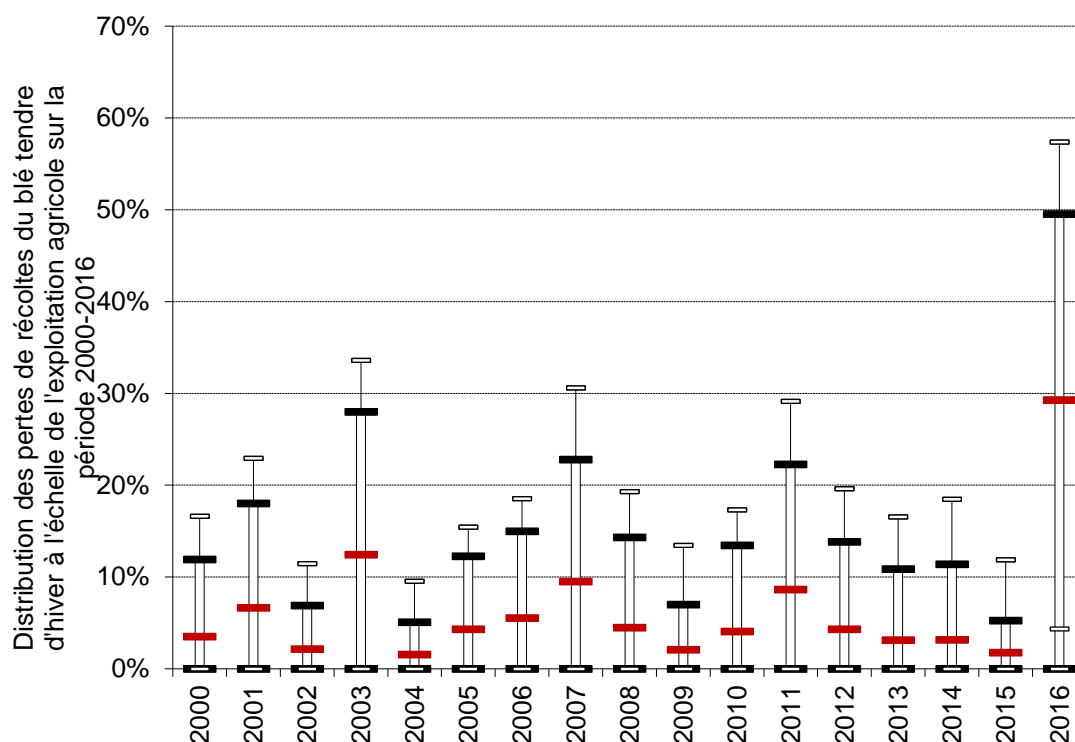


Figure 69. Distribution des pertes de récoltes par exploitation agricole du blé tendre d'hiver sur la période 2000-2016 calculée à partir des données RICA. En rouge : la moyenne des pertes de récoltes annuelle. Délimitation des boxplots : quantiles 10-90. Barres d'erreurs : quantiles 5-95.

D'après la Figure 69, la dispersion des pertes de récoltes par exploitation agricole augmente lors d'un événement climatique extrême (2003, 2007, 2011, 2016 pour le blé tendre d'hiver). En effet, de nombreux agriculteurs ont subi des pertes importantes (supérieures à 30%) qui ne sont pas observées les années où ce type de risque n'a pas eu lieu. En revanche, malgré le caractère systémique de ces événements, certains agriculteurs n'ont pas enregistré de pertes (la valeur du quantile 10 est de 0%). C'est pourquoi, la dispersion des pertes de récoltes des exploitations agricoles augmente lors d'événements extrêmes systémiques. Nous étudions alors la relation qui existe entre l'écart-type des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole et la moyenne nationale des pertes de récoltes. La Figure 70 présente donc cette relation pour la culture de blé tendre d'hiver.

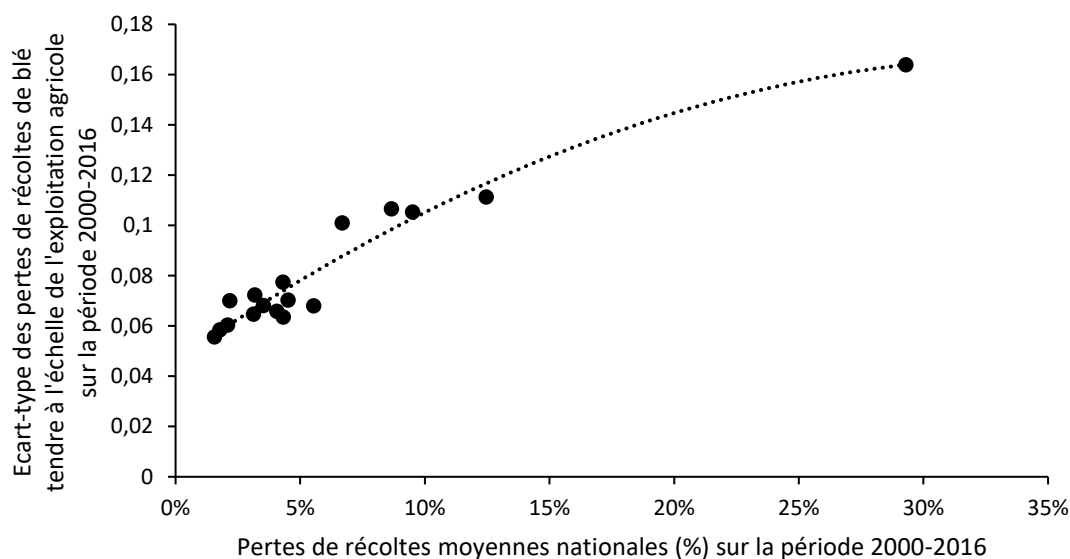


Figure 70. Relation entre la moyenne de pertes de récoltes (%) et l'écart-type des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole sur la période 2000-2016 pour la culture de blé tendre

D'après la Figure 70, plus les pertes de récoltes nationales sont importantes et plus l'écart-type des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation est important. De plus, nous mettons en évidence une relation polynomiale entre l'écart-type et la moyenne nationale de taux de pertes, donnée par l'équation suivante :

$$ET_{BTH} = -0,9765 * Mn_{BTH}^2 + 0,6884 * Mn + 0,0461$$

Où ET est l'écart-type des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation, BTH est la culture de blé tendre d'hiver, Mn est la moyenne des pertes de récoltes nationales.

Il est important de vérifier que la relation est de bonne qualité. Pour ce faire, il est calculé le coefficient de corrélation Pearson. Sa valeur est de 0,94, ce qui valide la corrélation entre les deux variables et leur relation par loi polynomiale. Les équations pour les différentes cultures étudiées ainsi que la qualité de la relation sont données dans le Tableau 17.

Tableau 17. Equations présentant la relation entre l'écart-type (ET) et la moyenne nationale (Mn) des pertes de récoltes pour les cultures de blé tendre d'hiver, orge d'hiver et colza d'hiver

Cultures	Relation entre ET et Mn	Coefficient de Pearson
Blé tendre d'hiver	$ET_{BTH} = -0,9765 * Mn_{BTH}^2 + 0,6884 * Mn + 0,0461$	0,94
Orge d'hiver	$ET = -3,371 * Mn_{OGH}^2 + 1,0746 * Mn + 0,0385$	0,9

Une fois cette relation établie, les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole sont simulées en utilisant une loi normale et une loi Weibull centrée autour des paramètres de moyenne et d'écart-type.

Les paramètres de la loi normale sont la moyenne et l'écart-type, deux paramètres déjà étudiés précédemment, ce qui permet de simuler simplement les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole.

La loi Weibull est couramment utilisée pour modéliser des données asymétriques à droite de la courbe. Or, la distribution des pertes de récoltes sur l'historique présente une proportion d'agriculteurs importante ayant 0% de pertes de récoltes comme présenté en Figure 71.

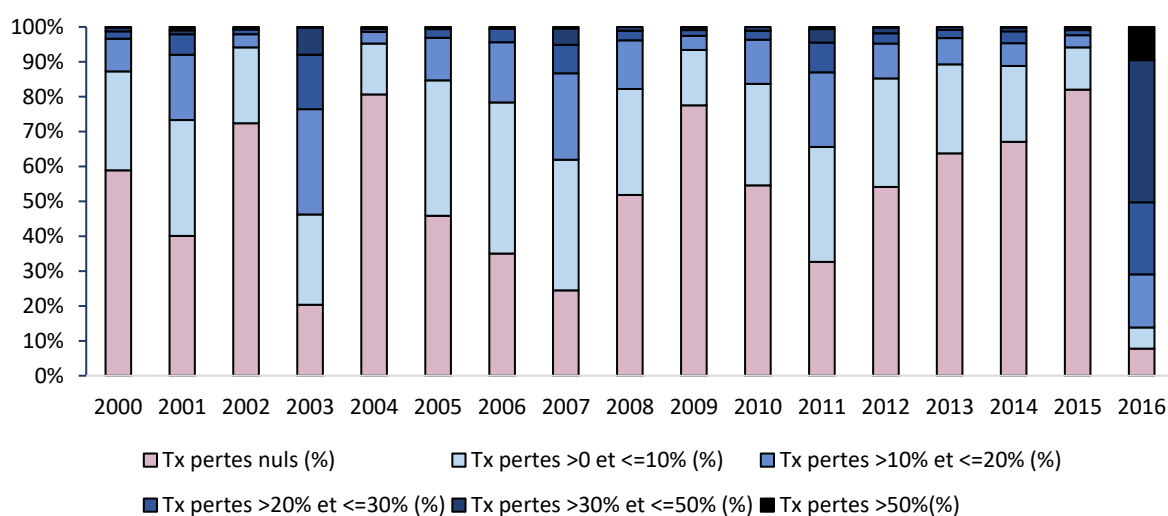


Figure 71. Proportion d'exploitations agricoles (%) selon les pertes de récoltes sur la culture de blé tendre d'hiver sur la période 2000-2016

Sur cette figure, on note que la proportion d'agriculteurs n'ayant pas subi de pertes diminue les années d'un événement climatique extrême (elle est de 20% en 2003, 32% en 2011, 8% en 2016) mais elle reste importante par rapport à la proportion d'agriculteurs ayant subi des pertes extrêmes. Cette proportion importante d'agriculteurs à 0% de pertes de récoltes ne permet pas d'ajuster une loi Weibull. En effet, la loi Weibull est une loi de valeurs extrêmes. C'est pourquoi, la loi Weibull est ajustée sur les données de pertes de récoltes strictement positives (0% de taux de pertes exclus) sur l'historique. Ce nouvel échantillon défini, il est calculé la moyenne des pertes de récoltes annuelles.

L'étude des paramètres de forme et d'échelle de la loi a permis de construire une relation linéaire entre la moyenne des pertes de récoltes non nulles (0% de pertes de récoltes exclus) et les deux paramètres. La régression linéaire est validée par un R^2 de 0,998 pour les deux paramètres. Enfin, une relation linéaire est établie ($R^2 = 0,96$) entre le logarithme népérien de la moyenne des pertes de récoltes et la proportion d'agriculteurs ayant des pertes de récoltes strictement positives sur l'historique. Ces

relations permettent de simuler les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole à partir de la moyenne nationale de taux de perte d'un événement, en conservant les caractéristiques de distribution de pertes de récoltes de l'événement.

Afin de simuler ces pertes de récoltes, il est nécessaire d'appliquer un rendement de référence et une surface moyenne par exploitation agricole. Pour ce faire, le recensement agricole a été utilisé. Le Tableau 18 donne le rendement moyen de référence et la surface moyenne par exploitation agricole pour les trois cultures.

Tableau 18. Typologie des exploitations agricoles utilisée dans le modèle : définition d'un rendement de référence et d'une surface moyenne de référence par exploitation agricole et par culture.

Exploitations agricole productrice de...	Rendement de référence (q/ha)	Surface moyenne (ha)
Blé tendre d'hiver	77,5	37,9
Orge d'hiver	68,0	10,5
Prairies	68,4	37,5

III.2 Calcul de la répartition des dommages entre les acteurs de la gestion du risque

Afin d'évaluer l'équilibre financier entre les acteurs, le coût des dommages perçus par les agriculteurs, les indemnités versées par l'assurance et celles par le fonds de l'Etat sont calculées. L'intervention de l'Etat ici est matérialisée par le fonds. L'assurance récolte est subventionnée à 65%. Cependant, cette subvention est gérée par un budget européen via le FEADER. Or, le provisionnement du fonds est national et n'est donc pas calculé sur la même enveloppe budgétaire que la subvention. Ainsi, les montants de la subvention ne font pas partie de cette réflexion.

Au moment de la finalisation de ce travail de recherche²⁰, les dernières réflexions prévoient une franchise à 25% pour l'assurance MRC, et c'est donc cette franchise que nous appliquerons pour les simulations. C'est d'ailleurs la franchise la plus utilisée dans les contrats MRC (CCR 2020). Inférieure à cette franchise, la gestion des risques est à la charge de l'exploitant agricole. Au-dessus de cette franchise, l'assureur intervient par l'assurance MRC. Le seuil d'intervention de l'Etat est fixé à 50% de

²⁰ Le décret précisant les modalités de franchise, seuil de développement et seuil d'intervention du Fonds est voté en octobre 2022 par la CODAR (Commission chargée de l'Orientation et du Développement des Assurances garantissant les dommages causés aux Récoltes) prévoit l'application d'OMNIBUS au moins pour le premier triennal (2023-2025) avec une franchise à 20% et une subvention) 70%. Ces éléments ont été négociés par les syndicats agricoles en août 2022 et n'étaient pas connus lors de la soutenance de thèse le 12 juillet 2022.

pertes de récoltes. La méthodologie de la descente d'échelle établie ne permet d'analyser l'antisélection, car la méthode est construite par la dispersion des pertes de récoltes autour de la moyenne nationale. Ainsi, dans cette étude, nous considérons un taux de diffusion de 100%.

Les équations pour le calcul de la perte totale économique des agriculteurs, le montant des dommages pour l'assurance et pour l'Etat sont formalisés en annexe 4.

Il est important de noter que le prix des cultures, le rendement moyen et la taille moyenne de l'exploitation agricole, la franchise, le seuil d'intervention du fonds et le taux de diffusion sont des paramètres du modèle qui sont facilement modifiables pour réaliser des analyses d'études de scénarios spécifiques.

IV RESULTATS

IV.1 Validation de la méthodologie

IV.1.1 Validation des résultats sur les céréales d'hiver

Il convient de vérifier que la simulation des pertes de récoltes par la méthodologie mise en place n'induit pas d'erreurs, il faut donc vérifier que la proportion des exploitations agricoles qui dépasse différents seuils de pertes de récoltes soit respectée. C'est pourquoi nous comparons le nombre d'exploitations agricoles dépassant des seuils de taux de pertes entre les données RICA (sur l'échantillon réalisé) avec les taux de pertes simulés par le modèle avec la loi normale et avec la loi Weibull. Les résultats sont présentés dans la Figure 72.

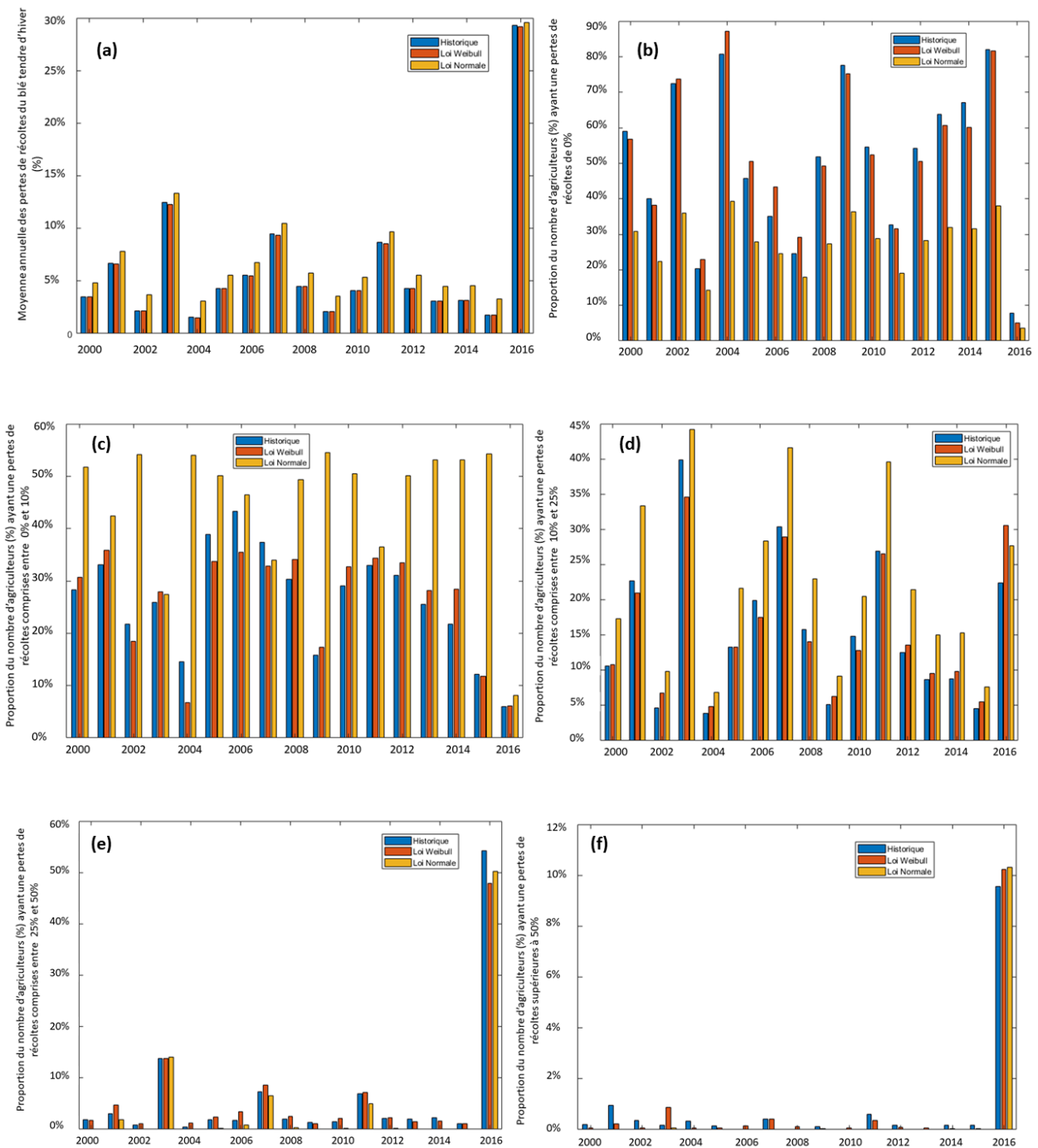


Figure 72. (a) Comparaison des moyennes annuelles de pertes de récoltes, (b) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant 0% de pertes de récoltes, (c) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes entre 0% et 10%, (d) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes comprises entre 10% et 25%, (e) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes comprises entre 25% et 50%, (f) de la proportion du nombre d'exploitations agricoles ayant des pertes supérieures à 50% calculées sur la base de données RICA (bleu), simulées à l'aide d'une loi normale (jaune), simulées à l'aide d'une loi Weibull (rouge) sur la période 2000-2016.

D'après les résultats, la moyenne de pertes de récoltes est bien simulée avec les deux lois (Figure 72 a). En revanche, la loi normale sous-estime la proportion d'agriculteurs avec 0% de pertes de récoltes (Figure 72 b), surestime la proportion d'agriculteurs entre 0% et 25% (Figure 72 c et d) et sous-estime

la proportion d'agriculteurs ayant des pertes supérieures à 50% (Figure 72 f). En effet, l'erreur relative moyenne sur la période 2000-2016 entre le RICA et les pertes simulées par la loi normale est de :

- -47,3% pour la proportion d'agriculteurs ayant 0% de pertes de récoltes ;
- 71,3% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 0% et 10% ;
- 45% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 10% et 25% ;
- -24,1% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 25% et 50% ;
- Pour les agriculteurs dont les pertes sont supérieures à 50%, la loi normale ne les détecte pas sauf pour l'année 2016 où l'erreur relative est de 3%.

La loi Weibull quant à elle, simule beaucoup mieux les extrêmes. L'erreur relative moyenne sur la période 2000-2016 entre le RICA et les pertes simulées par la loi Weibull est de :

- -0,03% pour la proportion d'agriculteurs ayant 0% de pertes de récoltes ;
- -0,2% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 0% et 10% ;
- 1,2% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 10% et 25% ;
- 0,7% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes comprises entre 25% et 50% ;
- -5,7% pour la proportion d'agriculteurs ayant des pertes supérieures à 50% ;

Une étude approfondie est réalisée sur les années extrêmes 2003, 2011, 2016 et présentée en Figure 72. Pour les valeurs extrêmes de pertes de récoltes, la loi normale ne les simule pas dans la plupart des cas (0% d'agriculteurs) alors que la loi Weibull permet de simuler quelques exploitations agricoles avec ces pertes importantes. En 2003 par exemple, pour les pertes de récoltes supérieures à 50%, la proportion sur le RICA est de 0,2% alors qu'elle est de 0,8% avec la loi Weibull. Cette incertitude engendre des erreurs élevées mais qui s'expliquent par le fait que très peu d'agriculteurs engendrent ces niveaux de pertes (peu de données disponibles). On constate que la loi Weibull minimise toujours l'erreur relative par rapport à la loi normale pour chaque classe de pertes de récoltes.

Ces différentes études permettent de valider la méthodologie de simulation des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole par une loi Weibull par événement.

IV.1.2 Validation des résultats sur les prairies

Pour les prairies, il n'est pas possible d'analyser la volatilité des pertes de récoltes par agriculteur autour de la moyenne nationale de taux de pertes car le RICA ne possède pas d'informations sur les rendements ou les productions sur les prairies. Afin d'obtenir une relation entre les pertes de récoltes nationales et les pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation des agriculteurs, il a donc été décidé d'utiliser la relation établie sur le blé tendre d'hiver et de vérifier cette relation en utilisant les montants d'indemnisations du FNGRA sur les événements extrêmes sur l'historique. Les dommages modélisés à l'échelle de l'exploitation agricole pour être comparées aux indemnisations du FNGRA, sont calculés avec les barèmes utilisés pour le FNGRA. Ces barèmes sont définis à l'échelle départementale. Il est

donc calculé un barème national, moyenne des barèmes départementaux donnés par les chambres d'agriculture. Ce barème est de 14,23 €/q. Une franchise de 30% est appliquée sur la perte de chaque agriculteur pour calculer les montants d'indemnisations.

Le Tableau 19 compare les montants des indemnisations sur les événements extrêmes de sécheresse de 2003 et de 2011.

Tableau 19. Comparaison des indemnisations du FNGRA calculé par le modèle et simulées par le modèle

	Indemnisations du FNGRA	Indemnisations calculées par le modèle
2003	388 M€	360 M€
2011	273 M€	250 M€

Le Tableau 19 montre que le modèle permet de respecter les ordres de grandeurs ce qui valide la méthodologie établie : en effet, les indemnisations calculées par le modèle sont légèrement sous-estimées (l'écart est inférieur à 10%).

La méthode de descente d'échelle à l'exploitation agricole est robuste sur les céréales à paille pour lesquelles une comparaison du modèle avec les taux de pertes réels a pu être menée sur un historique comprenant des événements extrêmes. Pour les prairies, ces données n'existent pas. La méthode de descente d'échelle appliquée est la même que pour les céréales, la validation en termes d'ordre de grandeur permet simplement de s'assurer que les résultats ne sont pas aberrants.

