



HAL
open science

Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver

François Beauvais

► To cite this version:

François Beauvais. Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver. Géographie. Normandie Université, 2021. Français. NNT : 2021NORMC028 . tel-03537778

HAL Id: tel-03537778

<https://theses.hal.science/tel-03537778v1>

Submitted on 20 Jan 2022

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.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité GEOGRAPHIE

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver

**Présentée et soutenue par
FRANCOIS BEAUVAIS**

**Thèse soutenue le 10/12/2021
devant le jury composé de**

MME NATHALIE DE NOBLET-DUCOUDRE	Directeur de recherche au CNRS, Université de Versailles Saint-Quentin	Rapporteur du jury
M. ALBIN ULLMANN	Maître de conférences HDR, Université de Bourgogne-Franche Comté	Rapporteur du jury
MME SANDRA ROME	Maître de conférences, Université Grenoble Alpes	Membre du jury
M. VINCENT DUBREUIL	Professeur des universités, Université Rennes 2	Président du jury
M. OLIVIER CANTAT	Maître de conférences HDR, Université Caen Normandie	Directeur de thèse
M. PHILIPPE MADELINE	Professeur des universités, Université Caen Normandie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par OLIVIER CANTAT et PHILIPPE MADELINE, Littoral, environnement, télé-détection, géomatique (Caen)



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE





Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Géographie

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver

Présentée et soutenue par

François BEAUVAIS

Thèse soutenue publiquement le 10/12/2021
devant le jury composé de

Mme Nathalie de NOBLET-DUCOUDRÉ	Directrice de recherches, CEA	Rapporteuse
M. Albin ULLMANN	Maître de conférences HDR, Université de Dijon	Rapporteur
Mme Sandra ROME	Maître de conférences, Université de Grenoble Alpes	Examinatrice
M. Vincent DUBREUIL	Professeur des universités, Université Rennes 2	Examineur
M. Olivier CANTAT	Maître de conférences HDR, Université de Caen Normandie	Directeur de thèse
M. Philippe MADELINE	Professeur des universités, Université de Caen Normandie	Co-directeur de thèse
M. Jean SANTERRE	Directeur du Pôle Végétal, CRAN	Membre invité

Thèse dirigée par Olivier CANTAT, laboratoire LETG-Caen UMR 6554 CNRS
et Philippe MADELINE, laboratoire ESO-Caen UMR 6590 CNRS



Sommaire

Sommaire.....	3
Remerciements.....	5
Introduction générale.....	9
Partie 1. Changement climatique et céréaliculture : contextualisation, état de l'art et méthodologie	17
Chapitre 1. Le blé : une céréale au centre d'enjeux à différentes échelles	19
Chapitre 2. Le changement climatique : une menace pour la céréaliculture normande ?.....	65
Chapitre 3. Méthodologie et données pour la recherche.....	113
Partie 2. Les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre de 1961 à 2100 en Plaine de Caen	203
Chapitre 4. Adaptation de l'agriculture aux conditions locales et évolutions climatiques observées par les céréaliers	205
Chapitre 5. Evolutions agroclimatiques du blé tendre de 1961 à 2100	251
Chapitre 6. Evolutions phénoclimatiques du blé tendre de 1961 à 2100.....	303
Partie 3. Approches expérimentales et multiscalaires pour l'étude bioclimatique des agrosystèmes	339
Chapitre 7. L'approche multiscalaire en géographie pour estimer les limites sur le terrain et compléter l'étude bioclimatique	341
Chapitre 8. Etendre l'analyse à d'autres régions et cultures	387
Conclusion générale et perspectives	427
Bibliographie	439
Table des figures	455
Liste des tableaux.....	465
Table des matières	469
Annexes	477

Remerciements

Me voilà au terme de neuf années d'études dont quatre pour réaliser cette thèse de doctorat. Au cours de ce travail de recherche, de nombreuses personnes m'ont soutenu et je tiens à les remercier.

Mes premiers remerciements sont adressés à mes deux directeurs de thèse, Olivier Cantat (Maître de conférences HDR – Université de Caen) et Philippe Madeline (Professeur des Universités - Université de Caen). Olivier, Philippe, merci pour votre confiance, vos conseils, votre bienveillance et de m'avoir permis de travailler sur cette thématique passionnante en m'accordant une grande liberté. Ma reconnaissance est immense envers le temps que vous m'avez accordé, sans compter, depuis le mémoire de Master 1 (2015-2016), pour me guider jusqu'à la fin de cette thèse. Merci de m'avoir transmis votre engouement pour la géographie, plus particulièrement en climatologie et sur les questions agricoles. Merci pour m'avoir accompagné, que ce soit pour la recherche ou pour la préparation des enseignements ainsi que pour votre soutien tout au long de ce parcours dont je garde d'excellents souvenirs.

Merci à Nathalie De Noblet-Ducoudré (Directrice de recherches - CEA), à Vincent Dubreuil (Professeur des Universités – Université de Rennes), à Albin Ullmann (Maître de conférences HDR – Université de Dijon), à Sandra Rome (Maître de conférences – Université de Grenoble) et à Jean Santerre (Directeur du Pôle Végétal de la CRAN) d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse et d'évaluer ce travail.