IV.2 Conséquences des événements extrêmes climatiques sur les pertes économiques des exploitations agricoles à l'échelle nationale

La première partie de ces résultats détaille les pertes économiques engendrées par les aléas climatiques. Elle permet de donner un ordre de grandeur du coût des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur l'agriculture française (céréales et prairies) à horizon futur en calculant le coût économique total engendré pour les agriculteurs. La Figure 73 présente les pertes économiques brutes sur (a) le blé tendre d'hiver (sécheresse et excès d'eau), (b) l'orge d'hiver (sécheresse et excès d'eau), (c) les prairies (sécheresses) et (d) les trois cultures sur le climat 2000 et le climat 2050 en fonction de leur période de retour.

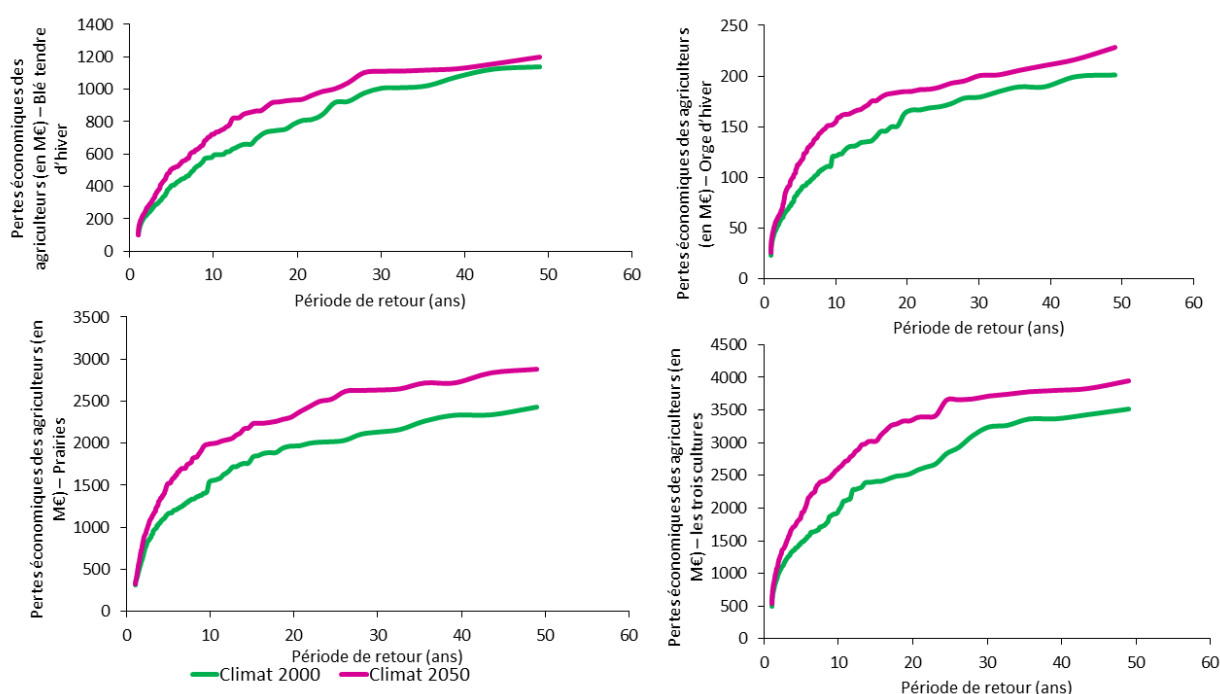


Figure 73. Pertes économiques brutes en fonction de leur période de retour sur le climat 2000 et sur le climat 2050 pour (a) le blé tendre d'hiver, (b) l'orge d'hiver, (c) les prairies et (d) les trois cultures

D'après la Figure 73, en 2050, les pertes économiques moyennes annuelles cumulées des agriculteurs sur les trois cultures évoluent de 1,2 Md€ (dont 840 M€ pour les prairies) à 1,5 Md€ (dont 1,0 Md€), soit une augmentation de 22%. Les pertes économiques moyennes annuelles à la suite d'événements extrêmes climatiques en 2050 sont donc de 72 €/ha pour le blé tendre d'hiver (évolution de 22% par rapport au climat 2000), 63€/ha pour l'orge d'hiver (évolution de 21% par rapport au climat 2000) et 90€/ha pour les prairies (évolution de 20% par rapport au climat 2000).

Sur la période 1989-2004, des études ont été réalisées pour estimer le montant des dommages annuels dû aux aléas climatiques à partir des données du FNGRA et des données de l'assurance récolte. Ces études indiquent un montant de 1,2 Md€ pour toutes les cultures confondues (Boyer 2008) mais elles indiquent également que les chiffres sont sous-estimés du fait qu'il n'a pas été possible de prendre en compte les dommages qui sont inférieurs au seuil de l'indemnisation du FNGRA notamment. Nous retrouvons cet ordre de grandeur à climat actuel sur les trois cultures.

Les pertes économiques décennales des agriculteurs en 2050 sont de :

- 690 M€ pour le blé tendre d'hiver (évolution de 26% par rapport au climat 2000) ;
- 153 M€ pour l'orge d'hiver (évolution de 27% par rapport au climat 2000) ;
- 2,0 Md€ pour les prairies (évolution de 30% par rapport au climat 2000) ;
- **2,6 Md€ sur les trois cultures (évolution de 34% par rapport au climat 2000).**

Les pertes économiques vingtennales des agriculteurs en 2050 sont de :

- 877 M€ pour le blé tendre d'hiver (évolution de 23% par rapport au climat 2000) ;
- 185 M€ pour l'orge d'hiver (évolution de 18% par rapport au climat 2000) ;
- 2,3 Md€ pour les prairies (évolution de 18% par rapport au climat 2000) ;
- **3,3 Md€ sur les trois cultures (évolution de 33% par rapport au climat 2000).**

Les pertes économiques cinquantennales des agriculteurs en 2050 sont de :

- 1,05 Md€ pour le blé tendre d'hiver (pas d'évolution par rapport au climat 2000) ;
- 219 M€ pour l'orge d'hiver (évolution de 10% par rapport au climat 2000) ;
- 2,8 Md€ pour les prairies (évolution de 21% par rapport au climat 2000) ;
- **3,9 Md€ pour les trois cultures (évolution de 12% par rapport au climat 2000).**

À l'échelle de la France métropolitaine, ces chiffres montrent l'exposition économique de la ferme France aux risques climatiques extrêmes et l'impact significatif du changement climatique. Les pertes cinquantennales sont du même ordre de grandeur que les pertes engendrées par l'excès d'eau de 2016. Dans le chapitre précédent, sur la Figure 61, il a été démontré que les pertes de récoltes sont du même ordre de grandeur pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. Pourtant, en termes de pertes économiques, le blé tendre d'hiver engendre des dommages bien plus conséquents (jusqu'à 5,5 fois plus importants pour les pertes cinquantennales). Ceci est dû au fait que, d'une part, le prix du blé tendre d'hiver est plus élevé que celui de l'orge d'hiver, et d'autre part, la surface cultivée en blé tendre d'hiver est 3,8 fois plus élevée. En effet, ramenées à l'hectare, les pertes sont relativement équivalentes. Par ailleurs, la surexposition des prairies et donc des systèmes d'élevage au risque de sécheresse à horizon futur a été démontrée dans le chapitre précédent et ainsi, le seuil de 2 milliards d'euros est dépassé à horizon 2050 à partir d'un événement décennal.

La combinaison des 3 cultures étudiées met en évidence l'enjeu économique majeur que représentent les risques de sécheresse et d'excès d'eau sur le blé tendre, l'orge d'hiver et les prairies. En moyenne tous les 10 ans les dommages dépasseront 2,6 Md€ pour ce périmètre seul. Ces montants nous indiquent que la problématique de gestion des risques en agriculture est surtout une problématique de provisionnement pour gérer les événements extrêmes. Quel que soit le système mis en place (assurantiel ou sous forme de fond), il doit avoir la capacité de constituer rapidement des réserves pour pouvoir indemniser les producteurs. Cette problématique déjà présente aujourd'hui, va se renforcer avec le changement climatique dans les années à venir.

IV.3 Modélisation des pertes à l'échelle de l'exploitation agricole

Les systèmes de gestion des risques existants, assurance privée, fonds public ou combinaison des deux, proposent l'intervention des différents acteurs en fonction d'un seuil de pertes de récoltes individuel. Afin d'estimer les montants pris en charge par les différents systèmes, il convient de modéliser la distribution des pertes à l'échelle de l'exploitation agricole.

IV.3.1 Le blé tendre d'hiver

La Figure 74 présente la distribution des pertes de récoltes des agriculteurs sur le climat 2000 et le climat 2050 pour le blé tendre d'hiver pour des événements moyens, décennaux, vingtennaux, cinquantennaux par tranche de pertes de récoltes individuelles. Les seuils choisis pour illustrer cette distribution des taux de pertes sont 25% (la franchise actuelle de l'assurance récolte) et 50% (correspondant à un seuil de pertes extrêmes pour l'agriculteur).

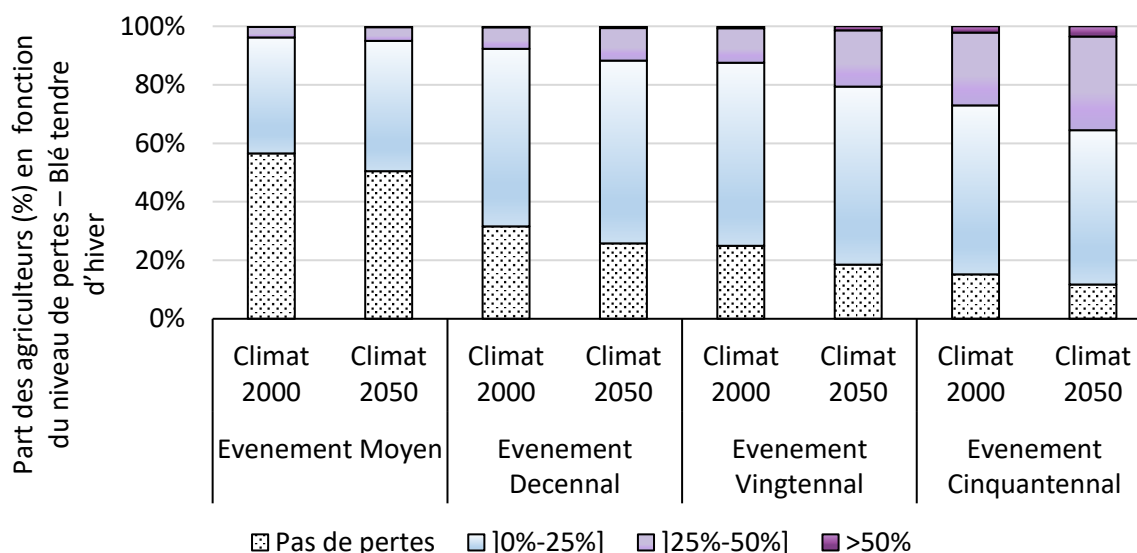


Figure 74. Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, un événement décennal, un événement vingtennal et un événement cinquantennal sur le blé tendre d'hiver. Les seuils choisis sont ceux de l'intervention des différents acteurs de la réforme 2022 de la gestion en agriculture.

Sur un événement moyen (5% de pertes de récoltes à l'échelle de la France métropolitaine), 90% des agriculteurs enregistrent des pertes inférieures à 25% dont 50% à taux de perte nul à climat actuel et futur. Cela signifie que ces événements sont locaux et non systémiques. Seuls 10% des exploitants en moyenne ont des pertes de récoltes significatives. Ce type d'événement doit permettre une mutualisation géographique du risque à l'échelle nationale.

À climat futur, sur un événement décennal, 25% des agriculteurs n'enregistrent pas de pertes, soit une diminution de 21% par rapport au climat actuel et moins de 1% des exploitations agricoles enregistrent des pertes extrêmes (supérieures à 50%). Ces événements peuvent être cependant d'une grande étendue spatiale et enregistrer, au niveau national, des pertes de récoltes importantes. Le montant des dommages à l'échelle nationale résulte alors de la somme des pertes locales peu intenses.

Sur les événements vingtennaux et cinquantennaux, le risque extrême climatique à l'échelle de l'exploitation agricole augmente avec l'effet du changement climatique, mais il reste marginal, puisqu'il représente moins de 3% des exploitations agricoles. Encore une fois, le montant des dommages nationaux est la somme de pertes de récoltes modérées à l'échelle de l'exploitation agricole et ces risques climatiques extrêmes s'intensifient en termes d'étendue spatiale.

Ces résultats mettent en évidence que sur le blé tendre d'hiver, les pertes de récoltes extrêmes à l'échelle individuelle sont particulièrement rares et ne sont pas représentatives du niveau de pertes engendré à l'échelon national. Un événement extrême climatique, pour les grandes cultures, a donc un profil horizontal et systémique qui va perdurer sur le long terme : un nombre important d'agriculteurs touchés par des pertes de récoltes modérées. La fréquence de ces événements va

augmenter dans les prochaines décennies. Ces résultats illustrent la difficulté de mutualisation du risque, pour les cultures céréalières, à l'échelle du territoire français métropolitain. Ils mettent également en évidence le fait que la gestion des risques extrêmes ne doit pas se focaliser sur des niveaux de perte individuels très élevés mais sur un cumul de pertes.

La Figure 75 présente une illustration de la répartition des coûts entre l'assurance récolte et l'Etat (par le fonds de solidarité nationale) pour les événements extrêmes sur le climat 2000 et le climat 2050. Dans notre exemple, le fonds public intervient à partir de 50% de taux de pertes. L'assurance intervient entre 25% et 50%. Il est considéré un taux de diffusion de 100% pour représenter les budgets maximums et ne pas intégrer des facteurs tels que l'antisélection qui ne peuvent pas être représentés par ce modèle.

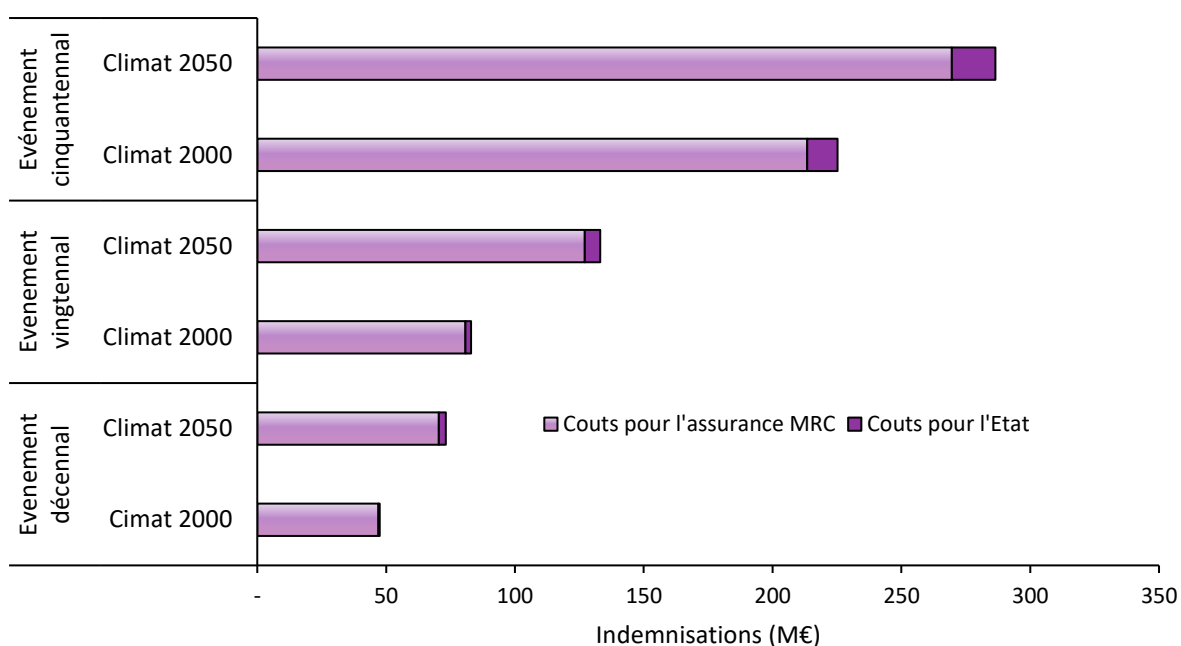


Figure 75. Répartition du coût des dommages sur le blé tendre d'hiver à climat actuel et climat futur entre l'assurance MRC et le Fonds de Solidarité Nationale avec un taux de diffusion de 100%

D'après la Figure 75, on observe que quelle que soit la période de retour des événements, la sinistralité augmente très significativement entre le climat 2000 et le climat 2050 : le coût des dommages pour l'assurance évolue de 26% pour un événement cinquantennal, de 56% pour un événement vingtennal et de 50% pour un événement décennal. Pour les céréales étudiées, la part indemnisée par l'assurance multirisques climatique est très largement majoritaire par rapport au fonds, du fait de la faible proportion d'agriculteurs enregistrant des pertes de récoltes supérieures à 50%. Cette particularité des cultures de céréales à paille est à noter. Les événements extrêmes, d'un point de vue économique, sont caractérisés par de très nombreux agriculteurs touchés mais par des taux de pertes qui ne sont pas extrêmes à l'échelle individuelle.

Cette étude montre l'importance de la descente d'échelle à l'exploitation agricole pour évaluer le coût des événements extrêmes entre les acteurs. En effet, sur les événements cinquantennaux, d'après la Figure 73, les pertes économiques sont presque équivalentes entre le climat 2000 et le climat 2050. Ceci est dû au fait que ces événements extrêmes sont des excès d'eau qui n'évoluent pas dans le futur (voir chapitre précédent). Cependant, les pertes de récoltes individuelles au-dessus du seuil de 25% augmentent sensiblement sur ce type d'événement, ce qui nécessite une plus grande prise en charge par l'assurance.

La Figure 76 permet d'illustrer ces propos. Elle représente l'écart relatif entre les coûts des dommages économiques pour les agriculteurs et pour l'assurance entre le climat 2000 et le climat 2050 en fonction de la période de retour. Elle met en évidence l'importance de s'intéresser à la distribution des pertes de récoltes individuelles pour analyser l'évolution du coût des événements extrêmes pour chaque acteur. Du fait d'une évolution non homogène des pertes de récoltes individuelles, le montant des dommages pris en charge par l'assurance augmente de manière plus élevée que les dommages économiques totaux des agriculteurs. Ainsi, à horizon 2050, les événements extrêmes sont caractérisés par une augmentation importante des pertes de récoltes individuelles modérées augmentant d'autant plus le coût pour l'assurance.

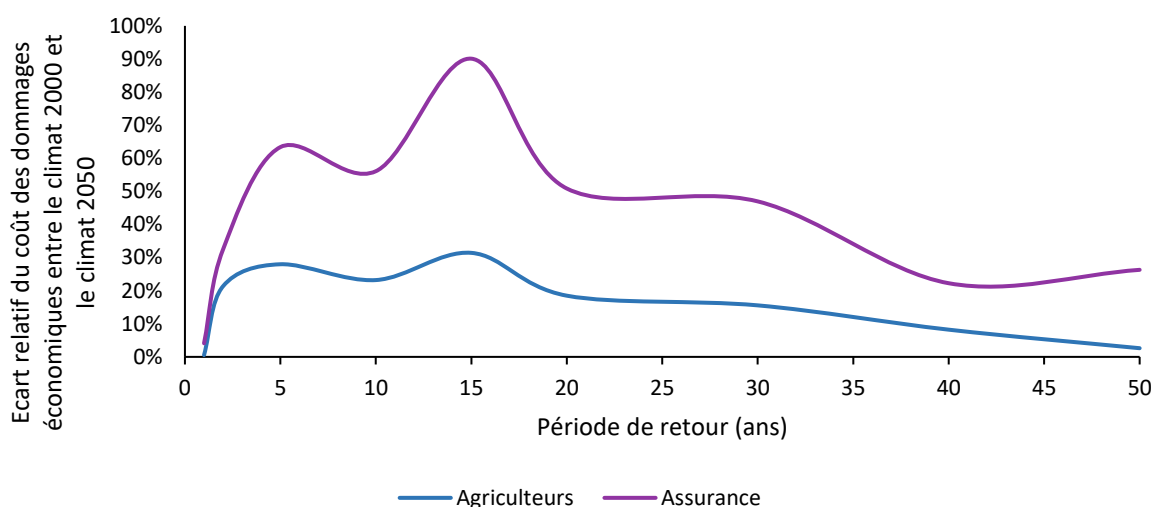


Figure 76. Ecart relatif du montant des dommages économiques entre le climat 2000 et le climat 2050 pour les agriculteurs et pour l'assurance en fonction de la période de retour

Dans un système comme celui mis en place par la réforme Descrozaille, pour les céréales à paille, le niveau assurantiel sera le plus sollicité pour faire face à de tels événements naturels ; le Fond de Solidarité Nationale (fond public) n'intervenant que rarement. Le caractère systémique de ces événements de sécheresse et d'excès d'eau va nécessiter une mutualisation plus large que le territoire national. L'enjeu sera donc un enjeu de réassurance pour cette branche afin de mutualiser le risque à une échelle internationale.

Considérant la prime pure assurantielle comme le montant moyen des dommages annuels, il est possible de calculer quelle pourrait être l'augmentation des taux de prime dans les prochaines décennies. Ces résultats sont présentés en Tableau 20.

Tableau 20. Evolution du montant moyen des dommages annuels et des S/P de l'assurance MRC entre le climat 2000 et le climat 2050 sur le blé tendre d'hiver (taux de diffusion 100%)

	Climat 2000	Climat 2050	S/P Climat 2000	S/P Climat 2050
Événement moyen	23,3 M€	30,7 M€	100%	132%
Événement décennal	47 M€	70,5 M€	202%	303%
Événement vingtenal	80,8 M€	127 M€	347%	546%

Ainsi, à horizon 2050, du fait de l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes de sécheresse, les primes d'assurance devraient naturellement augmenter. En grandes cultures, le taux de diffusion de l'assurance plafonne à 30% depuis plusieurs années. Parmi les raisons évoquées par la profession agricole, bien que celle des tarifs ne soit pas la principale, il paraît difficile d'imaginer un fort développement du taux d'équipement en assurance en cas de hausse des prix. La modélisation des pertes liées au changement climatique montre que la plus grande part des pertes pour les grandes cultures sera toujours prise en charge par l'assurance ce qui ne permettra pas de maintenir ou de diminuer le niveau des primes d'assurances.

La mutualisation des risques pour une catégorie de culture en cas de survenance d'un événement extrême est donc à rechercher à l'échelle individuelle. Les stratégies d'adaptation au changement climatique, la prévention face aux risques naturels, doivent permettre une réduction de l'exposition aux risques individuelle. Ceci suppose des choix cultureux, des modifications de pratiques culturales, des aménagements sur les exploitations agricoles qui engendrent un coût supplémentaire pour les exploitants agricoles.

Les systèmes de gestion des risques, publics ou privés, doivent prendre en considération ces pratiques individuelles, être en mesure d'évaluer leurs conséquences sur la sinistralité et de tarifier les outils proposés en conséquence. Ceci permettrait à minima de maintenir les niveaux de primes de l'assurance, tout en bonifiant les mesures de gestion de l'agriculteur sur son exploitation. La discussion de ce chapitre présente dans un premier temps, les moyens d'adaptations possibles agronomiques et dans un second temps, une proposition d'intégration de ces pratiques dans le niveau de la prime assurantielle.

IV.3.2 Prairies

La Figure 77 présente la distribution des pertes de récoltes des agriculteurs sur le climat 2000 et le climat 2050 pour les prairies pour des événements moyens, décennaux, vingtennaux, cinquantennaux par tranche de pertes de récoltes.