Merci à Olivier Maquaire (Professeur des Universités – Université de Caen), directeur du laboratoire LETG-Caen pour m'avoir accueilli dans l'équipe de recherche mais, également pour sa rigueur permettant aux doctorants d'être intégrés dans les objectifs du laboratoire et de bénéficier d'une structure de qualité. Olivier, merci également pour les différents conseils lors de la préparation des enseignements de Licence en géomorphologie.

Derrière cette direction de thèse et de laboratoire, d'autres personnes sont intervenues dans des aspects plus techniques et sans qui ce travail n'aurait pas pu être accompli. Je tiens à les remercier chaleureusement pour leur expertise, leur disponibilité, leur gentillesse et leurs nombreux encouragements : Patrick Le Gouée (Maître de conférences – Université de Caen), Sophie Brunel-Muguet (Chargée de recherche HDR INRAE – Université de Caen) et Hervé Gaillard (Technicien de recherche INRAE Orléans - unité Science du sol). Patrick, merci de m'avoir initié aux mesures de terrain en pédologie, pour le partage de tes connaissances et pour tout le suivi de la partie relative aux sols. Hervé, merci d'avoir accepté de réaliser les mesures de pF sur mottes et d'avoir pris de ton temps pour vérifier les calculs du RUM. Sophie, merci de m'avoir fait découvrir avec enthousiasme ta passion pour l'agronomie et l'écophysiologie et d'avoir pris le temps de répondre à mes questions. Ta validation des concepts d'écophysiologie mobilisés dans la thèse a été essentielle.

Merci également à Marie-Paule Bataillé (Assistante-ingénieure – Université de Caen), Robert Davidson et Mohand Medjkane (Ingénieurs – Université de Caen). Marie Paule, merci de m'avoir expliqué, dans la bonne humeur, les protocoles de laboratoire et les analyses granulométriques. Bob (Robert), merci pour ton aide sur le terrain, pour les vadrouilles lors de la « tournée des stations » sur les routes de la Seules mais surtout pour l'ambiance conviviale que tu apportes à la salle des doctorants. Mohand, merci pour tes conseils sur l'utilisation de différents logiciels de travail et les petits passages de culture philosophique au détour d'un service.

Remerciements

Merci à Thibaut Preux (Maître de conférences – Université de Poitiers) et à Laura Pauchard (Ingénieure – Université de Caen) pour toutes les discussions enrichissantes sur les agrosystèmes. Merci aussi pour vos nombreux encouragements lors du master et pendant ce doctorat.

Je tiens également à remercier Bernard Delcaillau (Professeur des universités – Université de Caen) et Patrice Caro (Professeur des Universités – Université de Caen) d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi. Bernard, Patrice, merci pour votre bienveillance et vos nombreux encouragements.

Plus largement je tiens à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs de l'équipe pédagogique du département de géographie qui n'ont pas encore été cités : Jean-Michel Cador, Romain Reulier, Candide Lissak, Stéphane Costa, Daniel Delahaye, Maxime Marie, Michael Bermond, Etienne Walker, Jean-Marc Fournier, Fabien Guillot, David Gaillard, Pierre Bergel, Benoit Raoulx, Stéphane Valognes. Merci pour vos conseils, de m'avoir fait confiance dans le cadre des vacances et des deux demi-postes d'ATER ainsi que pour vos enseignements en Licence et en Master qui ont contribué à ma formation pour entrer en Doctorat.

Merci également aux personnels de l'UFR SEGGAT qui contribuent ou ont contribué à faciliter l'enseignement et la recherche : Blandine Parey, Julien Frérot, Didier Fontaine, Céline Riboulet, Chantal Tréangle, Karine Hermand, Françoise Clouet, Naïg Lescuyer, Carole Zouaoui, Nathalie Beaudégel, Corinne Mouchel, Judicaël Camus, Tony Grossin, Nicolas Lagrandie et Alexandra Delamotte. Un merci tout particulier à Nicolas Blampain, pilier de cartothèque, toujours présent dans la bonne humeur et disponible pour aiguiller les recherches d'ouvrages depuis ma première année de géographie.

Merci aussi aux climatologues-géographes rencontrés dans les colloques du CNFG et de l'AIC pour leurs conseils et leur bienveillance. Merci également aux membres de l'UMR LETG pour leurs conseils lors des séminaires des doctorants.