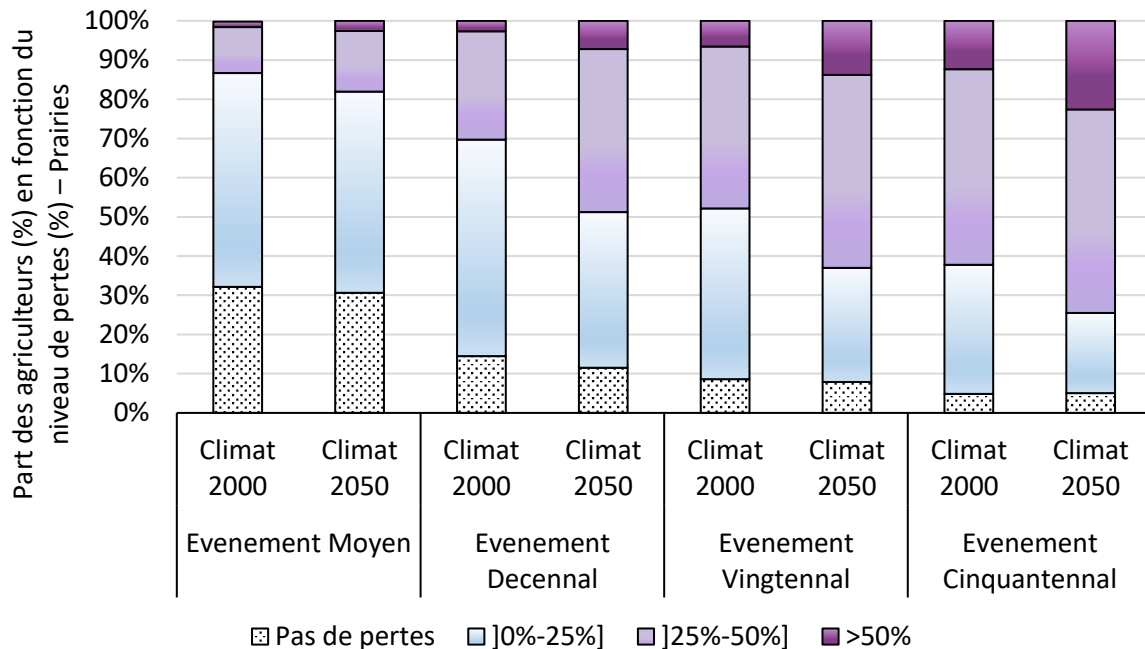


Figure 77. Part des agriculteurs (%) en fonction de leur niveau de pertes sur le climat 2000 et le climat 2050 pour un événement moyen, un événement décennal, un événement vingtennal et un événement cinquantennal sur les prairies.

D'après la Figure 77, sur un événement moyen, à climat actuel et futur, 30% des agriculteurs n'enregistrent pas de pertes. Cependant, les agriculteurs enregistrant des pertes de récoltes extrêmes sont très peu nombreux (moins de 3% des exploitations agricoles). Sur un événement moyen, la répartition du niveau de pertes des exploitations agricoles montre qu'à l'échelle de la France métropolitaine, le risque est mutualisable car non systémique.

Sur un événement décennal en 2050, le risque extrême individuel augmente par rapport au climat actuel. De plus, seules 12% des exploitations agricoles n'enregistrent pas de pertes. Il apparaît alors, que les sécheresses décennales sont déjà systémiques à l'échelle du territoire métropolitain. Les montants des dommages nationaux résultent ainsi d'une sécheresse géographiquement étendue. Ainsi, dès la période de retour de 10 ans, il apparaît que le risque serait difficilement mutualisable à l'échelle du périmètre des prairies.

Sur les événements cinquantennaux, le nombre d'agriculteurs enregistrant des pertes extrêmes évolue par rapport au climat 2000 et représente plus de 20% des exploitations agricoles. Par ailleurs, les

exploitations agricoles sans pertes de récoltes sont marginales. Ces sécheresses sont systémiques et leur intensité est extrême.

Ainsi pour les prairies, les sécheresses extrêmes présentent à climat actuel un profil comparable avec les céréales à paille, donc surtout horizontal mais évolueront vers un profil de risque à la fois horizontal et vertical : l'ensemble de la profession agricole sera impactée et les pertes de récoltes individuelles seront de grande ampleur. Contrairement aux grandes cultures, la mutualisation en système d'élevage par la diversification des cultures ne résout que partiellement le problème : l'alimentation des troupeaux reste prioritaire pour assurer une production animale viable. L'achat de foin ou d'équivalent alimentaire a un coût direct sur la marge de l'exploitation. De plus, la rigidité des cahiers des charges sur les AOC et AOP impose une autonomie fourragère importante sur les exploitations d'élevage. Sur ce périmètre, l'intervention de l'Etat par le biais d'un fonds permet une répartition des coûts des dommages entre les acteurs.

De plus, la Figure 78 présente, pour les événements extrêmes, le coût des dommages engendrés pour l'Etat et l'assureur.

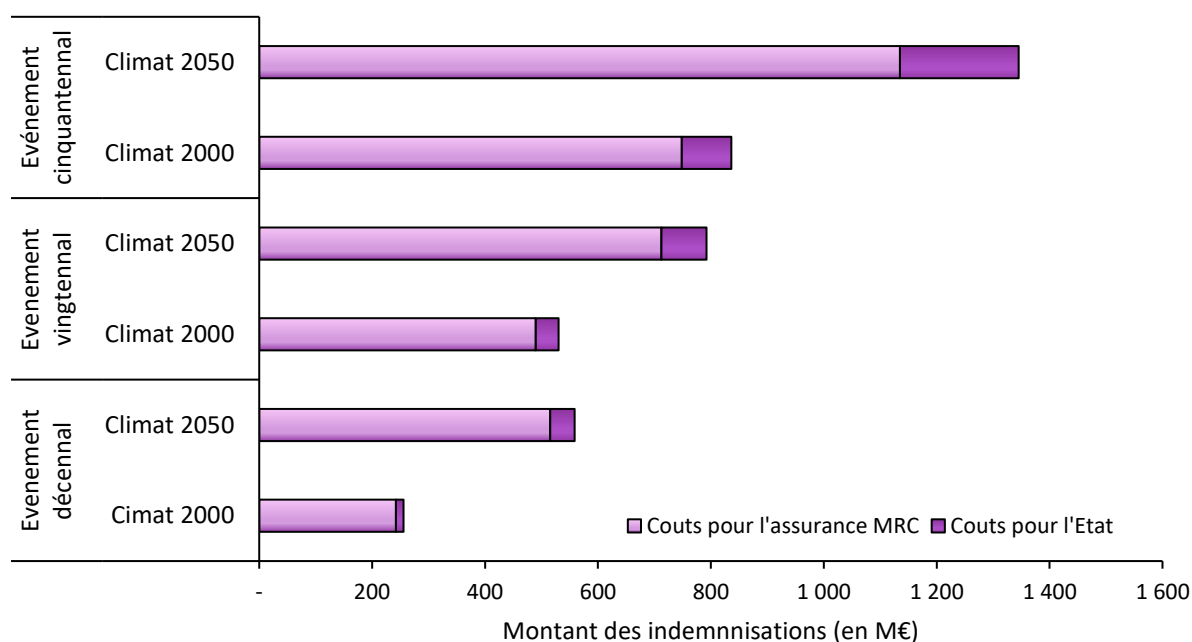


Figure 78. Coûts des dommages pour l'assurance MRC et pour l'Etat sur les prairies avec un taux de diffusion de 100% sur le climat 2000 et le climat 2050

D'après la Figure 78, il existe une augmentation significative du montant des indemnités à horizon 2050 quelle que soit la période de retour des événements.

Cette augmentation est plus importante pour l'Etat. C'est sur un événement décennal que la variation est la plus importante : les coûts augmentent de 113% pour l'assurance et de 228% pour le fonds entre le climat 2000 et le climat 2050.

Face à l'augmentation de la sinistralité engendrée par les sécheresses extrêmes dans le futur, les éleveurs français doivent mettre en place des stratégies d'adaptation qui devraient être intégrées dans le tarif pratiqué par les assureurs pour permettre le développement de l'assurance. Ces stratégies d'adaptation peuvent être guidées par la connaissance de l'exposition au risque dans le temps, avec la diffusion des projections de l'indice assurantiel sur la saison de production dans un cas où une large partie de la ferme France est assurée. Les montants des dommages pris en charge par l'assurance, malgré l'intervention de l'Etat restent très importants et bien au-delà de ceux qui peuvent être observés sur les grandes cultures, ce qui nécessite pour l'assurance une mutualisation plus large que l'échelle nationale. Les dommages sur les prairies à horizon 2050 constituent le véritable enjeu de l'adaptation de l'agriculture française. Ce régime à trois étages permet de répartir les coûts des dommages entre les différents acteurs mais semble exposer aussi bien l'Etat que les assureurs à un régime sous tension. Il semble difficile d'imaginer la pérennité de ce régime sans l'intervention d'autres acteurs comme la réassurance. Enfin, ces résultats posent la question de l'allocation des fonds européens consacrés à la gestion des risques et montrent à quel point, plus que le soutien au revenu, le soutien financier pour la gestion du risque est le cœur du sujet de l'adaptation au changement climatique.

V DISCUSSION

V.1 Partage de l'information pour tous par les nouvelles technologies

La méthodologie établie est un outil de modélisation qui permet d'analyser l'ensemble de la chaîne du risque : de l'aléa à l'évaluation du coût des dommages par acteur. Dans le cas présent, cet outil fonctionne à l'échelle métropolitaine, mais nous pourrions envisager de nombreux outils qui se déclinaient sur les territoires. Le partage de la connaissance, nécessaire pour faire avancer les réflexions sur la gestion des risques en agriculture, est aujourd'hui rendu possible au moyen des nouvelles technologies et aux partenariats entre le monde de la recherche académique et les organismes publics ou privés de gestion des risques. Le partage de l'information est aujourd'hui un élément essentiel de l'alerte et de la prévention face au changement climatique y compris et surtout vers les agriculteurs.

Les systèmes de bases de données actuels permettent notamment de traiter un nombre très élevé d'informations recueillies sur le terrain (par des capteurs par exemple). Ces informations peuvent ensuite être traitées et partagées à l'ensemble des acteurs. Elles communiqueraient des informations sur l'évolution du risque de sécheresse au cours de la campagne, par exemple, issue de données terrains sur les exploitations agricoles ou même de données satellitaires. Des outils d'aide à la décision ont été développés ces dernières années et ont pour objectif le pilotage de l'activité agricole. Ces outils modélisent la croissance des plantes en tenant compte de l'évolution du milieu (pathogène, climat, propriétés du sol) et proposent des solutions adaptées à chaque nouveau risque perçu à un instant t sur l'exploitation.

Le partage de résultats de modélisation de tout type à tous les acteurs permet d'anticiper le risque et de mieux agir sur ce dernier pour réduire son impact. Ainsi, ces outils, tels que celui développé dans cette thèse, peuvent servir de prospective et alimenter la réflexion sur la gestion des risques.

V.2 Evolution des systèmes de gestion des risques

Il a été vu dans les résultats de ce chapitre que, du fait de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes à horizon 2050, il est difficile de dessiner un schéma de gestion des risques à l'équilibre pour chacun des acteurs. Pour autant, l'exposition aux risques de sécheresses des exploitations agricoles et en particulier de l'élevage, montre la nécessité de mettre à disposition des exploitations agricoles des mécanismes de soutien sur leur revenu agricole. Le coût des dommages pour l'assurance, sur ce secteur en particulier est particulièrement élevé ce qui nécessiterait pour l'assureur une mutualisation à l'échelle internationale. Cette mutualisation peut se faire uniquement si les risques

sont décorrélés. Or, sur le territoire européen, les différentes études sur le changement climatique montrent une exposition accrue de l'ensemble des territoires. La mutualisation doit alors impérativement opérer à très grande échelle. Tout système de réassurance (public ou privé) augmenterait les tarifs ce qui n'est pas souhaitable, l'assurance ayant déjà du mal à se développer.

Par ailleurs, si le seuil de l'intervention de l'Etat était abaissé, pour augmenter l'attractivité de l'assurance et diminuer les coûts engendrés pour les assureurs, l'Etat devrait faire face à des montants de dommages considérables. Ceci nécessiterait de faire des réserves pour le fonds qui ne pourrait, seul, faire face au montant des dommages. L'Etat s'endetterait pour faire face à cette crise.

Le rôle de ce type d'outil de modélisation est aussi de permettre à chacun des acteurs d'anticiper le coût des dommages dans le futur. Ce raisonnement par anticipation et non par gestion de crise montre qu'il est nécessaire de constituer des réserves, pour chacun des acteurs pour faire face au changement climatique. Pour l'Etat, du fait de l'importance du secteur agricole pour les populations, on pourrait envisager un provisionnement du fonds par tous les citoyens, et non uniquement par les agriculteurs, ce qui permettrait d'augmenter son enveloppe financière et donc son intervention. Dans ce cas précis, il serait alors possible de maintenir les niveaux de primes de l'assureur, voire de les diminuer en cas de très large intervention du fonds sur certains secteurs (comme l'élevage) tout en ne mettant pas en péril le provisionnement du fonds. Les mécanismes de provisionnement du fonds doivent faire l'objet d'études approfondies pour que le système de gestion des risques à trois étages puisse faire face à l'augmentation du montant des dommages dus aux événements extrêmes dans le contexte du changement climatique.

V.3 S'adapter grâce à la formation

La concertation sur le Varenne de l'eau a été l'occasion de revenir sur la formation des Jeunes Agriculteurs à la gestion du risque climatiques. Animé par l'APCA (Assemblée Permanente des Chambres d'Agricultures) et les Jeunes Agriculteurs (JA), les travaux menés sur ce sujet ont conclu à la nécessité de sensibiliser et de former les Jeunes Agriculteurs à la gestion des risques climatiques et de les sensibiliser à l'assurance multirisques climatique. Les travaux ont conduit à envisager des modules de formation au moment de l'installation sur ces questions mais également à revoir les programmes en lycée agricole sur ce sujet pour sensibiliser plus tôt les futurs agriculteurs à la gestion du risque climatique.

Plusieurs types de formation se sont mis en place sur les territoires pour faire dialoguer les acteurs entre eux. Les méthodes immersives et les jeux de rôle se sont développés depuis une dizaine d'années. Ils permettent de former les apprenants de manière ludique, facilitent le dialogue et la cohésion des acteurs et par leur forme, obligent les joueurs à être dans une forme participative pour répondre à une

problématique sur un territoire donné. Il existe de nombreux jeux qui sont construits sur ce schéma et qui s'appliquent à la problématique de l'adaptation au changement climatique. Dans ces jeux, les participants gagnent s'ils prennent les décisions ensemble, de manière concertée. Le jeu évolue par étape en fonction de chaque décision prise. En fin de jeu, il s'agit d'évaluer si la stratégie d'adaptation mise en place a été un succès et son coût. Un exemple de ce type de jeu immersif est le jeu du Rami Fourrager développé par l'institut de l'élevage (IDELE). Il a été testé en 2018 dans le département de Maine-et-Loire afin de définir des stratégies d'adaptation au changement climatique à horizon 2060 (Le Bourhis-Le Duigou 2022). Il s'agit de réfléchir à la quantité de fourrage disponible pour les troupeaux en raison de la hausse des températures notamment pendant la saison estivale, de réfléchir à la variation des stocks fourragers. Ce jeu de plateau permet de favoriser la prise de conscience du changement climatique et de réfléchir à la construction de nouveaux systèmes fourragers de manière collective. Ce jeu s'inscrit dans un programme plus général, le programme Climalait mis en place par le CNIEL (Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière), en partenariat avec IDELE, Météo-France et INRAE, les chambres d'agriculture, le BTPL (Bureau Technique de Promotion Laitière) et ARVALIS qui a été développé afin d'identifier les leviers d'adaptation des systèmes d'élevage laitier en France (Charef et al. 2022).

V.4 Adaptation agronomique au risque de sécheresse

Comme démontré tout au long de cette thèse, la recherche d'un équilibre dans les systèmes publics ou privés de gestion des risques climatiques est rendue complexe par le changement climatique. Pour un système résilient sur le long terme, l'adaptation des systèmes de production et la mise en œuvre, à l'échelle individuelle de mesures de prévention est nécessaire et inévitable. Nous en évoquons ici quelques-uns mais la liste n'est pas exhaustive et la recherche agronomique devra proposer des solutions nouvelles face aux constats que posent des travaux comme les nôtres.

V.4.1 L'irrigation

De nombreux auteurs affirment que la ressource en eau est le principal facteur limitant pour le rendement. À partir de ce constat, l'amélioration du rendement consiste à augmenter la quantité d'eau disponible pour la plante. Une première réponse pour cet apport en eau est donc l'irrigation (Vert et al. 2013). Celle-ci répond à plusieurs objectifs pour l'agriculteur. Elle permet en cas de déficit hydrique, d'obtenir un rendement supérieur et une récolte de meilleure qualité ce qui contribue à stabiliser le revenu de l'exploitation agricole. Elle joue le rôle d'assurance contre l'aléa de sécheresse, et peut donc être intégrée comme une anticipation du risque de manque d'eau (Amigues et al. 2006). Dans le Languedoc par exemple, l'irrigation massive du blé tendre, peut être considérée comme un cas extrême d'anticipation du risque de sécheresse récurrent. Il est alors important de se poser la question de

l'implantation de cultures à forte demande en eau dans des zones qui ne sont pas adaptées. Il est alors possible de s'interroger sur la raison pour laquelle le blé tendre est cultivé notamment en Méditerranée. L'agriculteur n'évalue pas toujours la pérennité du système sur le long terme face aux restrictions d'eau du fait d'un contexte climatique différent (Teyssier 2005).

Des rapports de l'institut ARVALIS et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation qui comparent le volume d'eau apporté par l'irrigation sur différentes années, montrent que pour le blé tendre d'hiver, ce volume augmente de 20% entre une année sèche (type 2011) et une année moins sèche (type 2006) (Bouthier, Bonnifet, et Briand 2004; Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation 2014; 2010). Considérant que la fréquence des années de sécheresse double à horizon 2050, le volume moyen d'irrigation prélevé augmenterait alors sensiblement à horizon 2050 pour maintenir le niveau des rendements agricoles pour les céréales. Le renforcement de l'irrigation apparaît comme la première réponse des agriculteurs face au changement climatique, particulièrement pour les exploitations du Sud de la France (Ayphassorho et al. 2020). Dans le cas d'un volume d'eau prélevé qui augmente, il faut se poser la question suivante : est-ce que la ressource en eau est suffisante pour combler la demande d'augmentation de prélèvement en eau en termes de quantité et de qualité ?

Cette question s'évalue dans la disponibilité de la ressource en eau en France et intègre les conflits d'usage de l'eau qui pourraient exister. Notre étude a montré que le déficit hydrique va s'accroître en moyenne, chaque année, de 40% et notamment dans le Sud de la France.

C'est pourquoi, la gouvernance de la ressource en eau est une étape clé dans l'adaptation au changement climatique. La gestion intégrée et partagée avec les autres usages et usagers de l'eau est une nécessité pour continuer soutenir la production agricole tout en n'épuisant pas cette ressource naturelle. Cette gouvernance est aujourd'hui bien mise en place dans le Sud-Est de la France mais a du mal à se mettre en place dans de nombreux territoires du fait de la multiplicité des acteurs qui interviennent à différentes échelles. Un des outils développés pour permettre la concertation des acteurs est le PTGE (Projet de Territoires pour la Gestion de l'Eau), vécu le plus souvent comme une démarche positive.

Ainsi, l'irrigation apparaît souvent comme la première réponse au risque de sécheresse mais celle-ci n'est pas la réponse nécessairement la plus souhaitable. En effet, cette mesure de prévention est souvent critiquée par un groupe d'acteurs en faveur de la préservation de la ressource en eau et des espaces naturels. Ainsi, certains acteurs parlent d'« irrigation de résilience » pour qualifier une nouvelle irrigation, qui, à l'échelle de l'exploitation est sous pilotage technique, et plus économe en eau. Ces acteurs affirment cependant que cette solution ne doit pas être élaborée seule pour s'adapter au changement climatique. C'est pourquoi les experts soutiennent que l'adaptation au changement climatique nécessite un panel de solutions, dont l'irrigation en fait partie, mais elle ne peut être seule et d'autres solutions sont possibles comme le changement de pratiques culturelles et de productions végétales cultivées, l'amélioration génétique, etc.

V.4.2 L'adaptation agronomique

Face à l'augmentation des pertes de récoltes, l'adaptation des cultures est devenue un enjeu de l'agriculture française. Cette adaptation s'appuie sur les stratégies individuelles de gestion des risques des agriculteurs. Les solutions sont variées : en premier lieu, la diversification des cultures, qui doit permettre de gérer un assolement dont les périodes de vulnérabilité sont différentes. Il s'agit d'un retour vers une agriculture raisonnable et plus traditionnelle, à l'encontre de la spécialisation en grands bassins de production (comme les cultures de maïs irriguées dans le Sud-Ouest de la France ou des céréales de Beauce). Cependant cet effort de diversification devrait être accompagné d'une prise en compte dans les contrats individuels au niveau de l'assurance pour, en plus, améliorer la couverture d'un risque catastrophique et transverse s'il se produit.

Cette diversification doit intégrer l'implantation de cultures plus résistantes au risque de sécheresse comme le sorgho ainsi que des pratiques culturales adaptées (échelonnage des dates de semis).

Ces méthodes permettent de réduire l'exposition au risque des exploitations agricoles et viennent en complément des systèmes de gestion des risques étudiés dans cette thèse. Les récentes études ont montré que les agriculteurs développant des stratégies de prévention au risque sur leur exploitation agricole sont moins sensibles à la souscription de contrats d'assurance. Or, nos résultats montrent qu'au contraire, la gestion des risques doit être intégrée à tous les niveaux.

V.4.3 L'adaptation agronomique des prairies

Sur les prairies, la diversification est un sujet plus complexe à mettre en œuvre, notamment pour des exploitations d'élevage de montagne. Certains éleveurs décident d'agrandir leur surface de pâturage sans augmenter leur cheptel ce qui permet d'augmenter la production disponible pour nourrir les troupeaux et de constituer des stocks de foin.

D'autres solutions plus techniques sont prometteuses comme l'ensilage de céréales immatures, qui permet de pallier au déficit fourrager les années de sécheresses (Bergen, Byrem, et Grant 1991; Garnsworthy et Stokes 1993) ou l'ensilage du sorgho à la place du maïs grain (Legarto 2000).

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse a pour objectif de caractériser l'impact des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur les productions végétales en intégrant le changement climatique. Ces données économiques prévisionnelles ont pour but d'éclairer les réflexions sur la gestion des risques en agriculture en France métropolitaine. La réalisation de ces objectifs a nécessité trois étapes au préalable :

- Le développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes à partir de données météorologiques. Ce modèle est organisé en trois parties : l'aléa, les pertes de récoltes et le modèle de dommages sur une période historique.
- La projection de ces pertes à horizon 2050 en utilisant le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Elle permet d'analyser la fréquence et l'intensité des sécheresses et excès d'eau extrêmes et leur impact sur les productions végétales.
- Un modèle de descente d'échelle à l'exploitation agricole afin de pouvoir quantifier la répartition des coûts des dommages des événements extrêmes entre les acteurs de la gestion des risques en agriculture.

Cette chaîne de modélisation mise en place permet alors d'analyser l'ensemble du processus du risque : l'analyse de l'aléa, son impact et sa gestion.

Les données disponibles pour réaliser cette étude sur l'agriculture sont les données publiques de rendement et de surface des cultures agricoles à l'échelle du département. Ainsi, cette thèse n'a pas pour vocation d'être appliquée à un portefeuille d'agriculteurs assurés mais de donner des résultats à l'échelle de la France métropolitaine.