Je tiens également à adresser mes remerciements à la région Normandie qui a accepté de financer ce travail de thèse. Météo-France, le CNRS et l'IPSL pour la mise à disposition gratuite des données climatiques observées et modélisées. Merci également à Line Boulonne et Claudy Jolivet de l'unité Infosol de l'INRAE d'Orléans pour les données du RMQS1, ainsi qu'à Aurélien Noraz du CEN pour les données du RRP Haute-Normandie lorsque j'ai travaillé sur les plaines agricoles de l'Eure. Merci à Iñaki Garcia de Cortazar Atauri de l'unité AGROCLIM de l'INRAE d'Avignon pour avoir répondu à mes questions sur la modélisation des agrosystèmes lors de ma première année de thèse. Merci à la DREAL Normandie et plus particulièrement à Sandrine Hélicher de m'avoir fait confiance et intégré à l'équipe de travail du Profil Environnemental de Normandie mais également pour la convention ayant permis de financer une partie du travail de thèse. Merci à Émilie Chéron de la CRAN pour le partage des données de rendements.

Un grand merci chaleureux aux exploitants agricoles et techniciens productions végétales rencontrés au cours de mes années de master et de thèse pour leur collaboration. Je ne peux les nommer pour respecter l'engagement d'anonymat, cependant je pense bien à eux parce qu'ils m'ont permis d'acquérir des connaissances essentielles à mon sujet. Un grand merci tout particulier à Éric Lemarinier, que je peux nommer puisque l'on se connaît, pour toutes les discussions passionnantes sur le métier d'exploitant agricole, ses témoignages sur la plaine et pour avoir accepté que je puisse instrumenter une de ses parcelles de blé. Un grand merci aussi à Bernard Bugenne ayant également proposé l'ouverture d'une fosse pédologique sur son exploitation.

Une thèse dans un laboratoire de recherche, c'est aussi des moments de partage et de convivialité qui forgent des amitiés entre doctorants et jeunes docteurs. Il faut dire que la salle des doctorants du

Remerciements

GéoPhen sait vivre dans une bonne ambiance. Je me souviens encore de l'accueil de Romain lorsque j'ai découvert cette salle des doctorants et jeunes docteurs pour la première fois au début de mon Master 2 ... je venais seulement me renseigner sur la thèse, je ne savais pas encore que j'allais y passer plus de quatre années. Je garde un très bon souvenir des moments partagés, au labo mais aussi lors des soirées jeux de sociétés, spectacles, ballades, qui participent à rendre la thèse plus légère. Pour tous ces bons moments d'amitié et souvenirs, merci à : Arthur, Fanny, Axel, Thibaut, Romain, Olivier, Kevin, Vincent, Alissia, Mahefa, Bastien P, Guillaume, Thomas, Louis, Matthieu, Mohamed, Mathilde, Bastien S, Nada ainsi qu'à El Hadji et Élise des labos voisins. Merci aussi à tous les stagiaires et contractuels passés par le laboratoire et qui ont contribué à cette bonne ambiance, plus particulièrement Federico, JB, Chloé, Nina, Mégane et Florian.

Un très grand merci à ceux qui m'ont soutenu dans la dernière ligne droite, en scrutant les dernières coquilles ou en m'aidant dans la mise en page : mes parents, Anne-Marie, Blandine, Matthieu, Éline, Thibaut, Monique, Michel, Bastien et Guillaume. Votre aide a été très précieuse pour boucler ce manuscrit !

Merci à mes amis, qui m'ont soutenu de près ou de loin tout au long de ces quatre années. A ceux du lycée et d'autres horizons qui m'ont encouragé, pris des nouvelles régulières, pour les soirées, les promenades : Thomas et Quiterie, Mehdi et Estelle, Morgan et Céline, Maxence et Claire, Valentin, Hugo, Julia, Agatha et tous ceux qui se greffent à ce groupe. Merci également aux amis rencontrés au cours de mes années d'études en géographie et plus particulièrement à Augustin, Hélory, Vincent, Mélanie, Morgane, Cannelle, Ugo, Ludivine, Adeline, Margaux et Kamardine. Un grand merci également à Tristan (alias Alberto !), Dimitri, Fanny, Bernard et Sophie, toujours présents de par leurs nombreux encouragements et amitiés tout au long de la thèse (et même bien avant !). Et puis, il y a aussi les amis du vélo. Certes j'ai arrêté les compétitions il y a quelques années, mais il faudrait bien plus qu'une thèse pour m'empêcher de rouler dans la campagne Normande. Merci à Rémy et Pierre (longue vie à la Magicrème !), Laurent ainsi que Bastien. Merci pour les moments d'évasion, pour les encouragements et les séances blabla-ride. Merci aussi à Cédric pour les services rendus sur le vélo, parce que vraiment, ce sport a été un bel exutoire !

Un merci tout particulier à Augustin, Mélanie et Nathanaël. Augustin, Mel, un grand merci pour vos nombreux encouragements, les moments d'amitié et de m'avoir fait découvrir votre monde agricole. Gus, c'est quand même incroyable, on s'est suivi depuis la première année de licence jusqu'en master, au sein du laboratoire (toi comme ingénieur et moi en thèse) puis enfin sur l'exploitation agricole qui m'aura servie de repère durant la thèse !

Enfin, je tiens à remercier les membres de ma famille, plus particulièrement mes parents Serge et Catherine pour leur soutien infaillible. Papa, Maman, merci pour les valeurs que vous m'avez transmises, de m'avoir encouragé et soutenu tout au long de mes études. C'est en grande partie grâce à vous si j'ai mené à bien (je l'espère !) toutes ces années d'études. A mon frère Adrien et ma belle-sœur Léonie, merci pour tous vos encouragements et les moments partagés au cours de ces quatre années.

A tous je vous dois beaucoup. Merci.

François

Introduction générale

Cadre de l'étude et contexte scientifique

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires » (IPCC, AR5, 2014). Année après année, le diagnostic se confirme : l'amplitude et la rapidité des modifications climatiques actuelles sont d'origines anthropiques. Le sixième rapport du GIEC (IPCC, AR6, 2021), publié en août 2021, confirme une fois de plus ce constat et précise d'ailleurs que la décennie 2011-2020 est la plus chaude depuis 125 000 ans. Les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines ont engendré une augmentation de la température de 1,1 °C depuis la fin du 19^e siècle. Le seuil de 1,5 °C, aux conséquences graves et irréversibles (IPCC, 2018), devrait être atteint ou franchi sur les 20 prochaines années. Par conséquent, sans réduction immédiate des émissions de gaz à effet de serre, les accords de Paris relatifs à la COP21, visant à limiter le réchauffement à +2 °C, pourraient être hors de portée.

Ce changement climatique a et aura de multiples répercussions environnementales et sociétales : recul de la biodiversité, acidification des océans, hausse du niveau des mers, recul des glaces continentales, vagues de chaleurs extrêmes, allongement des saisons chaudes et réduction des saisons froides, précipitations plus intenses et modification de leur répartition, risques sanitaires, insécurité alimentaire, moindre accès aux ressources en eau, instabilités politiques, migrations, conflits, etc. L'agriculture, dépendante des conditions météorologiques et dont le rôle est central dans nos sociétés de par sa vocation nourricière, est au cœur des enjeux relatifs au changement climatique. Elle le subit déjà dans plusieurs régions du monde. Les productions agricoles deviennent incertaines alors que la population mondiale croît et devrait atteindre 10 milliards d'individus en 2050 (FAO, 2018).

Le blé tendre fait partie des cultures sur lesquelles reposent la sécurité alimentaire mondiale. Cette céréale est la première source d'alimentation humaine devant le riz et le maïs (Le Stum, 2017). En effet, 70 % des productions sont destinées à l'alimentation humaine et c'est l'aliment de base pour 40 % de la population planétaire. Historiquement, le blé occupe une place importante dans nos sociétés occidentales puisqu'il est à l'origine du développement agricole (-10 000 BP dans le « croissant fertile ») et des civilisations antiques méditerranéennes dont l'alimentation des populations s'est structurée autour de cette plante. Mais l'uniformisation des régimes alimentaires,

en lien avec le processus de mondialisation au cours des 60 dernières années, a participé à renforcer la dépendance de nombreux autres pays envers cette culture (Charvet, 2004). Les 5 premiers pays producteurs, dont la France, détiennent 50 % de la production mondiale, alors que 75 % des pays sont importateurs de blé pour satisfaire leur demande alimentaire. Pour y parvenir, les rendements des céréales devront, à l'échelle globale, augmenter de 1,5 % par an alors que la trajectoire actuelle n'est que 0,6 % par an (Charmet et Vallius, 2017) et qu'une stagnation concerne déjà 36 % des surfaces mondiales de blé en Europe, en Inde et en Chine (Ray et al., 2012). En France, cette stagnation est principalement liée à une augmentation des jours d'échaudage thermique pendant le remplissage des grains et du déficit hydrique au cours de la montaison (Gate, 2009 ; Gate et al., 2010 ; Brisson et al., 2010).