Ces travaux de modélisation ont été guidés par des contraintes liées au contexte opérationnel de la thèse mais également par les limites des bases de données utilisées. La demande de CCR a été de développer un outil de modélisation opérationnel, permettant d'évaluer les dommages des aléas climatiques extrêmes sur l'agriculture et, pouvant être décliné sur tout territoire en termes de méthodologie. Cette contrainte a nécessité de développer un modèle statistique de simulation des pertes de récoltes avec le développement d'un indice climatique utilisant peu de variables d'entrées et pouvant donc être facilement calculé sur tout type de territoire. Les choix méthodologiques exposés dans cette thèse ont également été conduits par les limites d'échelle géographique des bases de données sur les rendements agricoles. Cela a nécessité de coupler plusieurs bases de données à différentes échelles afin d'augmenter la robustesse du modèle.

Ces contraintes ont nécessité des raccourcis méthodologiques afin de répondre aux objectifs de la thèse. Les limites mises en évidence dans cette thèse constituent des pistes d'améliorations de la chaîne de modélisation mise en place afin d'augmenter la précision et la pertinence de la simulation des dommages sur les récoltes de ces événements climatiques extrêmes.

Développement d'un modèle d'estimation des pertes de récoltes liées aux événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau

Le choix d'un nouvel indice agro-climatique, le *DOWKI*, a été effectué pour représenter les aléas de sécheresse et d'excès d'eau sur le territoire métropolitain. Cet indice se base sur la représentation du bilan hydrique de la parcelle agricole par le calcul de l'anomalie de bilan hydrique cumulée décadaire. Cet indice représente les aléas de sécheresse et d'excès d'eau et est calculé sur une échelle de 64 km² sur la France métropolitaine.

Le rendement agricole, lui, est une donnée annuelle et résulte donc d'un ensemble de facteurs qui ont eu lieu dans l'année : événements climatiques, événements sanitaires, pratiques culturales des agriculteurs pour la gestion du risque. Ce manque de précisions sur les informations des conduites culturales des agriculteurs (dates de semis, dates de récoltes, irrigation) sur ce rendement annuel départemental peut entraîner de nombreuses incertitudes, en décorrélant les pertes de récoltes de l'aléa. C'est ce qui rend la simulation des pertes de récoltes, à partir uniquement de données climatiques, complexe et a nécessité une réflexion continue sur le calibrage du modèle. Il a donc été mis au point un modèle de dommages basé sur la distribution empirique des pertes de récoltes qui relie les valeurs du *DOWKI* à la moyenne de pertes de récoltes et la fréquence de sinistres. Cette méthodologie a fait l'objet d'un plan d'expérience pour maximiser cette relation dans les valeurs extrêmes de l'indice et des pertes de récoltes pour préserver la pertinence de la simulation des événements extrêmes.

Le modèle construit permet de simuler les pertes de récoltes pour les céréales à paille et les prairies sur les événements extrêmes systémiques sur la France métropolitaine. Ces simulations ont été vérifiées et le modèle est robuste pour la simulation des pertes de récoltes à l'échelle de la France métropolitaine sur les prairies. Pour les céréales à paille, les résultats montrent des erreurs plus importantes, mais qui s'expliquent par une analyse des événements survenus dans l'année et la conduite culturale des agriculteurs. L'intégration de données supplémentaires sur les pratiques de gestion des risques des agriculteurs pourrait réduire la matrice de calibrage sur les localisations où les cultures sont très exposées aux risques climatiques ce qui améliorerait les résultats. Ces perspectives sont donc envisageables dans la poursuite de ces travaux. D'autres informations pourraient également être intégrées dans le modèle comme la nature des sols qui permet de mieux comprendre les phénomènes liés à la disponibilité de l'eau pour le développement des cultures. Par ailleurs, il a également été mis en évidence que d'autres événements climatiques survenus la même année qu'un événement extrême de sécheresse ou d'excès d'eau peuvent impacter les cultures et conduire à une augmentation d'autant plus importante des pertes de récoltes. Ces éléments entraînent des incertitudes sur le modèle et l'intégration d'un modèle multi-péril est une piste d'amélioration pour simuler avec pertinence les pertes de récoltes liées aux événements extrêmes.

Modélisation à horizon 2050 des sécheresses et excès d'eau extrêmes sur les productions végétales

La méthodologie choisie est l'utilisation d'un seul modèle climatique, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France, permettant la simulation à climat constant, c'est-à-dire la répétition de 400 fois l'année 2000 et 400 fois l'année 2050 sous le scénario RCP 8.5 du GIEC. L'analyse d'un très grand nombre d'événements réalistes mais qui ne surviendront pas nécessairement permet d'estimer le niveau de pertes de récoltes qu'ils pourraient engendrer et de mesurer l'intensité de l'aléa.

Cette méthodologie établie permet de répondre à la première problématique de la thèse, à savoir : peut-on prévoir, caractériser et quantifier l'impact des événements extrêmes de sécheresse et d'excès d'eau sur les productions végétales en France métropolitaine aujourd'hui et à horizon 2050 ?

Afin de répondre à cette question les éléments suivants ont été proposés :

- L'analyse des queues de distributions de l'aléa de sécheresse et de l'excès d'eau sur le climat 2000 et le climat 2050 ;
- L'analyse géographique de l'aléa afin de mesurer l'exposition aux risques des différents territoires de la France métropolitaine ;
- L'analyse des queues de distributions des pertes de récoltes des trois cultures étudiées ;
- L'analyse de la temporalité des sécheresses systémiques extrêmes : cycles de sécheresse et date de survenance, en vue d'expliquer les différences d'impact de l'aléa sur les cultures.

L'étude des limites de ce travail a été portée sur deux points :

- L'utilisation d'un seul modèle climatique ;
- La période de référence choisie pour calculer la référence de l'indice *DOWKI*.

Une analyse sur d'autres scénarios du GIEC et/ou l'horizon 2100 pourraient également être des pistes de recherches intéressantes.

Il est important de noter que ces travaux n'intègrent pas, sur le climat 2050, les adaptations possibles de l'agriculture française et aussi, ne donnent qu'un aperçu des dommages potentiels sur l'agriculture toute chose égale par ailleurs. Ainsi, ces travaux peuvent servir de prospective et d'appui technique pour mettre en place des mesures de prévention sur le territoire. L'évaluation des dommages pourrait être ensuite revue en intégrant ces nouvelles stratégies d'adaptation. Il serait en effet souhaitable de pouvoir intégrer dans le modèle l'évolution de la période de vulnérabilité des cultures (décalage des dates de semis par exemple ou de récoltes par raccourcissement du cycle de développement des cultures du fait du changement climatique), l'évolution de techniques de prévention comme l'irrigation ou encore l'évolution des surfaces cultivées (décalage des cultures vers le Nord de la France par exemple). Ces

éléments sont des paramètres du modèle qui sont facilement modifiables et des pistes d'amélioration du modèle peuvent être envisagés pour les prendre en compte en couplant avec d'autres types d'informations.

Application à la gestion des risques en agriculture

L'application à la gestion des risques en agriculture a nécessité de mettre en place une méthodologie de descente d'échelle moyennant les limites des bases de données existantes. Cette méthodologie, couplée au choix d'un prix par culture, et appliquée à des systèmes de gestion des risques, permet de répondre à la deuxième problématique de la thèse, à savoir : comment intégrer les données économiques prévisionnelles dans des scénarios de gestion des risques afin d'éclairer la réflexion nationale sur l'évolution des politiques de gestion des risques en France pour faire face au changement climatique ?

Afin de répondre à cette question, les éléments suivants ont été proposés et discutés :

- L'évolution des pertes économiques nationales par culture des exploitations agricoles ;
- La répartition des pertes des agriculteurs en fonction de différents seuils ;
- Une réflexion sur la répartition du montant des dommages en fonction des différents acteurs de la gestion du risque, dans l'optique de la réforme de la gestion des risques 2022 proposée lors du Varenne de l'eau.

Cette analyse a mis en évidence la nécessité du passage à l'échelle de l'exploitation agricole pour caractériser les risques climatiques : sur les céréales à pailles, ce risque est horizontal, c'est-à-dire que de nombreux agriculteurs sont touchés et les pertes engendrées sont modérées ; sur les prairies, ce risque va devenir horizontal et vertical, c'est-à-dire que de nombreux agriculteurs sont touchés et les pertes deviendront extrêmes sur leurs récoltes. Les résultats mettent en évidence la difficulté de mutualisation du risque sur les événements extrêmes pour les assureurs, qui doivent alors rechercher des stratégies de mutualisation à l'échelle internationale. Pour l'Etat, les résultats posent la question du provisionnement du fonds et mettent en évidence la nécessité de constituer des réserves, lors d'années où les événements sont dits normaux, pour faire aux risques extrêmes futurs. Il est cependant important de noter que ces résultats sont à prendre avec précaution, du fait d'une forte hypothèse sur le paramètre de prix qui peut fortement modifier les résultats. Encore une fois, il s'agit uniquement d'un paramètre du modèle qui peut être facilement modifiable pour des études prospectives.

Les études de gestion des risques doivent être étendues et multipliées à l'échelle du territoire, au moyen de nouvelles technologies, pour permettre un partage de l'information sur la nature du risque et ses conséquences à l'ensemble des acteurs : agriculteurs, assureurs et Etat. Cela permettrait à chaque acteur d'évaluer le montant des dommages à son échelle et de mettre en place des stratégies de gestion du risque adaptées. Cette thèse a permis de développer ce type d'outil et d'accompagner la réflexion sur la gestion des risques en agriculture à grande échelle. L'outil pourrait être utilisé pour des études

prospectives d'évaluation de seuil d'intervention des différents acteurs sur son périmètre mais nécessiterait un élargissement aux autres cultures et aux autres risques climatiques dont les profils sont probablement différents. De nombreux autres outils devront être mis en œuvre sur le territoire, notamment pour évaluer l'exposition au risque extrême climatique sur des échelles plus restreintes pour éclairer les réflexions de la gestion des risques climatiques en France. L'adaptation au changement climatique pour l'agriculture est à rechercher dans son ensemble, et les politiques publiques de gestion des risques doivent intégrer les stratégies individuelles des agriculteurs pour permettre à l'agriculture française d'évoluer dans le bon sens, avec le défi du changement climatique.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdi, Mukhtar Jibril, Nurfarhana Raffar, Zed Zulkafli, Khairudin Nurulhuda, Balqis Mohamed Rehan, Farrah Melissa Muharam, Nor Ain Khosim, et Fredolin Tangang. 2022. « Index-Based Insurance and Hydroclimatic Risk Management in Agriculture: A Systematic Review of Index Selection and Yield-Index Modelling Methods ». *International Journal of Disaster Risk Reduction* 67 (janvier): 102653. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102653>.
- Aillery, Florence, Véronique Antoni, Cécile Aouir, Marc Arnaud, Annie Bonnet, Marion Besancon, Philippe Bonnard, et al. 2018. « Environnement & agriculture - Les chiffres clés – Édition 2018 », 124.
- Alexandrov, Vesselin, Josef Eitzinger, Vesna Cajic, et Michael Oberforster. 2002. « Potential Impact of Climate Change on Selected Agricultural Crops in North-Eastern Austria ». *Global Change Biology* 8 (4): 372-89. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00484.x>.
- Alfieri, L., P. Burek, L. Feyen, et G. Forzieri. 2015. « Global warming increases the frequency of river floods in Europe ». *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (5): 2247-60.
- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, et Martin Smith. 1998. « Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 ». *Fao, Rome* 300 (9): D05109.
- Alley, William M. 1984. « The Palmer Drought Severity Index : limitation and assumptions ». *Journal of climate and applied meteorology* 23: 1100-1109.
- Amigues, J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, et A. Thomas. 2006. « Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru du manque d'eau ». Expertise scientifique collective. Paris: INRA.
- André, G., B. Engel, P. B. M. Berentsen, Th. V. Vellinga, et A. G. J. M. Oude Lansink. 2011. « Quantifying the Effect of Heat Stress on Daily Milk Yield and Monitoring Dynamic Changes Using an Adaptive Dynamic Model ». *Journal of Dairy Science* 94 (9): 4502-13. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4139>.
- Annan, Francis, Jesse Tack, Ardian Harri, et Keith Coble. 2013. « Spatial Pattern of Yield Distributions: Implications for Crop Insurance ». *American Journal of Agricultural Economics* 96 (janvier): 253-68. <https://doi.org/10.1093/ajae/aat085>.
- ARVALIS. 2015. « Agriculture et climat: comment prédire l'imprévisible ». Cahier partenaire ARVALIS 821. Science et Avenir. ARVALIS - Institut du Végétal.
- Asseng, Senthold, Ian Foster, et Neil C. Turner. 2011. « The impact of temperature variability on wheat yields ». *Global Change Biology* 17: 997-1012.
- Asseng, Senthold, et Stephen P. Milroy. 2006. « Simulation of Environmental and Genetic Effects on Grain Protein Concentration in Wheat ». *European Journal of Agronomy* 25 (2): 119-28. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.005>.
- Ayanlade, Ayansina, Maren Radeny, John F. Morton, et Tabitha Muchaba. 2018. « Rainfall variability and drought characteristics in two agro-climatic zones: An assessment of climate change challenges in Africa ». *Science of the Total Environment* 630: 728-37.
- Ayphassorho, Hugues, Nathalie Bertrand, François Mitteault, Charles Pujos, Dominique Rollin, et Michel Sallenave. 2020. « Changement climatique, eau et agriculture : Quelle trajectoire pour 2050 ? » 19056. CGAAER.
- Bagnarosa, Guillaume, Jean Cordier, et Alexandre Gohin. 2021a. « Les crises du revenu agricole et le dilemme du Samaritain ».
- . 2021b. « Les crises des revenus agricoles et le dilemme du Samaritain ». In . Toulouse.
- Baker, R. H. A., C. E. Sansford, C. H. Jarvis, R. J. C. Cannon, A. MacLeod, et K. F. A. Walters. 2000. « The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82 (1-3): 57-71.

- Bale, Jeffery S., Gregory J. Masters, Ian D. Hodkinson, Caroline Awmack, T. Martijn Bezemer, Valerie K. Brown, Jennifer Butterfield, Alan Buse, John C. Coulson, et John Farrar. 2002. « Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores ». *Global change biology* 8 (1): 1-16.
- Banimahd, Seyed Adib, et Davar Khalili. 2013. « Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI, and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones ». *Water Resour Manage* 27 (juin): 3911-28.
- Bartok, Blanka, Adrian-Sorin Telcian, Christian Săcărea, Csaba Horvath, Adina-Eliza Croitoru, et Vlad Stoian. 2021. « Regional Climate Models Validation for Agroclimatology in Romania ». *Atmosphere* 12 (8): 978.
- Baude, M., F. X. Dussud, M. Ecoiffier, J. Duvernoy, et C. Vailles. 2021. « Chiffres clés du climat. France, Europe et monde ». French Ministry of Ecological and Solidarity Transition and I4CE.
- Begue Turon, Jean Loic, Jean Cordier, Sandrine Hallot, Jean Baptiste Plasmans, et David WEILLER. 2016. « Utilisation des marchés à terme par les acteurs commerciaux exposés à la volatilité des marchés de grains et du sucre ». Technical Report. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02068381>.
- Beguiría, Santiago, Sergio M. Vicente-Serrano, Fergus Reig, et Borja Latorre. 2014. « Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring ». *International Journal of Climatology* 34: 3001-23.
- Bell, M. A., R. A. Fischer, D. Byerlee, et K. Sayre. 1995. « Genetic and Agronomic Contributions to Yield Gains: A Case Study for Wheat ». *Field Crops Research* 44 (2): 55-65. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00049-6).
- Bellouin, N., W. J. Collins, I. D. Culverwell, P. R. Halloran, S. C. Hardiman, T. J. Hinton, C. D. Jones, R. E. McDonald, A. J. McLaren, et F. M. O'Connor. 2011. « The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations ». *Geoscientific Model Development* 4 (3): 723-57.
- Ben-Ari, Tamara, Juliette Adrian, Tommy Klein, Pierluigi Calanca, Marijn Van der Velde, et David Makowski. 2016. « Identifying indicators of extreme wheat and maize yield losses ». *Agricultural and Forest Meteorology* 220: 130-40.
- Ben-Ari, Tamara, Julien Boé, Philippe Ciais, Remi Lecerf, Marijn Van der Velde, et David Makowski. 2018. « Causes and Implications of the Unforeseen 2016 Extreme Yield Loss in the Breadbasket of France ». *Nature Communications* 9 (1): 1627. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>.
- Ben-Ari, Tamara, et David Makowski. 2014. « Decomposing global crop yield variability ». *Environmental Research Letters* 9: 10.
- Beniston, Martin, David B. Stephenson, Ole B. Christensen, Christopher AT Ferro, Christoph Frei, Stéphane Goyette, Kirsten Halsnaes, Tom Holt, Kirsti Jylhä, et Brigitte Koffi. 2007. « Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections ». *Climatic change* 81 (1): 71-95.
- Bentsen, M., I. Bethke, J. B. Debernard, T. Iversen, A. Kirkevåg, Ø Seland, H. Drange, et al. 2013. « The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and Basic Evaluation of the Physical Climate ». *Geoscientific Model Development* 6 (3): 687-720. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>.
- Bergen, W. G., T. M. Byrem, et A. L. Grant. 1991. « Ensiling characteristics of whole-crop small grains harvested at milk and dough stages ». *Journal of Animal Science* 69 (4): 1766-74.
- Bindi, M., et Jørgen Olesen. 2010. « The responses of agriculture in Europe to climate change ». *Regional Environmental Change* 11 (mars): 151-58. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>.
- Blank, Steven C., et Jeffrey McDonald. 1995. « Preferences for Crop Insurance When Farmers Are Diversified ». In , 26. Rapid City, South Dakota.
- Blenkinsop, S., et H. J. Fowler. 2007. « Changes in European Drought Characteristics Projected by the PRUDENCE Regional Climate Models ». *International Journal of Climatology* 27 (12): 1595-1610. <https://doi.org/10.1002/joc.1538>.
- Bouche, Régis. 1998. *L'agriculture face aux risques climatiques : Avis du Conseil économique et social sur le rapport présenté par M. Régis Bouche au nom de la section de l'agriculture et de*

- l'alimentation. Mandature 1994-1999. Séance des 24 et 25 novembre 1998.* Avis et rapports du Conseil économique et social. Paris: Ed. des Journaux officiels.
- Boucher, Luc, Lise Duval, Martial Phélippé-Guinvarc'h, et Emmanuel Prudon. 2019. « Évaluation du Programme national de gestion des risques et d'assistance technique et en particulier de l'assurance récolte ». Technical Report MARCHÉ DGPE-2017-085. Decid & Risk. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02481118>.
- Bourdon, Michel. 1994. « Evolution du revenu agricole réel sous la présidence mitterrandienne ». *Économie rurale* 220 (1): 34-39. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1994.4602>.
- Boussard, Jean-Marc. 2010. « Pourquoi l'instabilité est-elle une caractéristique structurelle des marchés agricoles ? » *Économie rurale*, n° 320 (novembre): 69-83. <https://doi.org/10.4000/economierurale.2895>.
- Bouthier, Alain, Jean-Pierre Bonnifet, et Alain Briand. 2004. « Irrigation des céréales : une efficacité comparable sur le blé tendre, blé dur et orge de printemps ». *Perspectives Agricoles*, Perspectives Agricoles, , n° 300.
- Box, George E. P., et Norman R. Draper. 1987. *Empirical model-building and response surfaces*. Empirical model-building and response surfaces. Oxford, England: John Wiley & Sons.
- Boyer, Philippe. 2008. « Assurer les calamités agricoles ? » *Notes et Etudes Economiques*, n° 30 (mars). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03043063>.
- Brisson, Nadine, Philippe Gate, David Gouache, Gilles Charmet, François-Xavier Oury, et Frédéric Huard. 2010. « Why are wheat yields stagnating in Europe ? A comprehensive data analysis for France ». *Field Crops Research* 119: 201-12.
- Brisson, Nadine, et Frédéric Levraut. 2010. *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces*. Angers: ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.
- Bureau, Jean-Christophe, et Sophie Thoyer. 2014. *La politique agricole commune*. La Découverte. Repères 410293. Paris.
- Caillaud, D, et S Tournier. 2007. « Les systèmes laitiers du Nord-Est confrontés à la sécheresse de 2003. Données du dispositif de fermes laitières des Réseaux d'Elevage ». In .
- Caisse Centrale de Réassurance. 2015. « Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles ». Paris, France: Caisse Centrale de Réassurance. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/etude-climat-decembre-2015>.
- Calderini, D., et G. Slafer. 1998. « CHANGES IN YIELD AND YIELD STABILITY IN WHEAT DURING THE 20TH CENTURY ». [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00080-X).
- Calvet, J.-C., A.-L. Gibelin, J.-L. Roujean, E. Martin, P. Le Moigne, H. Douville, et J. Noilhan. 2008. « Past and Future Scenarios of the Effect of Carbon Dioxide on Plant Growth and Transpiration for Three Vegetation Types of Southwestern France ». *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (2): 397-406. <https://doi.org/10.5194/acp-8-397-2008>.
- Cammell, M. E., et J. D. Knight. 1992. « Effects of climatic change on the population dynamics of crop pests ». In *Advances in Ecological Research*, 22:117-62. Elsevier.
- Cannell, M. G. R., et J. H. M. Thornley. 1998. « N-poor ecosystems may respond more to elevated [CO₂] than N-rich ones in the long term. A model analysis of grassland. » *Global Change Biology* 4 (4): 431-42.
- Casley, Dennis J., et Krishna Kumar. 1988. *The collection, analysis and use of monitoring and evaluation data*. The World Bank.
- CCR. 2018. « Note de Synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisques climatique pour l'exercice 2017 par CCR pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ».
- . 2019a. « Note de Synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisques climatique pour l'exercice 2016 par CCR pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ».
- . 2019b. « Note de Synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisques climatique pour l'exercice 2018 par CCR pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ».
- . 2020. « Note de synthèse sur le suivi de l'aide à l'assurance multirisques climatique pour l'exercice 2019 par CCR pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ».
- Ceglar, Andrej, Andrea Toreti, Rémi Lecerf, Marijn Van der Velde, et Frank Dentener. 2016. « Impact of Meteorological Drivers on Regional Inter-Annual Crop Yield Variability in France ».