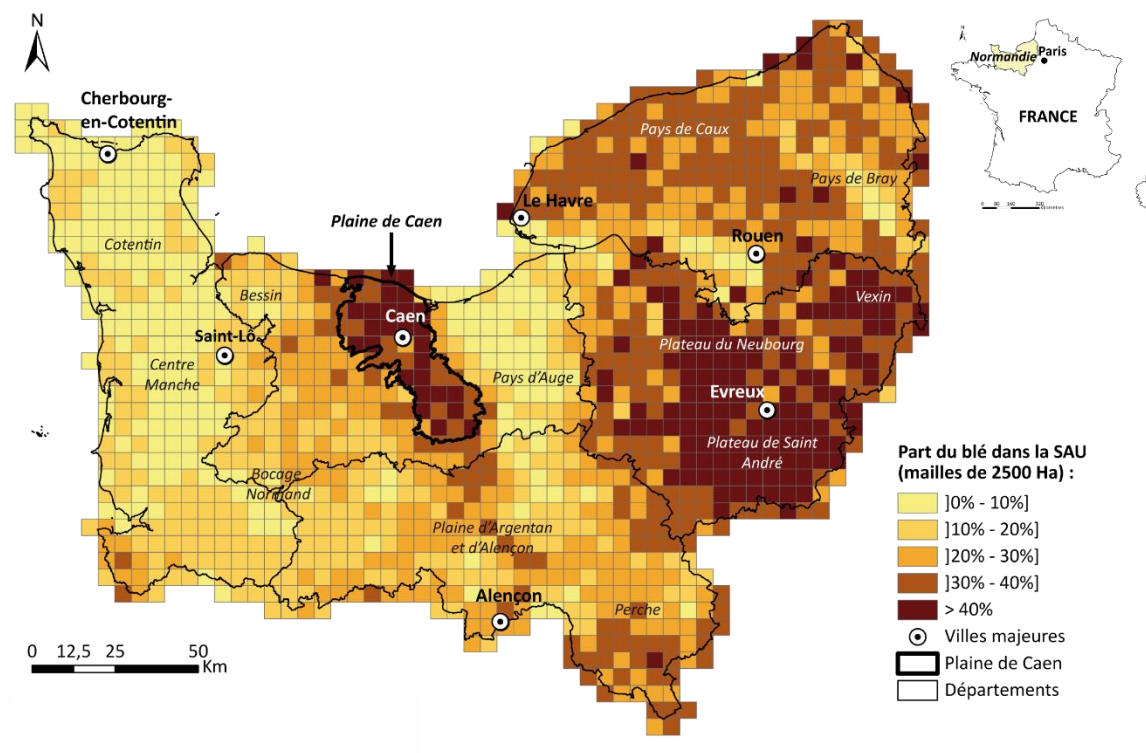
Outre la question de l'insécurité alimentaire, celle de la pérennité de certains modèles agricoles se pose également.

C'est dans ce cadre que le projet de thèse s'intéresse aux conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre (*Triticum aestivum*) d'hiver en Normandie, région qui contribue à l'approvisionnement du grenier à blé français. La France est le 5^e pays producteur de blé (37 Mt) dans le monde et le 4^e exportateur (19 Mt ; données FranceAgriMer). La première moitié des productions participe à satisfaire la demande intérieure. L'autre moitié est exportée, principalement depuis le port normand de Rouen, à destination des pays du Maghreb et de l'Égypte pour l'alimentation humaine, et participe de ce fait à la stabilité politique des pays du pourtour méditerranéen (Abis, 2015). Le blé occupe donc une place importante dans la position de la France au sein de l'organisation des relations internationales mais également dans l'économie de son agriculture nationale et en régions. À l'échelle nationale, la céréaliculture recense 300 000 exploitations spécialisées et génère, de la production à la seconde transformation, 440 000 emplois (données FranceAgriMer) pour une valeur ajoutée hors subvention de 10 milliards d'€, soit 14 % de toutes les productions agricoles confondues hors services (données INSEE). En Normandie, la filière compte 35 000 exploitations productrices de céréales et 26 000 emplois, pour une valeur ajoutée de 1,1 milliard d'€. La région dispose de grandes plaines céréalières où le blé occupe parfois jusqu'à plus de 50 % de la Surface Agricole Utile (SAU). La Plaine de Caen, espace d'étude retenu pour cette recherche, constitue à ce titre une région agricole emblématique de la céréaliculture régionale (**Figure 1**).

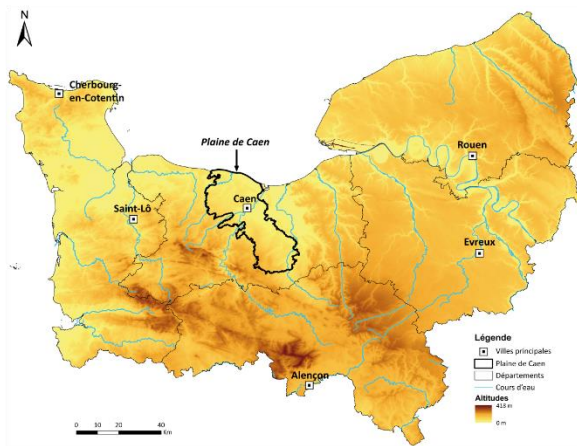
Face à ces enjeux à différents niveaux scalaires, la viabilité du modèle économique agricole et de l'ensemble de la filière céréalière en France et en région, la recherche scientifique accorde, depuis plusieurs années de l'intérêt aux études d'impacts prospectives. Elles permettent d'exposer les conséquences attendues du changement climatique sur l'agriculture, justifiant de ce fait la nécessité de la mise en place de politiques climatiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais également pour envisager concrètement l'adaptation des agrosystèmes afin de les rendre résilients. Ces études se sont développées à partir des années 2000 pour plusieurs régions du monde, en couplant des modèles de culture et des modèles climatiques, en mobilisant différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (Harrison et Butterfield., 1996 ; Tubiello et al., 2002 ; Ju et al., 2005 ; Luo et al., 2005 ; Zhang et Liu., 2005 ; Magrin et al., 2009 ; Wang et al., 2009 ; Guo et al., 2010 ; Liu et Tao., 2012 ; Thaler et al., 2012 ; Sommer et al., 2013 ; Tao et Zhang, 2013 ; Vashist et al., 2013 ; Asseng et al., 2014 ; Kumar et al., 2014 ; Semenov et al., 2015 ; Webber et al., 2018 ; Senapati et al., 2019 ; Qian et al., 2019 ; Wang et al., 2020).