- CGAAER. 2017. « Outils de gestion des risques en agriculture ». <https://agriculture.gouv.fr/outils-de-gestion-des-risques-en-agriculture>.
- Challinor, A.J., J. Watson, David B. Lobell, S.M. Howden, D.R. Smith, et N. Chhetri. 2014. « A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation ». *Nature Climate Change* 4: 287-91.
- Challinor, Andrew, et T.R. Wheeler. 2008. « Crop Yield Reduction in the Tropics Under Climate Change: Processes and Uncertainties ». *Agricultural and Forest Meteorology* 148 (mars): 343-56. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.015>.
- « Chapitre Ier : Dispositions générales (Articles L361-1 à L361-8) - Légifrance ». s. d. Consulté le 18 octobre 2021. <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000022665182/2010-07-29>.
- Charef, Jean, Nadine Ballot, Jennifer Huet, et Madrid. 2022. « Climalait un programme de la filière laitière pour l'adaptation des élevages laitiers face au changement climatique ». In *La prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, La Documentation Française, 251-71. Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement. Paris.
- Chauveau, Mathilde, Sébastien Chazot, Charles Perrin, Pierre-Yves Bourgin, Eric Sauquet, Jean-Philippe Vidal, Nathalie Rouchy, Eric Martin, Julian David, et Thomas Norotte. 2013. « Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070? » *La Houille Blanche*, n° 4: 5-15.
- Chavas, Jean-Paul. 2004. *Risk analysis in theory and practice*. Elsevier.
- Chloupek, Oldřich, P. Hrstkova, et Peter Schweigert. 2004. « Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries ». *Field Crops Research* 85 (2-3): 167-90.
- Ciais, Ph, M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogée, V. Allard, M. Aubinet, et al. 2005. « Europe-Wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought in 2003 ». *Nature* 437 (7058): 529-33. <https://doi.org/10.1038/nature03972>.
- Claassen, Roger, et Richard E. Just. 2011. « Heterogeneity and Distributional Form of Farm-Level Yields ». *American Journal of Agricultural Economics* 93 (1): 144-60. <https://doi.org/10.1093/ajae/aaq111>.
- Collins, Matthew, Reto Knutti, Julie Arblaster, Jean-Louis Dufresne, Thierry Fichefet, Pierre Friedlingstein, Xuejie Gao, William J. Gutowski, Tim Johns, et Gerhard Krinner. 2013. « Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility ». In *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1029-1136. Cambridge University Press.
- COPA COGECA. 2003. « Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry ». Technical report. Brussels: Committee of Agricultural Organisations in the European Union and General Committee for Agricultural cooperation in the European Union.
- Cordier, Cécile, Manon Saille, Jean-Yves Courtonne, Boris Duflot, François Cadudal, Christophe Perrot, Aude Brion, et René Baumont. 2020. « Quantifier les matières premières utilisées par l'alimentation animale en France et segmenter les flux jusqu'aux filières consommatrices ». In *3R 2020 - 25e édition Congrès international francophone sur les Rencontres Recherches Ruminants*, 1-5. Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03128009>.
- Cordier, Jean. 2001. « Assurance, marchés financiers et politique publique ». *Économie rurale* 266 (1): 109-18. <https://doi.org/10.3406/ecoru.2001.5281>.
- . 2008. « Etude des risques de marché agricole en France: modélisation et organisation des instruments de gestion », 104. <https://hal.inrae.fr/hal-02821018>.
- . 2013. « Les fondamentaux des marchés de matières premières agricoles, la volatilité des prix et le besoin de régulation ». In . Paris.
- Cordier, Jean, Antoine Erhel, Alain Pindard, et Frédéric Courleux. 2008. « La gestion des risques en agriculture de la théorie à la mise en oeuvre: éléments de réflexion pour l'action publique », 40.
- Dankers, Rutger, et Luc Feyen. 2008. « Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (D19).

- . 2009. « Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114 (D16).
- Day, Richard H. 1965. « Probability Distributions of Field Crop Yields ». *American Journal of Agricultural Economics* 47 (3): 713-41. <https://doi.org/10.2307/1236284>.
- Dayon, Gildas, Julien Boe, Eric Martin, et Joël Gailhard. 2018. « Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties ». *Comptes Rendus Geoscience* 350 (4): 141-53.
- Deaton, Angus, et Guy Laroque. 1990. « On The Behavior of Commodity Prices ». 3439. *NBER Working Papers*. NBER Working Papers. National Bureau of Economic Research, Inc. <https://ideas.repec.org/p/nbr/nberwo/3439.html>.
- Deque, M. 2007. « Frequency of Precipitation and Temperature Extremes over France in an Anthropogenic Scenario: Model Results and Statistical Correction According to Observed Values ». *Global and Planetary Change* 57 (1-2): 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030>.
- Déqué, Michel, Christine Drevet, Alain Braun, et Daniel Cariolle. 1994. « The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling ». *Climate Dynamics* 10 (4): 249-66.
- Deryugina, Tatyana, et Barrett Kirwan. s. d. « Does The Samaritan's Dilemma Matter? Evidence From U.S. Agriculture », 60.
- Descrozaille, Frédéric. 2021. « Rapport sur la gestion des risques en agriculture présenté par M. Frédéric Descrozaille, député de la 1ere circonscription du Val-de-Marne ». Rapport au Ministre. Assemblée Nationale.
- Desplat, Christian. 1996. « Pour une histoire des risques naturels dans les Pyrénées occidentales françaises sous l'ancien régime ». *BENNASSAR B., Les catastrophes naturelles dans l'Europe médiévale et moderne*, 115-64.
- Diepen, C.A., J. Wolf, H. Keulen, et C. Rappoldt. 1989. « WOFOST: A Simulation Model of Crop Production ». *Soil Use and Management* 5 (1): 16-24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>.
- Dikmen, S., et P. J. Hansen. 2009. « Is the Temperature-Humidity Index the Best Indicator of Heat Stress in Lactating Dairy Cows in a Subtropical Environment? ». *Journal of Dairy Science* 92 (1): 109-16. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1370>.
- Donohue, R., T. McVicar, et M. Roderick. 2010. « Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate ». *Journal of Hydrology* 386: 186-97.
- Doraiswamy, Paul C., et Paul W. Cook. 1995. « Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data ». *Canadian Journal of Remote Sensing* 21 (1): 43-51.
- Doraiswamy, Paul C., Sophie Moulin, Paul W. Cook, et Alan Stern. 2003. « Crop yield assessment from remote sensing ». *Photogrammetric engineering & remote sensing* 69 (6): 665-74.
- Downing, T. E., E. M. Barrow, R. J. Brooks, R. E. Butterfield, T. R. Carter, P. A. Harisson, M. Hulme, J. E. Oleson, J. R. Porter, et J. Schellberg. 2000. « Quantification of uncertainty in climate change impact assessment ».
- Drake, Bert G., Miquel A. González-Meler, et Steve P. Long. 1997. « More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO2? ». *Annual review of plant biology* 48 (1): 609-39.
- Ducoudré, Nathalie I., Katia Laval, et Alain Perrier. 1993. « SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model ». *Journal of Climate* 6 (2): 248-73.
- Durand, Jean-Louis. 2007. « Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques ». *Fourrages* 190: 181.
- Durand, Y., M. Latenser, Gérald Giraud, P. Etchevers, L. Lesaffre, et Laurent Mérindol. 2009. « Reanalysis of 44 year of climate in the French alps 1958-2002): Methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation ». *J. Appl. Meteorol. Clim.* 48 (janvier): 29-449.
- Elliott, Joshua, Delphine Deryng, Christoph Müller, Katja Frieler, Markus Konzmann, Dieter Gerten, Michael Glotter, Martina Flörke, Yoshihide Wada, et Neil Best. 2014. « Constraints and

- potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (9): 3239-44.
- Enjolras, Geoffroy, Fabian Capitanio, et Felice Adinolfi, éd. 2012. « The Demand for Crop Insurance: Combined Approaches for France and Italy ». *Agricultural Economics Review*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.253490>.
- Enjolras, Geoffroy, et Patrick Sentis. 2011. « Crop insurance policies and purchases in France ». *Agricultural Economics* 42 (juillet): 475-86. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00535.x>.
- European Commission. Joint Research Centre. 2020. *Global Warming and Drought Impacts in the EU: JRC PESETA IV Project: Task 7*. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/597045>.
- FAO. 2021. *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb3673en>.
- Featherstone, Allen, et Terry L. Kastens. 2000. « Non-Parametric and Semi-Parametric Techniques for Modeling and Simulating Correlated, Non-Normal Price and Yield Distributions: Applications to Risk Analysis in Kansas Agriculture ». *Journal of Agricultural and Applied Economics* 32 (2): 267-81.
- Featherstone, Allen M., Ghassan A. Moghnieh, et Barry K. Goodwin. 1995. « Farm-Level Nonparametric Analysis of Cost-Minimization and Profit-Maximization Behavior ». *Agricultural Economics* 13 (2): 109-17. [https://doi.org/10.1016/0169-5150\(95\)01154-4](https://doi.org/10.1016/0169-5150(95)01154-4).
- Femenia, Fabienne. 2010. « Politique Agricole Commune et Stabilisation des Revenus et Marchés Agricoles Européens ». UMR SMART-LERECO.
- Femenia, Fabienne, et Alexandre Gohin. 2010. « Faut-il une intervention publique pour stabiliser les marchés agricoles ? Revue des questions non résolues ». *Revue d'études en Agriculture et Environnement* 91 (4): 435-56. <https://doi.org/10.3406/reae.2010.1996>.
- Fermont, Anneke, et Todd Benson. 2011. « Estimating yield of food crops grown by smallholder farmers ». *International Food Policy Research Institute, Washington DC* 1: 68.
- Finger, Robert. 2008. « Impacts of Agricultural Policy Reforms on Crop Yields ». *EuroChoices* 7 (3): 24-25. <https://doi.org/10.1111/j.1746-692X.2008.00107.x>.
- . 2010. « Evidence of slowing yield growth—the example of Swiss cereal yields ». *Food Policy* 35 (2): 175-82.
- Fitzgerald, Glenn J., Michael Tausz, Garry O'Leary, Mahabubur R. Mollah, Sabine Tausz-Posch, Saman Seneweera, Ivan Mock, Markus Löw, Debra L. Partington, et David McNeil. 2016. « Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves ». *Global change biology* 22 (6): 2269-84.
- Flato, Gregory M. 2011. « Earth system models: an overview ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (6): 783-800.
- Forzieri, Giovanni, Luc Feyen, Simone Russo, Michalis Vourdoukas, Lorenzo Alfieri, Stephen Outten, Mirco Migliavacca, Alessandra Bianchi, Rodrigo Rojas, et Alba Cid. 2016. « Multi-Hazard Assessment in Europe under Climate Change ». *Climatic Change* 137 (1-2): 105-19. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>.
- Fraga, Helder, Joaquim G. Pinto, et João A. Santos. 2019. « Climate change projections for chilling and heat forcing conditions in European vineyards and olive orchards: a multi-model assessment ». *Climatic Change* 152 (1): 179-93.
- FranceAgriMer. 2019. « Rapport au Parlement 2019- Observatoire de la formation des prix et des marges de produits alimentaires ».
- Friedl, M. A., D. S. Schimel, J. Michaelsen, F. W. Davis, et H. Walker. 1994. « Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data ». *International Journal of Remote Sensing* 15 (7): 1401-20.
- Fu, B.P. 1981. « On the calculation of the evaporation from and surface (in Chinese) ». *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 5: 23-31.
- Fuhrer, Jürg. 2003. « Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97 (1-3): 1-20.
- Gabuthy, Yannick, Nicolas Jacquemet, et Olivier L'Haridon. 2021. *Economie comportementale des politiques publiques*. La Découverte. Repères 104071. Paris.

- Gallagher, Paul. 1987. « U.S. Soybean Yields: Estimation and Forecasting with Nonsymmetric Disturbances ». *American Journal of Agricultural Economics* 69 (4): 796-803. <https://doi.org/10.2307/1242190>.
- Gao, Shuai, Zheng Niu, Ni Huang, et Xuehui Hou. 2013. « Estimating the Leaf Area Index, height and biomass of maize using HJ-1 and RADARSAT-2 ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 24: 1-8.
- Garnsworthy, P. C., et D. T. Stokes. 1993. « The nutritive value of wheat and oat silages ensiled on three cutting dates ». *The Journal of Agricultural Science* 121 (2): 233-40.
- Gate, Philippe. 1995. *Ecophysiologie du blé*. Paris: Tec & Doc Lavoisier.
- . 2007. « Le blé face au changement climatique ». *Perspectives Agricoles* 336 (janvier): 20-56.
- Gate, Philippe, Anne Blondlot, David Gouache, Olivier Deudon, et Laurent Vignier. 2008. « Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France: Quelles solutions et quelles actions à développer ? » *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 15 (5): 332-36. <https://doi.org/10.1051/ocl.2008.0221>.
- Gautier, Xavier. 2016. « Récoltes des blés 2016 - Une année complètement atypique », septembre, 11.
- Gijsman, A. J., S. S. Jagtap, et J. W. Jones. 2002. « Wading through a Swamp of Complete Confusion: How to Choose a Method for Estimating Soil Water Retention Parameters for Crop Models ». *European Journal of Agronomy, Process Simulation and Application of Cropping System Models*, 18 (1): 77-106. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00098-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00098-9).
- Goodwin, Barry K., et Alan P. Ker. 1998. « Nonparametric Estimation of Crop Yield Distributions: Implications for Rating Group-Risk Crop Insurance Contracts ». *American Journal of Agricultural Economics* 80 (1): 139-53. <https://doi.org/10.2307/3180276>.
- Gouache, David, Anne-Sophie Bouchon, Elodie Jouanneau, et Xavier Le Bris. 2015. « Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France ». *Agricultural and Forest Meteorology* 209-210: 1-10.
- Grassini, Patricio, Kent M. Eskridge, et Kenneth G. Cassman. 2013. « Distinguishing between Yield Advances and Yield Plateaus in Historical Crop Production Trends ». *Nature Communications* 4 (1): 2918. <https://doi.org/10.1038/ncomms3918>.
- Groten, S. M. E. 1993. « NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso ». *Title REMOTE SENSING* 14 (8): 1495-1515.
- Gutjahr, Oliver, Dian Putrasahan, Katja Lohmann, Johann H. Jungclauss, Jin-Song von Storch, Nils Brüggemann, Helmuth Haak, et Achim Stössel. 2018. « Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) ». Preprint. Climate and Earth System Modeling. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-286>.
- Guttman, Nathaniel B. 1998. « Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34 (1): 113-21.
- Hamon, Georges-Marie. 1930. « Origines et statistique de l'assurance contre la grêle ». *Journal de la société française de statistique* 71: 323-34.
- Hardaker, J., R.B.M. Huirne, Jock Anderson, et Gudbrand Lien. 2004. *Coping With Risk in Agriculture*. <https://doi.org/10.1079/9780851998312.0000>.
- Hardelin, Julien. 2010. « Alternative instruments for covering climatic risks in agriculture: an opportunity for developing countries? » *Mondes en développement* 151 (3): 25-34.
- Harri, Ardian, Keith H. Coble, Alan P. Ker, Barry, et J. Goodwin. 2011. « Relaxing Heteroscedasticity Assumptions in Area-Yield Crop Insurance Rating ». *American Journal of Agricultural Economics*, 707-17.
- Harsányi, Endre, Bashar Bashir, Firas Alsilibe, Karam Alsafadi, Abdullah Alsalman, Adrienn Széles, István Bácskai, Csaba Juhász, Tamás Ratonyi, et Safwan Mohammed. 2021. « Impact of agricultural drought on sunflower production across Hungary ». *Atmosphere* 12 (10): 1339.
- Haushalter, G. David. 2000. « Financing Policy, Basis Risk, and Corporate Hedging: Evidence from Oil and Gas Producers ». *Journal of Finance*, 107-52.
- Hawkins, Ed, Thomas E. Fricker, Andrew J. Challinor, Christopher A. T. Ferro, Chun Kit Ho, et Tom M. Osborne. 2013. « Increasing Influence of Heat Stress on French Maize Yields from the 1960s to the 2030s ». *Global Change Biology* 19 (3): 937-47. <https://doi.org/10.1111/gcb.12069>.
- Henry, Yves, et Jacques De Buyser. 2000. « L'origine des blés ». *Série* 26: 60-62.

- Holden, N. M., et A. J. Brereton. 2002. « An assessment of the potential impact of climate change on grass yield in Ireland over the next 100 years ». *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 213-26.
- Hoogenboom, Gerrit. 2000. « Contribution of Agrometeorology to the Simulation of Crop Production and Its Applications ». *Agricultural and Forest Meteorology* 103 (1-2): 137-57. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00108-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00108-8).
- Hunt, Eric D., Mark Svoboda, Brian Wardlaw, Kenneth Hubbard, Michael Hayes, et Tim Arkebauer. 2014. « Monitoring the Effects of Rapid Onset of Drought on Non-Irrigated Maize with Agronomic Data and Climate-Based Drought Indices ». *Agricultural and Forest Meteorology* 191 (juin): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.001>.
- Iglesias, Ana, Luis Garrote, Sonia Quiroga, et Marta Moneo. 2012. « A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe ». *Climatic change* 112 (1): 29-46.
- Iizumi, Toshichika, et Navin Ramankutty. 2016. « Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change ». *Environmental Research Letters* 11: 1-11.
- Innes, Robert. 2003. « Crop Insurance in a Political Economy: An Alternative Perspective on Agricultural Policy ». *American Journal of Agricultural Economics* 85 (2): 318-35. <https://doi.org/10.1111/1467-8276.00122>.
- IPCC. 2007. « Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. » Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New-York, NY, USA.
- . 2012. « Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation ». A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New-York, NY, USA.
- . 2013. « Climate Change 2013 : The physical science basis ». Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New-York, NY, USA. doi:017/CBO9781107415324.
- . 2014. « Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. » Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- . 2019. « Special Report on Climate Change and Land ». 2019. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- . 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 ». Cambridge University Press.
- . 2022. « Climate Change 2022 : impacts, adaptation and vulnerability ». Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New-York, NY, USA.
- Iversen, T., M. Bentsen, I. Bethke, J. B. Debernard, A. Kirkevåg, Ø Seland, H. Drange, et al. 2013. « The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate Response and Scenario Projections ». *Geoscientific Model Development* 6 (2): 389-415. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-389-2013>.
- Jacob, Daniela, Juliane Petersen, Bastian Eggert, Antoinette Alias, Ole Bøssing Christensen, Laurens M. Bouwer, Alain Braun, et al. 2014. « EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research ». *Regional Environmental Change* 14 (2): 563-78. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Jacob, Daniela, Claas Teichmann, Stefan Sobolowski, Eleni Katragkou, Ivonne Anders, Michal Belda, Rasmus Benestad, Fredrik Boberg, Erasmo Buonomo, et Rita M. Cardoso. 2020. « Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community ». *Regional Environmental Change* 20 (2): 1-20.
- Jakubauskas, Mark, David Legates, et Jude Kastens. 2002. « Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data ». *Computers and Electronics in Agriculture* 37 (décembre): 127-39. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00116-3).
- Jamieson, P. D., I. R. Brooking, J. R. Porter, et D. R. Wilson. 1995. « Prediction of Leaf Appearance in Wheat: A Question of Temperature ». *Field Crops Research* 41 (1): 35-44. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00102-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00102-I).
- Jones, C. Allan, J. R. Kiniry, et P. T. Dyke. 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. College Station: Texas A & M University Press.

- Jones, J. W., G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, L. A. Hunt, P. K. Thornton, P. W. Wilkens, D. T. Imamura, W. T. Bowen, et U. Singh. 1998. « Decision Support System for Agrotechnology Transfer: DSSAT V3 ». In *Understanding Options for Agricultural Production*, édité par Gordon Y. Tsuji, Gerrit Hoogenboom, et Philip K. Thornton, 157-77. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8.
- Jones, J.W, G Hoogenboom, C.H Porter, K.J Boote, W.D Batchelor, L.A Hunt, P.W Wilkens, U Singh, A.J Gijssman, et J.T Ritchie. 2003. « The DSSAT Cropping System Model ». *European Journal of Agronomy* 18 (3-4): 235-65. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7).
- Jones, Michael B., Marjan Jongen, et Theresa Doyle. 1996. « Effects of elevated carbon dioxide concentrations on agricultural grassland production ». *Agricultural and Forest Meteorology* 79 (4): 243-52.
- Jones, Peter G, et Philip K Thornton. 2003. « The Potential Impacts of Climate Change on Maize Production in Africa and Latin America in 2055 ». *Global Environmental Change* 13 (1): 51-59. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0).
- Just, Richard E., et Rulon D. Pope. 1999. « Implications of Heterogeneity for Theory and Practice in Production Economics ». *American Journal of Agricultural Economics* 81 (3): 711-18. <https://doi.org/10.2307/1244039>.
- Kapsambelis, Dorothée. 2018. « Analyse des pertes de récoltes à l'échelle de l'exploitation agricole dans le cadre de l'assurance multirisques climatique en France métropolitaine », 78.
- Kapsambelis, Dorothée, Stéphane Busson, Roxane Marchal, et David Moncoulon. 2021. « Traitement des données pour l'assurance multirisques climatique en agriculture ». In *Rapport Scientifique CCR 2021*, 84-87. Paris, France.
- Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, et Jean Cordier. 2019a. « Modéliser les pertes agricoles à horizon 2050 ». In *Rapport Scientifique CCR 2019*, 47-50. Paris, France.
- . 2019b. « An Innovative Damage Model for Crop Insurance, Combining Two Hazards into a Single Climatic Index ». *Climate* (7) (11): 125. <https://doi.org/10.3390/cli7110125>.
- . 2021. « Modélisation de l'impact des sécheresses et excès d'eau sur les productions végétales à horizon 2050 ». In *Rapport Scientifique CCR 2021*, 62-66. Paris, France.
- Kapsambelis, Dorothée, David Moncoulon, Martine Veysseire, Jean-Michel Soubeyroux, et Jean Cordier. 2022. « Modeling the Impact of Extreme Droughts on Agriculture under Current and Future Climate Conditions Using a Spatialized Climatic Index ». *Applied Sciences* 12 (5): 2481. <https://doi.org/10.3390/app12052481>.
- Karl, Thomas R. 1983. « Some spatial characteristics of drought duration in the United States ». *Journal of climate and applied meteorology* 22: 1356-66.
- . 1986. « The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including Potential Evapotranspiration ». *Journal of climate and applied meteorology* 25: 77-86.
- Ker, Alan P., et Barry K. Goodwin. 2000. « Nonparametric Estimation of Crop Insurance Rates Revisited ». *American Journal of Agricultural Economics* 82 (2): 463-78.
- Klatzmann, Joseph. 1959. « L'évolution des revenus agricoles ». *Economie et Statistique* 14 (12): 1067-76. <https://doi.org/10.3406/estat.1959.9189>.
- Knight, Franck. 1921. « Risk, uncertainty and profit ». *кнуса*.
- Koenig, R., M. Brunette, P. Delacote, et C. Tevenart. 2019. « Couverture du risque météorologique en agriculture : les leçons du cas français ». Chaire Economie du Climat.
- Krinner, G., Nicolas Viovy, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Jérôme Ogée, Jan Polcher, Pierre Friedlingstein, Philippe Ciais, Stephen Sitch, et I. Colin Prentice. 2005. « A Dynamic Global Vegetation Model for Studies of the Coupled Atmosphere-Biosphere System ». *Global Biogeochemical Cycles* 19 (1). <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.
- Laanaia, Nabil, Dominique Carrer, Jean-Christophe Calvet, et Christian Pagé. 2016. « How Will Climate Change Affect the Vegetation Cycle over France? A Generic Modeling Approach ». *Climate Risk Management* 13 (janvier): 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2016.06.001>.
- Laroche-Dupraz, Catherine, et Aude Ridier. 2021. « Le revenu agricole: une multiplicité d'enjeux, de définitions et d'usages ». *Economie Rurale*, n° 378: 19-36.

- Le Bourhis-Le Duigou, Gwénaëlle. 2022. « Une variété de démarches prospectives pour s'adapter au changement climatique : illustrations dans les Pays de la Loire ». In *La prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, La Documentation Française, 38-50. Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement. Paris.
- Le Moigne, Patrick. 2002. « Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN ». *Note de centre GMME, Météo-France*, 1-30.
- Legarto, J. 2000. « L'utilisation en ensilage plante entière des sorghos grains et sucriers: intérêts et limites pour les régions sèches ». *Fourrages (Versailles)*, n° 163: 323-38.
- Lemaire, Gilles, et André Pflimlin. 2007. « Les sécheresses passées et à venir: quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers? », 19.
- Lengrand, Amélie. 2017. « La modélisation pour diagnostiquer les facteurs limitants la production des céréales en région Haut-de-France », 16.
- Létard, Valérie, Hilaire Flandre, et Serge Lepeltier. 2004. « La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise ». Rapport d'information au Sénat 195. <https://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-19510.html>.
- Li, X., et T. J. Troy. 2018. « Changes in rainfed and irrigated crop yield response to climate in the western US ». *Environmental Research Letters* 13 (6): 064031.
- Lin, M., et P. Huybers. 2012. « Reckoning Wheat Yield Trends ». *Environmental Research Letters* 7 (2): 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024016>.
- Liu, Xianfeng, Xiufang Zhu, Yaozhong Pan, Shuangshuang Li, Yanxu Liu, et Yuqi Ma. 2016. « Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects ». *Journal of Geographical Sciences* 26 (juin): 750-67. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>.
- Lobell, David B., Graeme L. Hammer, Greg McLean, Carlos Messina, Michael J. Roberts, et Wolfram Schlenker. 2013. « The critical role of extreme heat for maize production in the United States ». *Nature Climate Change Letters* 182: 1-12.
- Long, Stephen P, Elizabeth A Ainsworth, et Andrew D B Leakey. 2006. « Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO2 Concentrations » 312: 4.
- Lorgeou, Josiane, Francis Piraux, Antoine Picard, et Valérie Noël. 2012. « Les grands contextes de production du blé tendre caractérisés par leur stress - ARVALIS- Institut du Végétal ». *Perspectives Agricoles*, n° 389.
- Loubier, Sébastien, Myriam Campardon, et Sylvie Morardet. 2013. « L'irrigation diminue-t-elle en France ? Premiers enseignements du recensement agricole de 2010 ». *Sciences Eaux Territoires* Numéro 11 (2): 12-19.
- Marti, Olivier, Pascale Braconnot, Jacques Bellier, Rachid Benshila, Sandrine Bony, Patrick Brockmann, Patricia Cadule, et al. 2006. « The new IPSL climate system model: IPSL-CM4 ». Other Notes scientifiques du Pôle de modélisation du climat. 26. IPSL. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03319443>.
- Masle-Meynard, J. 1980. « L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière ». Paris: Institut National Agronomique Paris Grignon.
- . 1981. « Relations entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition ». *Agronomie* 1 (5): 365-74.
- Mathieu, Jordane A., et Filipe Aires. 2018. « Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting ». *Agricultural and Forest Meteorology* 253-254: 15-30.
- McKee, T.B., N.J. Doesken, et J. Kleist. 1993. « The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology ». In , 179-84. Boston: American Meteorological Society.
- Meisser, Marco, Claire Deléglise, Eric Mosimann, Constant Signarbieux, Robert Mills, Patrick Shlegel, Alexandre Buttler, et Bernard Jeangros. 2013. « Effets d'une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura ». *Recherche Agronomique Suisse* 4 (janvier): 476-83.
- Meng, Lei, et Steven M. Quiring. 2008. « A Comparison of Soil Moisture Models Using Soil Climate Analysis Network Observations ». *Journal of Hydrometeorology* 9 (4): 641-59. <https://doi.org/10.1175/2008JHM916.1>.

- Mesbahzadeh, Tayyebeh, Maryam Mirakbari, Mohsen Mohseni Saravi, Farshad Soleimani Sardoo, et Mario M. Miglietta. 2020. « Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP) ». *Meteorological Applications* 27 (1): e1856.
- Michel, Lucie, et David Makowski. 2013. « Comparison of Statistical Models for Analyzing Wheat Yield Time Series ». *PLOS ONE* 8 (10): e78615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078615>.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale de la Prévention des Risques. 2017. « Rapport 2015-2017 du délégué aux risques majeurs ».
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Ministère de l'Economie et des Finances. 2016. « Cahier des charges applicable aux entreprises d'assurance pour la prise en charge partielle de primes et cotisations d'assurance récolte 2016. Pris en application des articles 1, 2 et 10 du décret fixant pour les années 2016-2020 les modalités d'application de l'article L. 361-4 du code rural et de la pêche maritime en vue de favoriser le développement de l'assurance contre certains risques agricoles. » Paris.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2003. « Conjoncture Agreste 2003 ».
- . 2006. « Agreste Centre Conjoncture », n° 1: 4.
- . 2010. « Pratiques Agricoles ». *AGRESTE- Les Dossiers*, Pratiques Agricoles, , n° 8.
- . 2012. « Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000 ». *Agreste Primeur* 292.
- . 2014. « Pratiques Agricoles - Pratiques Culturelles 2011 ». *AGRESTE- Les Dossiers* 21.
- . 2017a. « Cahier des charges de l'appellation d'origine "Comté" ». *Bulletin officiel du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation* 2017-39. MAA.
- . 2017b. « Cahier des charges de l'appellation d'origine "Roquefort" ». *Bulletin officiel du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation* 2017-39. MAA.
- . 2018a. « Bilan Conjoncturel 2018 ». 5. *Agreste Panorama*.
- . 2018b. « Mémento de la Statistique Agricole 2018 ».
- . 2021. « Une production viticole 2021 estimée, au 1er septembre, à 33,3 millions d'hectolitres ». *Conjoncture AGRESTE* 2021-114. *Conjoncture AGRESTE*.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. 2012. « Explore 70 : Hydrologie de surface. Rapport de synthèse ».
- Mokhtar, Ali, Hongming He, Karam Alsafadi, Safwan Mohammed, Olusola Ayantobo, Ahmed Elbeltagi, Ossama Abdelwahab, et al. 2021. « Assessment of the effects of Spatiotemporal Characteristics of Drought on Crop Yields in Southwest China ». *International Journal of Climatology*, octobre. <https://doi.org/10.1002/joc.7407>.
- Mollier, Pascale, et P. Carrère. 2019. « Sécheresse : focus sur les prairies permanentes ». INRAE Institutionnel. 2019. <https://www.inrae.fr/actualites/secheresse-focus-prairies-permanentes>.
- Moncoulon, David, Jérémy Desarthe, Jean-Philippe Naulin, Thomas Onfroy, Pierre Tinard, Zi-Xiang Wang, Chadi Hajji, Martine Veysseire, Michel Dequé, et Fabienne Régimbeau. 2018. « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à l'horizon 2050 ». Paris: Caisse Centrale de Réassurance & Météo France. <https://www.ccr.fr/documents/35794/35836/Etude+Climatique+2018+version+complete.pdf/6a7b6120-7050-ff2e-4aa9-89e80c1e30f2?t=1536662736000>.
- Moncoulon, David, et Dorothee Kapsambelis. 2021. « Gestion des risques en agriculture : répondre au défi du changement climatique ». *Risques* 126 (juin).
- Monteil, Amans-Alexis. 1877. *Histoire agricole de la France : l'agriculture, les cultivateurs et la vie rurale*. 18. Paris, France: P.Dupont.
- Moore, Frances C., et David B. Lobell. 2015. « The Fingerprint of Climate Trends on European Crop Yields ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (9): 2670-75. <https://doi.org/10.1073/pnas.1409606112>.
- Moriondo, M., F. Maselli, et M. Bindi. 2007. « A Simple Model of Regional Wheat Yield Based on NDVI Data ». *European Journal of Agronomy* 26 (3): 266-74. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.007>.
- Nance, Deana R., Clifford W. Smith Jr., et Charles W. Smithson. 1993. « On the Determinants of Corporate Hedging ». *The Journal of Finance* 48 (1): 267-84. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1993.tb04709.x>.
- Neilson, R., et B. Boag. 1996. « The predicted impact of possible climatic change on virus-vector nematodes in Great Britain ». *European Journal of Plant Pathology* 102 (2): 193-99.

- Ngo-Duc, T., K. Laval, G. Ramillien, J. Polcher, et A. Cazenave. 2007. « Validation of the land water storage simulated by Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) with Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data ». *Water Resources Research* 43 (4).
- OCDE. 2009. *Gestion des risques en agriculture : une approche holistique*. OECD.
- . 2012. *Gestion des risques en agriculture: Évaluation et conception des politiques*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264174795-fr>.
- Olesen, J. E., et Marco Bindi. 2002. « Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy ». *European journal of agronomy* 16 (4): 239-62.
- Olesen, J. E., P. K Bøcher, et T Jensen. 2000. « Comparison of Scales of Climate and Soil Data for Aggregating Simulated Yields of Winter Wheat in Denmark ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82 (1): 213-28. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00227-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00227-9).
- Olesen, J.E., M. Trnka, K.C. Kersebaum, A.O. Skjelvag, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, F. Rossi, J. Kozyra, et F. Micale. 2011. « Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change ». *European Journal of Agronomy* 34: 96-112.
- Oliosio, Albert, Frederic Huard, et Lydie Guillioni. 2010. « Prise en compte des effets du CO2 sur le calcul de l'évapotranspiration de référence ». In *Climator 2010*.
- Otkin, Jason A., Martha C. Anderson, Christopher Hain, Iliana E. Mladenova, Jeffrey B. Basara, et Mark Svoboda. 2013. « Examining Rapid Onset Drought Development Using the Thermal Infrared–Based Evaporative Stress Index ». *Journal of Hydrometeorology* 14 (4): 1057-74. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0144.1>.
- Otkin, Jason A., Martha C. Anderson, Christopher Hain, Mark Svoboda, David Johnson, Richard Mueller, Tsegaye Tadesse, Brian Wardlow, et Jesslyn Brown. 2016. « Assessing the Evolution of Soil Moisture and Vegetation Conditions during the 2012 United States Flash Drought ». *Agricultural and Forest Meteorology* 218-219 (mars): 230-42. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.065>.
- Otkin, Jason A., Mark Svoboda, Eric D. Hunt, Trent W. Ford, Martha C. Anderson, Christopher Hain, et Jeffrey B. Basara. 2018. « Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 99 (5): 911-19.
- Ouzeau, G., J.-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services*. <https://10.1016/j.cliser.2016.09.002>.
- Page, Kathryn Louise, Yash P. Dang, et Ram C. Dalal. 2020. « The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield ». *Frontiers in sustainable food systems*, 31.
- Palmer, W.C. 1965. « Meteorological droughts ». *U.S. Department of Commerce, Weather Bureau Research Paper*, n° 45: 58 pp.
- Paz, Joel, Clyde Fraisse, Upton Hatch, Yimer Garcia, Larry Guerra, O. Uryasev, J.G. Bellow, et James Jones. 2007. « Development of an ENSO-based irrigation decision support tool for peanut production in the southeastern US ». *Computers and Electronics in Agriculture* 55 (janvier): 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.11.003>.
- Peltonen-Sainio, Pirjo, Lauri Jauhainen, et Ilkka P. Laurila. 2009. « Cereal Yield Trends in Northern European Conditions: Changes in Yield Potential and Its Realisation ». *Field Crops Research* 110 (1): 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.007>.
- Phéllippé-Guinvarc'H, Martial, Jean Cordier, et Phéllippé Guinvarc. 2019. « Le risque économique : la difficile agrégation des risques à l'échelle des exploitations et des filières ». *Innovations Agronomiques* 77 (juin): 1. <https://doi.org/10.15454/ntkc-wd88>.
- Pittelkow, Cameron M., Xinqiang Liang, Bruce A. Linquist, Kees Jan Van Groenigen, Juhwan Lee, Mark E. Lundy, Natasja Van Gestel, Johan Six, Rodney T. Venterea, et Chris Van Kessel. 2015. « Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture ». *Nature* 517 (7534): 365-68.
- Planton, Serge, Michel Déqué, Fabrice Chauvin, et Laurent Terray. 2008. « Expected Impacts of Climate Change on Extreme Climate Events ». *Geoscience* 340: 564-74. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.009>.

- Porter, Cheryl H., J. W. Jones, S. Adiku, A. J. Gijssman, O. Gargiulo, et J. B. Naab. 2010. « Modeling Organic Carbon and Carbon-Mediated Soil Processes in DSSAT v4.5 ». *Operational Research* 3 (10): 247-78. <https://doi.org/10.1007/s12351-009-0059-1>.
- Porter, John R, et Megan Gawith. 1999. « Temperatures and the Growth and Development of Wheat: A Review ». *European Journal of Agronomy* 10 (1): 23-36. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1).
- Potop, Vera, Martin Možný, et Josef Soukup. 2012. « Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic ». *Agricultural and Forest Meteorology* 156: 121-33.
- Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, et S. Morel. 2008. « Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (1): 92-107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>.
- Quiring, Steven M., et Timothy N. Papakryiakou. 2003. « An Evaluation of Agricultural Drought Indices for the Canadian Prairies ». *Agricultural and Forest Meteorology* 118 (1): 49-62. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00072-8).
- Rabbinge, R. 1993. « The ecological background of food production. » In *Crop protection and sustainable agriculture. Ciba Found. Symp. 177, John Wiley & Sons, Chichester*, 2-29.
- Ramirez, Octavio A., Sukant Misra, et James Fields. 2003. « Crop-Yield Distributions Revisited ». SSRN Scholarly Paper ID 3564562. Rochester, NY: Social Science Research Network. <https://doi.org/10.1111/1467-8276.00106>.
- Ray, D. K, N.D. Mueller, P.C. West, et J.A. Foley. 2013. « Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050 ». *PLoS ONE* 8 (6): 8.
- Ray, Deepak K., Navin Ramankutty, Nathaniel D. Mueller, Paul C. West, et Jonathan A. Foley. 2012. « Recent Patterns of Crop Yield Growth and Stagnation ». *Nature Communications* 3 (1): 1293. <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>.
- Rebetez, Martine, Helmut Mayer, Olivier Dupont, Dirk Schindler, Karl Gartner, Jürgen P. Kropp, et Anette Menzel. 2006. « Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis ». *Annals of Forest Science* 63: 569-77.
- Ritchie, Joe, et Sophie Otter. 1985. « Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model ». *USDA-ARS, ARS-38* 38 (janvier).
- Robinson, Sherman. s. d. « Climate Change Adaptation in Agriculture: Ex Ante Analysis of Promising and Alternative Crop Technologies Using DSSAT and IMPACT », 84.
- Robison, Lindon J., et Peter J. Barry. 1987. « Competitive Firm's Response to Risk ». Macmillan. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=competitive+firm%27s+response+to+risk&author=Robison%2C+Lindon+J.&publication_year=1987.
- Roincé, Catherine de. 2016. « Compte rendu de l'analyse des données de suivi de l'aide à l'assurance récolte. Période 2010-2015 ».
- Rojas, Rodrigo, Luc Feyen, et Paul Watkiss. 2013. « Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation ». *Global Environmental Change* 23 (6): 1737-51.
- Rosenwald, Fabienne. 2011. « Bilan conjoncturel 2007 - AGRESTE ». 7. Agreste Conjoncture. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité.
- Rötter, R., et S. C. Van de Geijn. 1999. « Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock ». *Climatic change* 43 (4): 651-81.
- Roudier, Philippe, Jafet C. M. Andersson, Chantal Donnelly, Luc Feyen, Wouter Greuell, et Fulco Ludwig. 2016. « Projections of Future Floods and Hydrological Droughts in Europe under a +2°C Global Warming ». *Climatic Change* 135 (2): 341-55. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>.
- Roumigué, Antoine, Anne Jacquin, Grégoire Sigel, Poilvé Hervé, Bruno Lepoivre, et Olivier Hagolle. 2015. « Development of an index-based insurance product: validation of a forage production index derived from medium spatial resolution fCover time series ». *GIScience & Remote Sensing* 52: 94-113.

- Roumiguié, Antoine, Grégoire Sigel, Hervé Poilvé, Bruno Bouchard, Anton Vrieling, et Anne Jacquin. 2017. « Insuring forage through satellites: testing alternative indices against grassland production estimates for France ». *International journal of remote sensing* 38 (7): 1912-39.
- Russo, Simone, Alessandro Dosio, Rune G. Graversen, Jana Sillmann, Hugo Carrao, Martha B. Dunbar, Andrew Singleton, Paolo Montagna, Paulo Barbola, et Jürgen V. Vogt. 2014. « Magnitude of Extreme Heat Waves in Present Climate and Their Projection in a Warming World ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (22): 12,500-12,512. <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>.
- Savage, Leonard. 1954. « J. The foundations of statistics ». *John Wiley and Sons, New York, and Chapman and Hall, London* 9: 19-132.
- Schapendonk, A. H. C. M., W. Stol, D. W. G. van Kraalingen, et B. a. M. Bouman. 1996. « Description of LINGRA, a model approach to evaluate potential productivities of grasslands in different European climate regions ». https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Description+of+LINGRA%2C+a+model+approach+to+evaluate+potential+productivities+of+grasslands+in+different+European+climate+regions&author=Schapendonk%2C+A.H.C.M.&publication_year=1996.
- Schapendonk, AHCM, W. Stol, D. W. G. Van Kraalingen, et B. A. M. Bouman. 1998. « LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe ». *European Journal of Agronomy* 9 (2-3): 87-100.
- Schauberger, Bernhard, Tamara Ben-Ari, David Makowski, Tomomichi Kato, Hiromi Kato, et Philippe Ciais. 2018. « Yield Trends, Variability and Stagnation Analysis of Major Crops in France over More than a Century ». *Scientific Reports* 8 (1): 16865. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>.
- Schauberger, Bernhard, David Makowski, Tamara Ben-Ari, Julien Boé, et Philippe Ciais. 2021. « No historical evidence for increased vulnerability of French crop production to climatic hazards ». *Agricultural and Forest Meteorology* 306 (août). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108453>.
- Schlenker, Wolfram, et Michael J. Roberts. 2009. « Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change ». *PNAS* 106: 15594-98.
- Seguin, B. 2008. « Impact du changement climatique sur les écosystèmes naturels et cultivés ». *Forêt Méditerranéenne* XXIX (2): 127-36.
- Seguin, B., et J-F. Soussana. 2006. « Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de GES », 17.
- Semenov, Mikhail, et Francisco Doblas-Reyes. 2007. « Utility of dynamical seasonal forecasts in predicting crop yield ». *Climate Research - CLIMATE RES* 34 (juin): 71-81. <https://doi.org/10.3354/cr034071>.
- Sérès, Claire. 2010. « Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne: premiers éléments de réflexion ». *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 58 (58): 21-36.
- Séronie, Jean-Marc. 2018. *PAC et mondialisation. Une politique européenne encore commune ?* Quae. Clermont-Ferrand.
- Sherrick, Bruce J., Peter J. Barry, Paul N. Ellinger, et Gary D. Schnitkey. 2004. « Factors Influencing Farmers' Crop Insurance Decisions ». *American Journal of Agricultural Economics* 86 (1): 103-14.
- Sherrick, Bruce J., Fabio C. Zanini, Gary D. Schnitkey, et Scott H. Irwin. 2004. « Crop Insurance Valuation under Alternative Yield Distributions ». *American Journal of Agricultural Economics* 86 (2): 406-19. <https://doi.org/10.1111/j.0092-5853.2004.00587.x>.
- Signarbieux, Constant, et Urs Feller. 2012. « Effects of an Extended Drought Period on Physiological Properties of Grassland Species in the Field ». *Journal of Plant Research* 125 (2): 251-61. <https://doi.org/10.1007/s10265-011-0427-9>.
- Sinaj, Sokrat. 2013. « Disponibilité en eau et production fourragère en zone de grandes cultures ». *Revue Suisse d'Agriculture* 4 (janvier): 468-75.
- Sivakumar, M.V.K., R.P Motha, D.A. Wilhite, et D.A. Wood. 2010. « Agricultural Drought Indices. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices ». In , 1572:197. Murcia, Spain: World Meteorological Organization.

- Smith, V.H., et Barry K. Goodwin. 1996. « Crop Insurance, Moral Hazard, and Agricultural Chemical Use ». *American Journal of Agricultural Economics* 78 (2): 428-38.
- Soubeyrou, J. M., L. Bernus, L. Corre, A. Drouin, B. Dubuisson, P. Etchevers, V. Gouget, P. Josse, M. Kerdoncuff, et R. Samacoits. 2021. « Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la Métropole ». *Météo France*.
- Soubeyrou, J M, Jean-Philippe Vidal, J Najac, N Kitova, M Blanchard, P Dandin, E Martin, Christian Pagé, et F Habets. 2011. « Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final », 73.
- Soubeyrou, Jean-Michel, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, et al. 2020. « Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole », 98.
- Soubeyrou, Jean-Michel, N. Kitova, M. Blanchard, J.P. Vidal, E. Martin, et P. Dandin. 2012. « Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec ». *La Météorologie* 78: 21-30. <https://doi.org/10.4267/2042/47512>.
- Spiertz, J. H. J. 1977. « The Influence of Temperature and Light Intensity on Grain Growth in Relation to the Carbohydrate and Nitrogen Economy of the Wheat Plant. » *Netherlands Journal of Agricultural Science* 25 (3): 182-97. <https://doi.org/10.18174/njas.v25i3.17131>.
- Spinoni, Jonathan, Jürgen V. Vogt, Gustavo Naumann, Paulo Barbosa, et Alessandro Dosio. 2018. « Will Drought Events Become More Frequent and Severe in Europe? » *International Journal of Climatology* 38 (4): 1718-36. <https://doi.org/10.1002/joc.5291>.
- SSP - SDSSR - BSPCA. 2015. « RICA France : Présentation des fichiers détails mis en ligne ».
- Su, Yang, Benoit Gabrielle, et David Makowski. 2021. « The impact of climate change on the productivity of conservation agriculture ». *Nature Climate Change* 11 (7): 628-33.
- Su, Ziyou, Jinsong Zhang, Wenliang Wu, Dianxiong Cai, Junjie Lv, Guanghui Jiang, Jian Huang, Jun Gao, Roger Hartmann, et Donald Gabriels. 2007. « Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China ». *Agricultural Water Management* 87 (3): 307-14.
- Sultan, Benjamin, Marthe Bella-Medjo, Alexis Berg, Philippe Quirion, et Serge Janicot. 2010. « Multi-scales and multi-sites analyses of the role of rainfall in cotton yields in West Africa ». *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 30 (1): 58-71.
- Teixeira, Edmar I., Guenther Fischer, Harrij van Velthuisen, Christof Walter, et Frank Ewert. 2013. « Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change ». *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 206-15.
- Teyssier, F. 2005. « Faut-il irriguer en grandes cultures ? Irrigation et agriculture durable en Midi-Pyrénées ». *DRAF Midi-Pyrénées*.
- Thorp, Kelly R., Kendall C. DeJonge, Amy L. Kaleita, William D. Batchelor, et Joel O. Paz. 2008. « Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support ». *computers and electronics in agriculture* 64 (2): 276-85.
- Tian, Liyan, Shanshui Yuan, et Steven M. Quiring. 2018. « Evaluation of Six Indices for Monitoring Agricultural Drought in the South-Central United States ». *Agricultural and Forest Meteorology* 249 (février): 107-19. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.024>.
- Tibi, Anaïs, Philippe Debaeke, Tamara Ben Ari, Annette Bérard, Antonio Bispo, Alain Charcosset, Jean-Louis Durand, et al. s. d. « Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050: Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale », 148.
- Tibi, Anaïs, Agneta Forslund, Philippe Debaeke, Bertrand Schmitt, Hervé Guyomard, Elodie Marajo-Petitzon, Tamara Ben Ari, Annette Bérard, Antonio Bispo, et Jean-Louis Durand. 2020. « Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 ». Rapport de sythèse d'étude, INRA. hal-02791523.
- Trentini, Fabian von, Martin Leduc, et Ralf Ludwig. 2019. « Assessing natural variability in RCM signals: comparison of a multi model EURO-CORDEX ensemble with a 50-member single model large ensemble ». *Climate Dynamics* 53 (3): 1963-79.
- Trnka, M., Jørgen Eivind Olesen, K. C. Kersebaum, A. O. Skjelvåg, J. Eitzinger, B. Seguin, P. Peltonen-Sainio, et al. 2011. « Agroclimatic Conditions in Europe under Climate Change:

- AGROCLIMATIC CONDITIONS IN EUROPE UNDER CC ». *Global Change Biology* 17 (7): 2298-2318. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x>.
- Tsakiris, G., et H. Vangelis. 2005. « Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration ». *European Water* 9/10: 3-11.
- Tubiello, Francesco N., Marcello Donatelli, C. Rosenzweig, et Claudio O. Stockle. 2000. « Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations ». *European Journal of Agronomy* 13 (2-3): 179-89.
- UNEP. 2004. « Impacts of Summer 2003 Heat Wave in Europe ».
- « Varenne agricole de l'eau et du changement climatique. Proposition d'un plan stratégique pour 2023-2030 pour la réforme des calamités agricoles et le développement des assurances récoltes ». 2021. Rapport au Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation du groupe de travail « gestion des risques et développement de l'assurance récolte ».
- Vautard, R., J M Soubeyrou, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Maryvonne Kerdoncuff, David Salas-y-Melia, et Benjamin Sultan. 2022. « Les services climatiques ». *Rapport de l'ONERC au premier ministre et au Parlement*, La documentation Française, La prospective au service de l'adaptation au changement climatique: 65-85.
- Vert, Julien, Noémie Schaller, Clément Villien, Fabienne Portet, Thuriane Mahé, Anne-Sophie Sergent, Sylvie Alexandre, et al. 2013. *AGRICULTURE, FORÊT, CLIMAT - VERS DES STRATÉGIES D'ADAPTATION*. <https://doi.org/10.13140/2.1.1359.5202>.
- Veysset, Patrick, Didier Bébin, et Michel Lherm. 2007. « Impacts de la sécheresse de 2003 sur les résultats technico-économiques en élevage bovin allaitant Charolais », 13.
- Vicente-Serrano, Sergio, Santiago Beguería, et Juan Lopez-Moreno. 2010. « A multiscale drought Index sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index ». *Journal of Climate* 23: 1696-1718.
- Vicente-Serrano, Sergio M., Juan-I. Lopez-Moreno, Santiago Beguería, Jorge Lorenzo-Lacruz, Arturo Sanchez-Lorenzo, José M. García-Ruiz, Cesar Azorin-Molina, Enrique Morán-Tejeda, Jesús Revuelto, et Ricardo Trigo. 2014. « Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe ». *Environmental Research Letters* 9 (4): 044001.
- Vidal, Jean-Philippe, E. Martin, L. Franchistéguy, Florence Habets, Jean-Michel Soubeyrou, M. Blanchard, et M. Baillon. 2010. « Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite ». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 14 (3): 459-78. <https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010>.
- Vidal, J.P., E. Martin, N. Kitova, J. Najac, et Jean-Michel Soubeyrou. 2012. « Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios ». *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (8): 2935-55. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2935-2012>.
- Vinet, Freddy. 2002. « La question du risque climatique en agriculture : le cas de la grêle en France ». *Annales de géographie* 111 (627): 592-613. <https://doi.org/10.3406/geo.2002.21621>.
- Viovy, N. 1996. « Interannuality and CO₂ sensitivity of the SECHIBA-BGC coupled SVAT-BGC model ». *Physics and Chemistry of the Earth* 21 (5-6): 489-97.
- Volaire, Florence, M. R. Norton, et François Lelièvre. 2009. « Summer Drought Survival Strategies and Sustainability of Perennial Temperate Forage Grasses in Mediterranean Aereas ». *Crop Science* 49 (6): 2386. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.06.0317>.
- Voldoire, Aurore, Emilia Sanchez-Gomez, David Salas y Mélia, B. Decharme, Christophe Cassou, Stéphane Sénési, Sophie Valcke, et al. 2013. « The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation ». *Climate Dynamics* 40 (mai): 2091. <https://doi.org/10.1007/S00382-011-1259-Y>.
- Vossen, P. 187474, Brussels European Commission, et D. 187445 Rijks. 1995. « Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre ». Luxembourg (Luxembourg) Office for Official Pub. of the European Communities. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Early+crop+yield+assessment+of+the+EU+countries%3A+the+system+implemented+by+the+Joint+Research+Centre&author=Vossen%2C+P.%0A++++187474&publication_year=1995.

- Vuuren, Detlef P. van, J. Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, et John Weyant. 2011. « Special Issue, " The Representative Concentration Pathways in Climatic Change" ». *Climatic Change* 109 (1-2).
- Wei, Xiaofang. 2010. « Biomass estimation: A remote sensing approach ». *Geography Compass* 4 (11): 1635-47.
- Wells, Nathan, Steve Goddard, et Michael J. Hayes. 2004. « A self-Calibrating Palmer Drought Severity Index ». *Journal of Climate* 17: 2335-51.
- Wilkerson, G., James W. Jones, K. Boote, K. T. Ingram, et J. W. Mishoe. 1983. « Modeling Soybean Growth for Crop Management ». <https://doi.org/10.13031/2013.33877>.
- Woli, P., J.W. Jones, K.T. Ingram, et C.W. Fraisse. 2012. « Agricultural reference index for drought (ARID) ». *Agronomy Journal* 104: 287-300.
- World Bank. 2010. « Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics ». 56719. Washington DC: Word Bank, United Nations, and Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Wu, JunJie. 1999. « Crop Insurance, Acreage Decisions, and Nonpoint-Source Pollution ». *American Journal of Agricultural Economics* 81 (2): 305-20. <https://doi.org/10.2307/1244583>.
- Wu, X., N. Vuichard, P. Ciais, N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, X. Wang, V. Magliulo, et al. 2016. « ORCHIDEE-CROP (v0), a new process-based agro-land surface model: model description and evaluation over Europe ». *Geoscientific Model Development* 9 (2): 857-73. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-857-2016>.
- Zhang, Lu, Nick Potter, Klaus Hickel, Yongqiang Zhang, et Quanxi Shao. 2008. « Water Balance Modeling over Variable Time Scales Based on the Budyko Framework – Model Development and Testing ». *Journal of Hydrology* 360 (1): 117-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.021>.
- Zhang, Xia, Duan Yawen, Jianping Duan, Dongnan Jian, et Zhuguo Ma. 2021. « A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses ». *Science China Earth Sciences* 65 (décembre). <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9822-y>.

ANNEXES

ANNEXE 1 : EQUATION DE L'ETP

L'équation de Penman-Monteith est la suivante :

$$= \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

Où Δ représente la pente de la courbe de tension de vapeur en fonction de la température moyenne de l'air, R_n le rayonnement net, G le flux de chaleur du sol par conduction, ρ la densité de l'air, C_p la capacité thermique de l'air, e_s tension de vapeur saturante, e_a tension de vapeur effective, r_a la résistance aérodynamique, λ chaleur latente de vaporisation de l'eau, γ constante psychométrique et r_s résistance opposée par les stomates au passage du flux de vapeur.

Les paramètres R_n , Δ , e_s et e_a sont directement dépendants de la température. Ils sont calculés de la façon suivante :

$$R_n = (1 - \alpha)R_G + \varepsilon R_A - \varepsilon \sigma T_s^4$$

Où R_n est le rayonnement net, α est l'albédo de surface, R_G est le rayonnement solaire incident, ε est l'émissivité de la surface dans l'infrarouge, R_A est le rayonnement infrarouge descendant, σ la constante de Stefan, T_s est la température de surface.

$$\Delta = \frac{2504 \exp\left(\frac{17,27(T_A - 273,15)}{T_A - 35,85}\right)}{(T_A - 35,85)^2}$$

Où T_A représente la température de l'air.

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27(T_A - 273,15)}{T_A - 35,85}\right)$$

$$e_a = h_A e_s$$

Où h_A représente l'humidité relative de l'air.

ANNEXE 2 : ETUDE SUR LES TENDANCES DE RENDEMENT

Cette étude vise à apporter des éléments de réponse sur le choix de ne pas avoir utilisé le calcul d'une tendance de rendement pour le rendement de référence. Cette étude, concentrée sur le blé tendre, part de la distribution des rendements sur l'historique sur un exemple et détaille toute la méthodologie mise en place.

La Figure 79 présente les rendements du blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018 dans le département de l'Eure-Et-Loir.

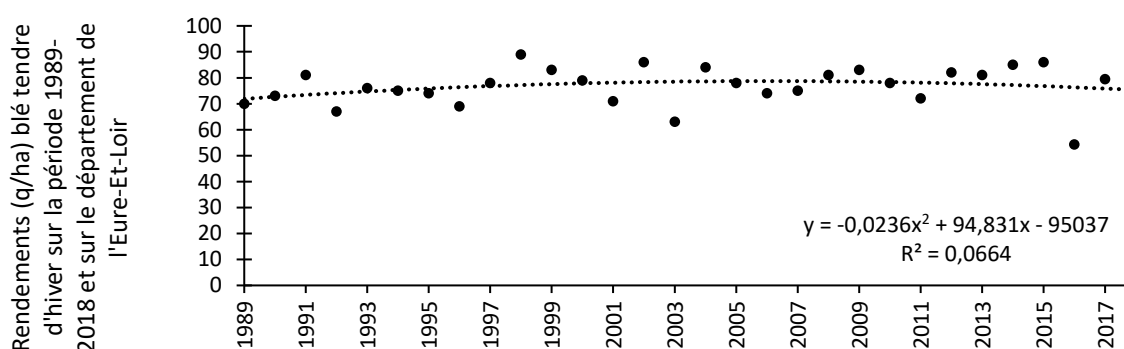


Figure 79. Rendements (q/ha) du blé tendre d'hiver dans l'Eure-Et-Loir sur l'historique 1989-2018 (données : AGRESTE) et tendance (courbe en pointillée)

D'après la Figure 79, il n'existe pas de tendance sur les données de rendement. En effet, le coefficient de détermination n'indique pas une bonne relation ($R^2=0,06$). D'après cette figure, les rendements évoluent dans un couloir compris entre 70 q/ha et 80 q/ha, avec des années moins bonnes (autour de 70 q/ha) et de meilleures années (autour de 80 q/ha). Cette oscillation observée est la fluctuation normale des rendements d'une année sur l'autre, celle-ci étant accentuée lorsque les données sont à l'échelle de l'exploitation agricole. En effet, ces données sont déjà des données agrégées de données provenant des exploitations agricoles. D'après la Figure 79, certains chocs exogènes viennent perturber cette évolution conduisant alors à des données de rendements très faibles (comme en 2016 où le rendement est de 54 q/ha), ou très élevés (comme en 1998 où le rendement est de 89 q/ha). Ces valeurs extrêmes couplées à la fluctuation naturelle des rendements ne permettent pas de trouver une bonne tendance des rendements sur l'historique, c'est pourquoi l'étude de tendance sur les rendements implique au préalable une opération de normalisation des données. Ainsi, l'étude de tendance de rendement est effectuée sur les données suivantes :

- La moyenne glissante sur 5 ans et sur 10 ans des valeurs de rendement ;

- La moyenne olympique²¹ glissante sur 5 ans et sur 10 ans des valeurs de rendement ;
- La moyenne de moyenne glissante sur 5 ans et sur 10 ans des valeurs de rendement ;

Dans le programme de l'assurance MRC, le rendement de référence sur l'exploitation agricole correspond à la moyenne olympique glissante sur 5 ans (c'est-à-dire la moyenne dont le minimum et le maximum des valeurs sont soustraits) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Ministère de l'Economie et des Finances 2016). Il est donc intéressant d'appliquer cette méthodologie à l'échelle départementale pour voir si une tendance peut être dégagée. Par ailleurs, la moyenne de moyenne glissante est testée car elle permet de lisser d'avantage les données pour l'obtention d'une tendance. Les résultats pour la culture de blé tendre d'hiver dans l'Eure-Et-Loir sont présentés en Figure 80.

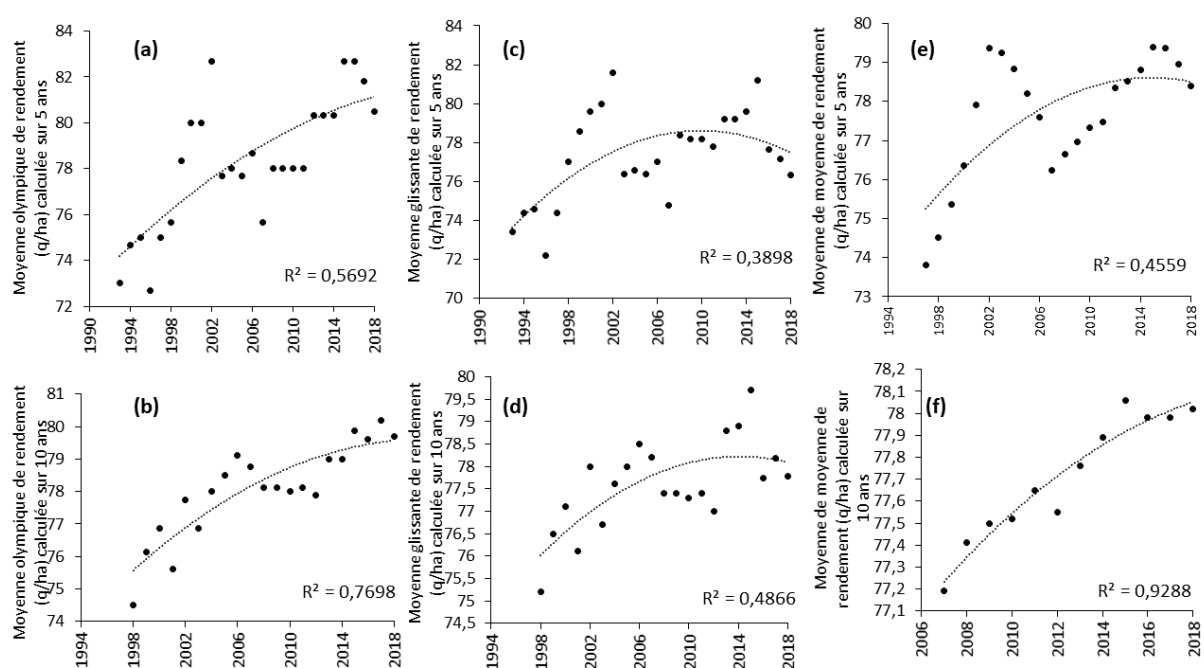


Figure 80. Calcul d'une tendance de rendements et étude de la corrélation (valeurs de R^2) pour le blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018 dans l'Eure-Et-Loir à partir de (a) la moyenne olympique calculée sur 5 ans, (b) la moyenne olympique calculée sur 10 ans, (c) la moyenne glissante calculée sur 5 ans, (d) la moyenne glissante calculée sur 10 ans, (e) la moyenne de seuil calculée sur 5 ans, (f) la moyenne de seuil calculée sur 10 ans

D'après la Figure 80, la meilleure courbe de tendance avec une forte corrélation ($R^2=0,93$) est obtenue par le calcul de la moyenne de moyenne sur 10 ans. La courbe de tendance est une équation polynomiale qui lie le rendement de référence (calculé par la moyenne de seuil sur 10 ans) à l'année de la façon suivante :

$$\text{rendement de référence}_n = \alpha * n^2 + \beta * n + \gamma$$

²¹ Moyenne olympique glissante sur 5 ans : moyenne faite sur 5 valeurs dont on retire les extrêmes (le maximum et le minimum des valeurs)

Où n représente l'année et α, β, γ les coefficients qui sont respectivement égaux à $-0,00365, 14,768$ et -14857 dans le cas du blé tendre d'hiver dans le département de l'Eure-Et-Loir. Cette équation permet donc de calculer un rendement de référence pour chaque année de l'historique.

Cette étude est réalisée sur tous les départements de la France métropolitaine, où lorsqu'une tendance est observée, l'équation du rendement de référence est toujours d'ordre 2 (courbe polynomiale). Les résultats en fonction de la valeur (par classe) du R^2 sont présentés en Figure 81 pour la culture de blé tendre d'hiver.

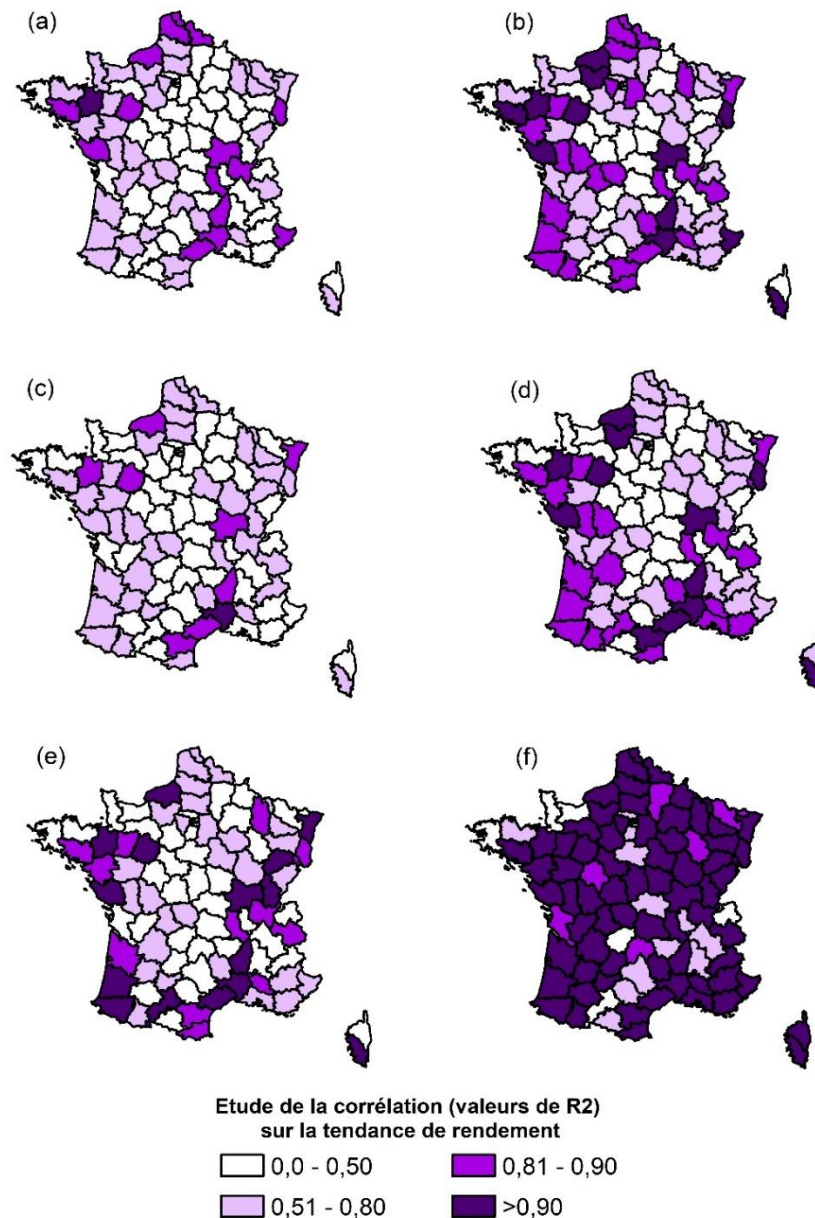


Figure 81. Etude de la corrélation (valeurs de R^2) de la tendance de rendement pour le blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018 pour chaque département à partir de (a) la moyenne olympique calculée sur 5 ans, (b) la moyenne olympique calculée sur 10 ans, (c) la moyenne glissante de rendement calculée sur 5 ans, (d) la moyenne glissante de rendement calculée sur 10 ans, (e) la moyenne de seuil de rendement calculée sur 5 ans, (f) la moyenne de seuil de rendement calculée sur 10 ans

Plusieurs points sont à noter après lecture de ces résultats. Premièrement, il apparaît très clairement que la meilleure candidate pour calculer la tendance de rendement serait la moyenne de moyenne sur 10 ans car c'est elle qui donne les meilleurs résultats en termes de corrélation. En effet, le coefficient de détermination est supérieur ou égal à 0,9 pour 70 départements avec cette méthode, alors que pour les autres méthodes, ce nombre est au maximum de 16 départements. Cependant, cette tendance n'est pas bien ajustée pour 19 départements ($R^2 < 0,8$). Ces départements sont répartis dans toute la France et ont chacun des caractéristiques différentes de surface, de rendements et de climat. En effet, parmi eux figurent des départements de montagne à faible surface cultivée et faibles rendements (Haute-Savoie, Corrèze, Pyrénées Orientales), des départements du Sud (Haute-Garonne, Tarn, Aveyron, Drôme) à surface cultivée moyenne et rendements moyens et des départements de la Bretagne et de la Normandie et le Loiret (Centre) à forte surface cultivée et rendements élevés. Sur toutes les tendances étudiées, aucune tendance n'est dégagée pour ces départements. A l'inverse, d'autres départements comme les départements du Gard, de l'Hérault, et de l'Ardèche affichent d'excellents résultats sur le coefficient de détermination quelque soient la méthodologie de calcul utilisée.

La Figure 82 reprend les résultats des tendances sur l'ensemble des départements. Une évolution inférieure à 0,2 q/ha annuelle est considérée comme une stagnation. D'après cette figure, 43 départements enregistrent une stagnation des rendements du blé tendre d'hiver, 27 départements une augmentation et 8 départements une diminution.

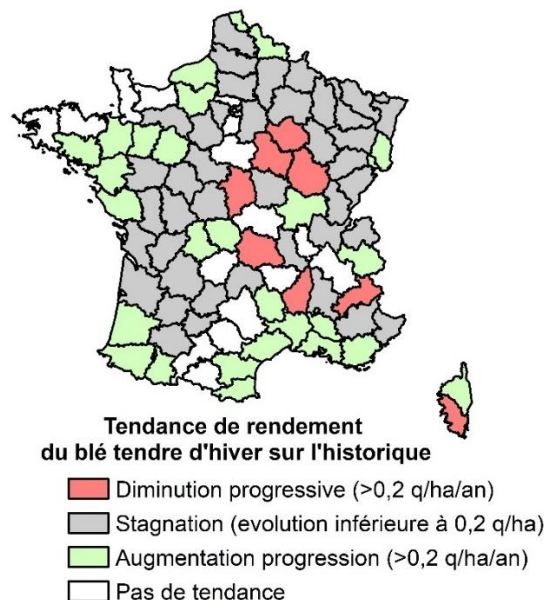


Figure 82. Evolution des rendements du blé tendre d'hiver sur la période 1989-2018

Ces premiers résultats indiquent que le calcul d'une tendance de rendement au département peut être exploitable mais les résultats ne sont pas homogènes sur toute la France. L'étude des tendances montre que l'évolution des rendements est stable pour 43 départements seulement. De plus, cette tendance n'est construite que sur 10 points, donc l'ajout d'autres points pourrait modifier la forme de la courbe de

tendance et son équation de manière significative. Ainsi, afin d'obtenir des tendances plus robustes, construites sur plus de données, le même travail a été réalisé à l'échelle de la région administrative, échelle cohérente avec les données RICA que nous utiliserons par la suite dans ce travail (voir chapitre 4). Les rendements régionaux sont calculés en pondérant les rendements départementaux par la surface cultivée en blé tendre d'hiver. Cette étude régionale indique que la meilleure corrélation est obtenue également par la moyenne de seuil sur 10 ans et la tendance est une courbe d'équation d'ordre 2 (polynomiale) sur toutes les régions. Cependant, il est important là aussi de se poser la question de la fiabilité de cette tendance, notamment lorsque les départements au sein d'une même région montrent des tendances de rendements contraires. Par exemple, dans la région Aquitaine, tous les départements sauf le Lot-Et-Garonne montrent une augmentation des rendements au cours du temps comme présenté en Figure 83.