Figure 1 : Localisation de l'espace d'étude

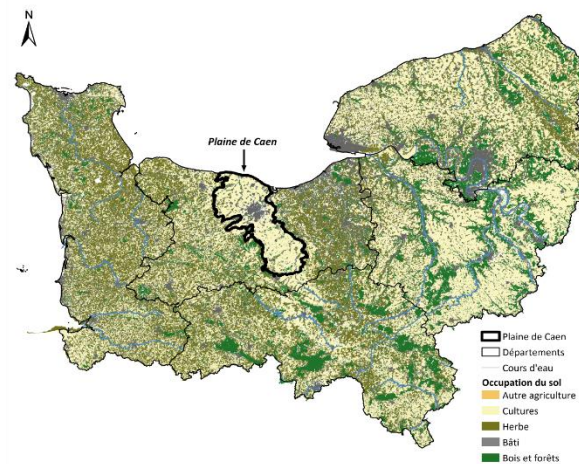
A. Localisation de la Plaine de Caen dans les surfaces en blé tendre de Normandie



B. Localisation de la Plaine de Caen dans la topographie régionale



C. Localisation de la Plaine de Caen dans l'occupation du sol régionale



Réalisation : François Beauvais, 2019.
Données RPG 2016 de l'ASP ; BD Topo et MNT 2016 de l'IGN.

Les résultats qui en ressortent pour le blé sont variables, parfois même contradictoires, en raison de leurs structures et paramétrages différents (Guo et *al.*, 2010 ; Asseng et *al.*, 2015). Pour Wilcox et Makowski (2014), il s'agit principalement des effets opposés de la température, des précipitations et de la concentration en CO₂ sur les rendements de cette céréale. Mais ces deux auteurs exposent, après méta-analyse de 90 études, qu'à partir d'une élévation de la température de +2,3 °C, plus de 50 % des variations de rendements seraient négatives. En France, malgré l'augmentation des jours de chaleur et du déficit hydrique, le projet CLIMATOR (2007-2010) simule une hausse des rendements pour plusieurs régions grâce à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. D'après Asseng

et *al.* (2013), les incertitudes relatives aux modèles de culture sont supérieures à celles issues des modèles climatiques. Ces modèles de culture tendent par ailleurs à ne pas toujours intégrer la plupart des conditions météorologiques défavorables (Asseng et *al.*, 2015). Des études complémentaires issues des données météorologiques sont alors recommandées pour compléter les diagnostics, en considérant des indicateurs climatiques pour lesquels l'évolution ou le dépassement de seuil renvoient à des pertes de production. La plupart du temps ces indicateurs agroclimatiques sont calculés sur des dates invariantes du calendrier correspondant aux grandes périodes sur lesquelles les phases phénologiques sont susceptibles de se dérouler. Néanmoins, certaines recherches ont démontré l'intérêt de greffer ces indicateurs sur la simulation de la phénologie pour s'approcher au plus près des conditions vécues par la plante (Gate, 1995 ; Gate et *al.*, 2008 ; Gate et *al.*, 2010 ; Mkhabela et *al.*, 2010 ; Holzkämper et *al.*, 2011 ; Gouache et *al.*, 2012 ; Holzkämper et *al.*, 2013 ; Trnka et *al.*, 2014 ; Caubel et *al.*, 2015 ; Caubel et *al.*, 2017 ; Beauvais et *al.*, 2019a ; 2019b ; Beauvais et *al.*, 2020a ; 2020b). Pour les dissocier de ceux calculés sur des dates fixes du calendrier, ces indicateurs sont appelés « phénoclimatiques » (Gate, 1995 ; Gate et *al.*, 2010) ou « écoclimatiques » (Caubel, 2015). Jusqu'à présent, à l'exception des publications et communications associées à ce travail de thèse aucune recherche de ce type n'a été menée en Normandie. Il y a bien eu des recherches prospectives en climatologie, principalement sur l'évolution du contexte biopédoclimatique (Cantat et *al.*, 2009 et 2010 ; Le Gouée et *al.*, 2010 ; Lamy et *al.*, 2012), notamment dans le cadre du projet CLIMASTER, mais elles n'étaient pas spécifiques à une plante et à un système de culture en particulier. D'ailleurs, aucune thèse de climatologie n'a encore été menée jusqu'à présent sur le changement climatique en Normandie. À la fin de l'année 2019, un GIEC Normand a été créé par la région Normandie et a lancé inventaire des travaux existant sur le sujet à l'échelle régionale. Ce groupe de travail met également en avant le besoin de recherche urgent sur les conséquences du changement climatique en Normandie.