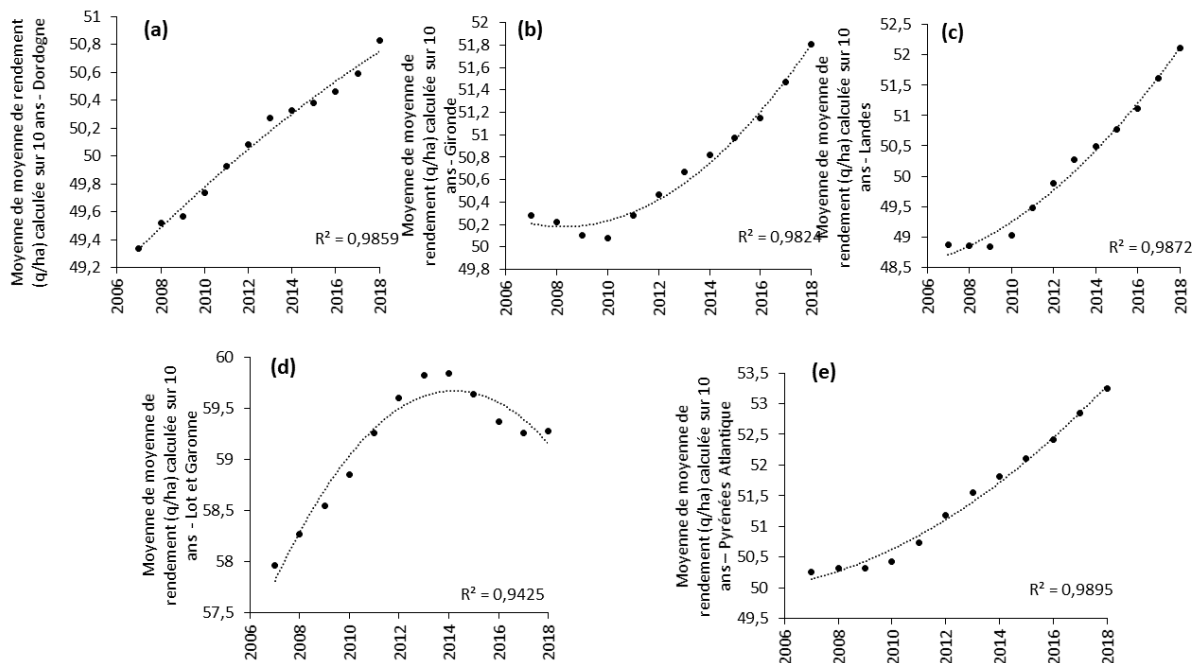


Figure 83. Tendence de rendement calculée par la moyenne de moyenne sur 10 ans sur les départements de l'Aquitaine pour le blé tendre d'hiver : (a) département de la Dordogne, (b) Gironde, (c) Landes, (d) Lot et Garonne, (e) Pyrénées Atlantiques

Cependant, la courbe de tendance construite sur la moyenne de seuil sur 10 ans calculée à l'échelle régionale montre une diminution progressive du rendement de référence à partir de 2015 (Figure 84).

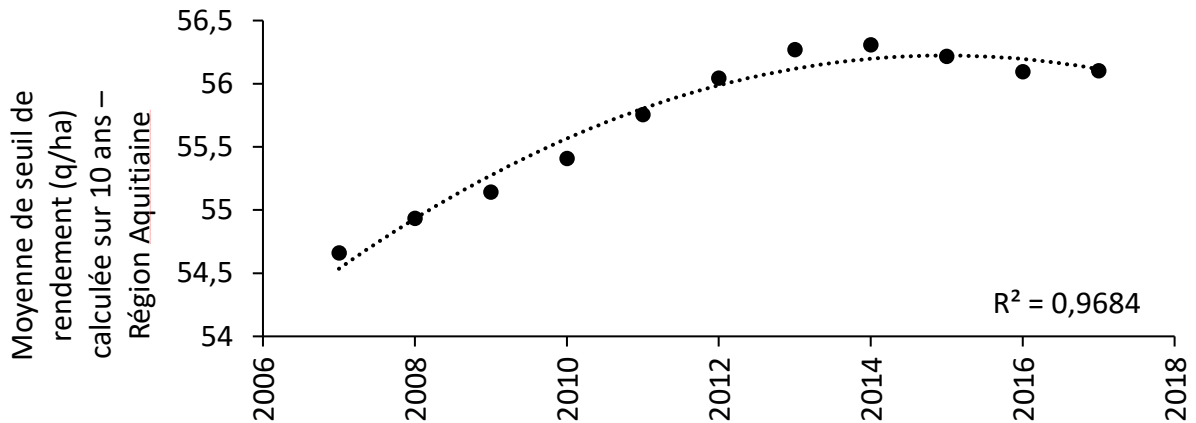


Figure 84. Tendence de rendement calculée par la moyenne de moyenne sur 10 ans du blé tendre d'hiver dans la région Aquitaine

En effet, le rendement étant pondéré par la surface, les valeurs de rendement de référence (et donc la tendance régionale) sont très fortement influencées par le département du Lot-Et-Garonne qui représente plus de 50% des surfaces. Outre la forme de la courbe de tendance qui n'est pas la bonne, les valeurs de rendements de référence calculées par cette méthode apparaissent donc plus élevées que celles calculées aux départements pour les départements de Dordogne, Gironde, Landes et Pyrénées-Atlantiques ce qui influence énormément le calcul des pertes de récoltes.

De plus, pour certaines régions, le coefficient de détermination reste peu élevé : Rhône-Alpes ($R^2=0,79$), Poitou-Charentes, ($R^2=0,64$), Basse-Normandie ($R^2=0,69$), PACA ($R^2=0,38$).

Enfin, le calcul d'une moyenne de moyenne sur 10 ans (au département ou à la région) n'est pas applicable sur les prairies, pour lesquelles l'historique des données de rendement est plus court (2000-2018). Ainsi, ces premières analyses montrent qu'il semble difficile de calculer une tendance de rendement à l'échelle départementale harmonisée sur toutes les cultures et tous les départements. La construction d'une tendance à l'échelle régionale ne semble pas satisfaisante non plus car les départements n'ont pas les mêmes caractéristiques de surface, de rendement et d'évolution du rendement au sein d'une même région administrative.

Il est intéressant de s'interroger sur l'origine de la difficulté à trouver des tendances de rendements. Dans le chapitre 1, nous avons défini les nombreux risques auxquels sont soumises les exploitations agricoles et nous avons également mis en évidence le fait que l'ensemble de ces risques affectent la production en quantité et en qualité. Ainsi, de nombreux facteurs influencent les rendements tels que les événements climatiques, sanitaires, le risque de prix, les choix de l'agriculteur (dates de semis, fertilisation, etc.), les politiques agricoles (quotas, politique de verdissement, etc.), les variétés génétiques. Certains de ces facteurs sont difficilement projetables sur le long terme comme les prix des productions agricoles ou encore l'évolution de la Politique Agricole Commune. De plus, les chercheurs ne s'entendent pas toujours sur l'évolution à long terme des rendements agricoles. Des auteurs affirment

que les rendements des céréales notamment en Europe stagnent et les causes évoquées sont souvent la réduction des intrants, l'extensification (Finger 2008; 2010; Peltonen-Sainio, Jauhiainen, et Laurila 2009) du fait des normes environnementales intégrées dans les derniers programmes de la PAC. En effet, une étude conduite sur plusieurs départements français indique que les tendances de rendement du blé ont un point d'inflexion à partir de 1996 marquant, à partir de ce moment, un maintien des productions qui jusque-là étaient plutôt en augmentation (Brisson et al. 2010). Cette stagnation des rendements a été observée par de nombreux auteurs (Schauberger et al. 2018; Deepak K. Ray et al. 2012; Lin et Huybers 2012; Grassini, Eskridge, et Cassman 2013). D'autres auteurs qui étudient les tendances de rendement sur l'historique ont trouvé une diminution des rendements du blé en France durant ces dernières années (Michel et Makowski 2013). Outre la réduction des intrants, le climat est une variable évoquée pour justifier le fait que les rendements n'augmentent pas malgré le progrès génétique (Brisson et al. 2010). A l'échelle régionale par exemple, (Gate 2007) ont démontré une relation positive entre l'augmentation des températures et la stagnation des rendements, bien qu'ils suggèrent aussi que des semis précoces peuvent atténuer l'effet de la température. Alors que certains auteurs dont le GIEC démontrent que le changement climatique pourrait avoir un effet négatif sur les tendances de rendement du fait de l'augmentation du risque de sécheresse (IPCC 2021; 2014; Moore et Lobell 2015), d'autres auteurs affirment, au contraire, que le changement climatique peut avoir un effet bénéfique sur la production des céréales car l'augmentation de la concentration en CO₂ permet d'accroître la photosynthèse ce qui pourrait se traduire, au niveau mondial, par une augmentation des tendances de rendements (Anaïs Tibi et al., s. d.; D. K Ray et al. 2013). Enfin, sur les questions de variétés génétiques, là non plus, les auteurs ne s'accordent pas toujours. Certains auteurs affirment qu'il y a une limite à l'amélioration génétique (Calderini et Slafer 1998) alors que d'autres démontrent que le progrès génétique ne diminue pas (Bell et al. 1995). Si la plupart des auteurs s'accordent pour dire qu'aujourd'hui la production de blé en Europe est arrivée à une limite, les visions sur l'avenir sont contrastées. Les analyses optimistes sur l'évolution des rendements incluent l'adaptation continue de l'agriculture à son environnement, les progrès techniques et génétiques toujours en évolution croissante, alors que les analyses plutôt pessimistes démontrent que les facteurs extérieurs tels que le changement climatique, les normes environnementales ou encore la diminution des surfaces cultivées auraient plus de poids sur le rendement que les méthodes d'adaptation (Hawkins et al. 2013).

Les rendements n'étant pas toujours stables au cours du temps, il n'est pas toujours possible de calculer un rendement de référence construit sur une tendance. Dans le programme de gestion des risques en agriculture (assurance multirisques climatique) le rendement de référence est calculé en faisant une moyenne Olympique sur 5 ans. La Figure 85 présente les rendements de référence obtenus par la moyenne de seuil glissante sur 10 ans et la moyenne olympique glissante sur 5 ans 1993 à 2018 pour le département de l'Eure-Et-Loir et le blé tendre d'hiver.

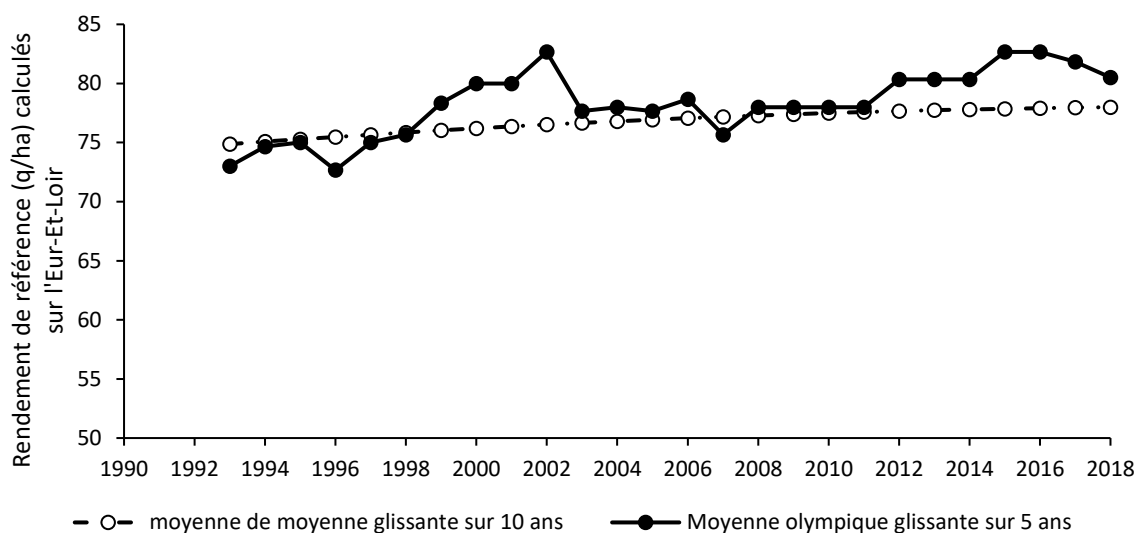
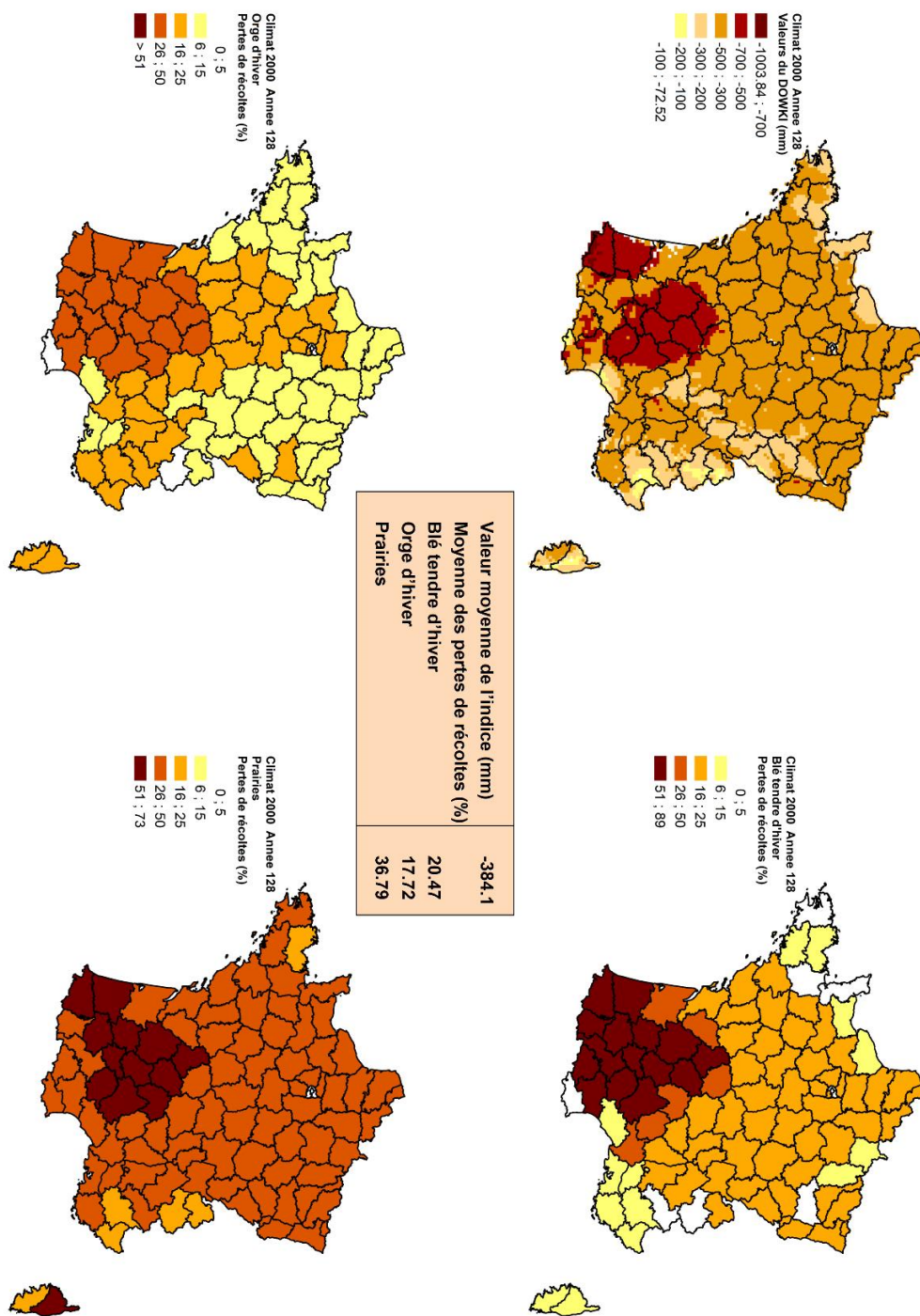


Figure 85. Moyenne olympique glissante de rendement sur 5 ans et rendement de référence calculé à partir de l'équation de la courbe de la moyenne de seuil sur 10 ans

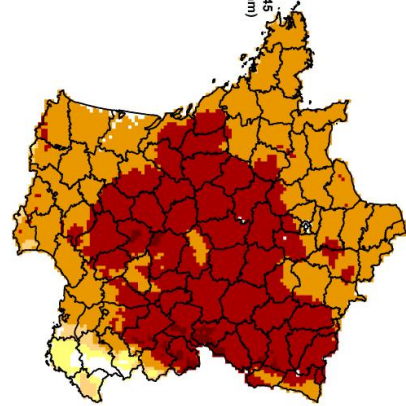
D'après la Figure 85, les écarts entre les rendements de référence calculés par les deux méthodes existent. L'écart le plus important est obtenu pour l'année 2002 et il s'agit d'un écart de 8%. Comme nous le verrons par la suite, il s'agit d'une année sans risque extrême. Pour les années 2016 et 2017 l'écart est inférieur à 6%. Ainsi, il semble que l'application de la moyenne Olympique de rendement peut être utilisée sans dégrader les résultats (les écarts restent relativement faibles) sur le calcul des pertes de récoltes.

ANNEXE 3 : EXTRAIT DE L'ATLAS



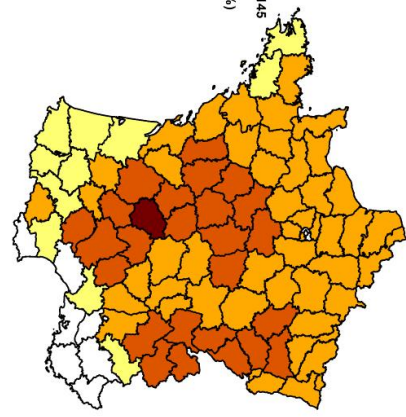
Climat 2050 Année 145
 Valeurs du DQWKI (mm)

- 868.31 ; -700
- 700 ; -500
- 500 ; -300
- 300 ; -200
- 200 ; -100
- 100 ; 44.32



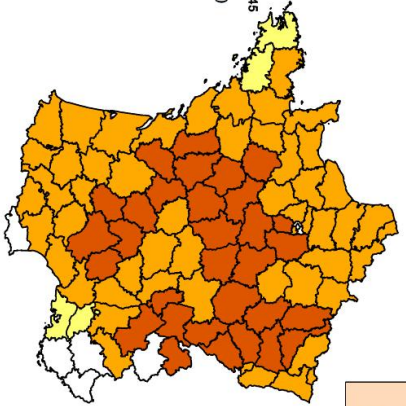
Climat 2050 Année 145
 Blé tendre d'hiver
 Pertes de récoltes (%)

- 0 ; 5
- 6 ; 15
- 16 ; 25
- 26 ; 50
- 51 ; 55



Climat 2050 Année 145
 Orge d'hiver
 Pertes de récoltes (%)

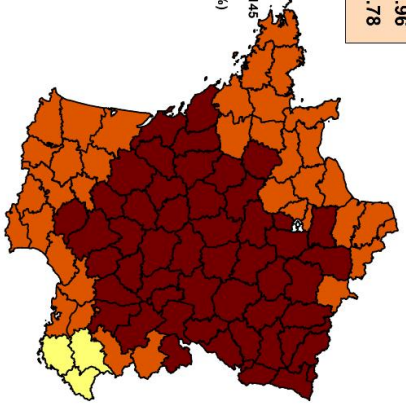
- 0 ; 5
- 6 ; 15
- 16 ; 25
- 26 ; 50
- > 51



Valeur moyenne de l'indice (mm)	
Moyenne des pertes de récoltes (%)	-478
Orge d'hiver	21.46
Blé tendre d'hiver	23.96
Prairies	50.78

Climat 2050 Année 145
 Prairies
 Pertes de récoltes (%)

- 0 ; 5
- 6 ; 15
- 16 ; 25
- 26 ; 50
- 51 ; 73



ANNEXE 4 : EQUATIONS POUR LE CHIFFRAGE DU MONTANT DES DOMMAGES PAR ACTEUR

Dans cette annexe, on propose de présenter les équations mathématiques qui permettent de calculer :

- les pertes économiques brutes des exploitations agricoles,
- la part des dommages qui revient à la charge de l'assurance
- la part des dommages qui revient à la charge de l'Etat via le Fonds de Solidarité Nationale

selon la réforme de scénarios de gestion des risques 2023 (voir présentation du système à trois étage dans la Figure 67). Les équations sont détaillées pour un seul agriculteur. Il faut faire la somme pour obtenir la perte économique globale. Dans notre étude, nous appliquons un taux de diffusion de 100%, mais nous donnons ici les méthodes de calculs dans le cadre des agriculteurs assurés et non assurés.

Perte économique des agriculteurs

Soit $VA = \text{prix de la culture} \times \text{rendement moyen} \times \text{surface moyenne}$

Sur une exploitation agricole pour une culture donnée. Ces informations sont présentées dans le Tableau 18.

Pour un agriculteur assuré :

$$Perte\ économique = \begin{cases} \text{si } tx\ pertes > franchise \\ \quad franchise \times VA \\ \text{si } tx\ pertes < franchise \\ \quad tx\ pertes \times VA \end{cases}$$

Avec $tx\ pertes$ les pertes de récoltes (%) de l'agriculteur donné et $franchise$ le niveau de franchise défini (25% dans notre cas).

Pour un agriculteur non assuré :

$$Perte\ économique = \begin{cases} \text{si } tx\ pertes < seuil\ FSN \\ \quad tx\ pertes \times VA \\ \text{si } tx\ pertes > seuil\ FSN \\ \quad (Seuil\ FSN \times VA) + ((tx\ pertes - Seuil\ FSN) \times (1 - tx\ indemnisation\ FSN) \times VA) \end{cases}$$

Avec $Seuil\ FSN$ le seuil d'intervention du Fonds de Solidarité Nationale (FSN) qui est établi à 50% dans notre étude et $tx\ indemnisation\ FSN$ le taux d'indemnisation du FSN dans le cas des non assurés (45% en 2023 selon la Figure 67).

Ainsi, $(Seuil\ FSN \times VA)$ représente la part de dommages qui revient à l'agriculteur non assuré pour la partie des pertes de récoltes inférieures au seuil du FSN et $((tx\ pertes - Seuil\ FSN) \times (1 - tx\ indemnisation\ FSN) \times VA)$ représente la part des dommages qui revient à l'agriculteur et qui est au-dessus du FSN mais qui n'est que prise en charge à hauteur de 45% par le FSN (il reste donc 55% à charge pour l'exploitant). Dans les dernières réunions de concertations, il est proposé que ce taux d'indemnisation soit dégressif : 45% en 2023, 40% en 2024, 35% en 2025 pour les grandes cultures et la viticulture.

Dommmages pris en charge par l'assurance

Dommmages assurance

$$= \begin{cases} & \text{si } tx\ pertes > seuil\ FSN \\ ((Seuil\ FSN - franchise) \times VA) + ((tx\ pertes - Seuil\ FSN) \times (1 - tx\ indemnisation\ FSN) \times VA) & \\ & \text{si } franchise < tx\ pertes < seuil\ FSN \\ (tx\ pertes - franchise) \times VA & \end{cases}$$

Ainsi, $((Seuil\ FSN - franchise) \times VA)$ correspond au deuxième étage présenté en Figure 67, soit la part prise en charge par l'assurance pour les pertes de récoltes inférieures au seuil d'intervention de l'Etat et $((tx\ pertes - Seuil\ FSN) \times (1 - tx\ indemnisation\ FSN) \times VA)$ correspond à la part prise en charge par l'assurance sur les pertes de récoltes supérieures au seuil FSN. En effet, pour les agriculteurs assurés, le FSN prend en charge 90% des indemnisations et il reste 10% à la charge de l'assurance.

Dommmages pris en charge par l'Etat

$$Dommmages\ FSN = \begin{cases} & \text{si } tx\ pertes > seuil\ FSN \\ (tx\ pertes - franchise) \times tx\ indemnisation\ FSN \times VA & \\ & \text{si } tx\ pertes < seuil\ FSN \\ 0 & \end{cases}$$

Avec $tx\ indemnisation\ FSN = 90\%$ dans le cas des agriculteurs assurés ;

$tx\ indemnisation\ FSN = 45\%$ dans le cas des agriculteurs non assurés.