Posture, problématique et objectif de la recherche

Ce constat d'un besoin de recherche nous amène à la construction du projet de thèse. Le bref état de l'art présenté dans le paragraphe précédent dresse l'inventaire des travaux sur les conséquences du changement climatique pour la culture du blé tendre, menés par des modélisateurs et écophysiolistes. Les climatologues-géographes n'ont pas encore investi ce champ de recherche alors même qu'il correspond à leurs compétences. En effet, la discipline est en mesure de produire des études d'impacts à différentes échelles spatiales et temporelles, en mobilisant des outils et des méthodes spécifiques, des approches systémiques et pluridisciplinaires, en questionnant plus largement le devenir des agrosystèmes et des territoires à l'interface nature/société. Cette recherche, adossée aux laboratoires CNRS LETG-Géophen et ESO de l'Université de Caen Normandie, se réclame donc de la climatologie géographique et de la géographie agricole, au croisement entre l'écophysologie et la modélisation du climat. Par conséquent, elle s'inscrit dans la continuité des recherches en géographie appliquée au changement climatique (Lamarre, 2013) telles que les études prospectives menées sur l'évolution des contextes biopédoclimatiques (Cantat et *al.*, 2009 et 2010 ; Le Gouée et *al.*, 2010 ; Lamy et *al.*, 2012 ; Lamy et Dubreuil, 2013 ; Lamy, 2013 ; Dubreuil et *al.*, 2018) ou plus particulièrement sur les vignobles (Briche et *al.*, 2010a ; 2010b Briche, 2011 ; Briche et *al.*, 2014 ; Bonnefoy et *al.*, 2010 ; Bonnefoy, 2013 ; Quenol et Bonnardot, 2014 ; Quenol et *al.*, 2014 ; Quenol et *al.*, 2017 ; Bonnardot et Quenol, 2020a) ou les pommiers (Dubreuil et *al.*, 2019).

L'objectif de cette recherche est de mettre en évidence les vulnérabilités et les opportunités pour l'agriculture céréalière de demain en Normandie. La finalité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour la recherche mais également de fournir des connaissances sur les conséquences du changement climatique sur la céréaliculture normande, afin que la profession agricole puisse identifier des stratégies d'adaptation de façon à la rendre résiliente (aide à la décision).

Quatre questionnements principaux sous-tendent le projet de recherche. Ils sont à la fois d'ordre géoclimatique, agroclimatique, pédoclimatique, agronomique, économique et comportemental :

- quels sont les aléas climatiques auxquels la céréaliculture pourrait être exposée ?
- les indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques amènent-ils aux mêmes conclusions ?
- les modes de pensées sont-ils adaptés à ce changement ?
- la culture du blé sera-t-elle toujours possible et/ou rentable aux horizons 2050 et 2100 ?

Ainsi, la problématique de ce projet de recherche se structure autour de l'agriculture et du changement climatique en Normandie pour les systèmes céréaliers : **quels sont les enjeux et les perspectives pour l'agriculture de demain centrée autour du blé tendre ?**

Avant d'entamer la recherche, des hypothèses sont énoncées. Elles sont formulées à la suite des résultats des études présentées dans l'état de l'art et d'un mémoire de master 1 ayant posé l'évolution du contexte agroclimatique (Beauvais, 2016). Cette recherche modélisant l'exposition du système de culture du blé tendre aux aléas climatiques, replacée plus largement dans la lecture des enjeux changement climatique/agriculture des agrosystèmes céréaliers, se doit de vérifier ces hypothèses :

- Le changement climatique est un facteur limitant pour la culture du blé tendre ;
- Le changement climatique engendrera dans les prochaines décennies une fragilisation des systèmes de production, même si des opportunités pourront éventuellement être saisies ;
- Les principaux aléas attendus sur le cycle du blé sont l'augmentation des stress de fin de cycle (échaudage et déficit hydrique) ou encore un déficit de vernalisation (hivers doux) ;
- L'adaptation n'est pas encore envisagée concrètement.

Données et méthodes pour la recherche

Cette recherche s'appuie les données observées des stations Météo-France et du modèle SAFRAN ainsi que celles issues des simulations CNRM-2014 - disponibles lorsque la thèse a débuté - extraites du modèle ALADIN-Climat (Spiridonov et *al.*, 2005) d'une résolution de 8 x 8 km et disponibles sur le portail *Drias Les futurs du climat* (<http://www.drias-climat.fr> ; Ouzeau et *al.*, 2014). Elles sont ensuite traitées dans le cadre d'une approche agroclimatique classique à dates invariantes, puis elles sont mobilisées pour des simulations bioclimatiques calculant les indicateurs sur les périodes phénologiques du cycle du blé tendre sur une période historique (1961-2020) et future (2021-2050 et 2071-2100) selon trois scénarios RCP. Des relevés de terrain, en pédologie, permettent de calculer les capacités de rétention en eau des sols pour les techniques d'analyse du bilan hydrique et d'autres, en climatologie, exposent les variations de températures à échelles fines. Une approche qualitative est également menée dans le cadre d'une enquête de terrain par entretien auprès des exploitants agricoles et techniciens de la Plaine de Caen.

Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit s'articule en 3 parties subdivisées en 8 chapitres.

La première partie présente une contextualisation de la problématique changement climatique et céréaliculture. Le chapitre 1 propose une mise en contexte géographique et économique du blé tendre en s'attachant aux enjeux relatifs à cette culture par emboîtement d'échelle : globale, nationale et régionale. Il analyse la place importante qu'occupe le blé tendre dans les plaines agricoles régionales reliées au reste du monde puisqu'elles s'inscrivent dans une agriculture globalisée. Le chapitre 2 quant à lui, expose les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et les changements climatiques observés et simulés, du global jusqu'à la région Normandie. Le chapitre 3 aborde les données et les méthodes mobilisées dans le cadre de ce travail de thèse.

La deuxième partie s'attache aux résultats de la thèse qui concernent les évolutions climatiques observées (1961-2020) et simulées (horizons 2050 et 2100), appliquées à la céréaliculture. Le chapitre 4 expose l'adaptation de l'agriculture aux conditions locales (sols et climat), et pose la question de l'inquiétude des céréaliers face au changement climatique. L'exploitant livre également dans le même temps ses observations et les aléas impactant les productions et les pratiques agricoles. Le chapitre 5 dresse les grandes évolutions agroclimatiques sur la période 1961-2020 et pour les Normales climatiques 2021-2050 et 2071-2100. Le chapitre 6 s'intéresse aux mêmes plages temporelles mais en recourant à des indicateurs phénoclimatiques pour calculer l'occurrence des aléas sur les périodes où la plante y est sensible, phases susceptibles de varier selon les années en raison de la variabilité interannuelle du climat, mais également sur le long terme en réponse à l'élévation de la température.

La troisième partie propose la discussion et la duplication de la méthode à d'autres espaces et une autre culture. Le chapitre 7 s'intéresse à la diversité de climat de la Plaine de Caen et aux échelles fines en présentant notamment les résultats de campagnes de terrains mettant en lumière des contrastes de températures qui ne peuvent pas être perçues à la résolution des mailles du modèle climatique régional. Enfin le chapitre 8 pose la question des conséquences du changement climatique sur le blé tendre en France afin d'évaluer la situation de la Plaine de Caen par rapport aux autres grandes régions céréalières. La méthode est également dupliquée au lin fibre de printemps, culture disposée en tête d'assolement dans les rotations culturales en Normandie.

Partie 1

Changement climatique et céréaliculture : contextualisation, état de l'art et méthodologie

Introduction

S'intéresser aux conséquences du changement climatique sur la céréaliculture nécessite de connaître les grands enjeux agricoles qui s'expriment à différentes échelles. Le blé en constitue un parfait exemple. Culture mondiale, elle est cultivée en France dans des régions qui figurent parmi les plus productives du globe. Les productions étant excédentaires à la demande, elles sont en partie internationalisées. Celles de la région Normandie s'inscrivent dans ce contexte. De ce fait, la Normandie agricole est connectée et liée au reste du monde. L'agrosystème régional s'inscrit alors dans l'agrosystème mondial dont l'objectif principal est de nourrir une partie de la planète. Il s'agit donc là du plus grand débouché de la filière céréalière française dont la Normandie contribue de façon non négligeable. Pour continuer à satisfaire ses objectifs, l'agriculture se doit d'être résiliente au changement climatique qui constitue en France comme partout ailleurs un facteur limitant aux rendements depuis trois décennies.

Ce changement climatique s'aborde également à plusieurs échelles spatio-temporelles. C'est à l'échelle planétaire que s'observe la rétroaction positive du forçage radiatif engendrant une modification du bilan énergétique dont résultent les changements climatiques dans les différentes régions du globe. C'est également à ce niveau scalaire que la compréhension du système climatique et de ses interactions permet de simuler l'évolution des paramètres qui le caractérisent selon différents niveaux de concentrations gaz à effet de serre (pour le futur). En France, la Normandie pourrait apparaître comme une région relativement épargnée en raison de son climat tempéré océanique. Pourtant, un changement climatique est observé et pourrait, selon les projections climatiques régionalisées les plus pessimistes, se poursuivre de façon prononcée, en exerçant de ce fait une pression croissante sur la céréaliculture des prochaines décennies.

Pour s'adapter, la filière agricole a besoin de résultats de recherche, dont les connaissances constituent des aides à la décision. Une première phase consiste à étudier les systèmes auxquels on s'intéresse et effectuer un bilan des évolutions observées sur une période historique. Mais pour envisager le futur, le climatologue mobilise les données issues de projections climatiques. Le développement des modèles régionaux et l'accessibilité aux données a favorisé l'émergence d'études d'impacts prospectives depuis une quinzaine d'années. Outre la contextualisation, cette première partie propose une revue de littérature des principales recherches menées sur le changement climatique et le blé tendre dans le monde, en France et en Normandie. Les concepts et la posture épistémologique mobilisés pour mener cette thèse de doctorat sont présentés. Ils donnent les éléments de réflexions et de lecture, entre géographie humaine et géographie physique et environnementale, qui permettent de penser l'objet d'étude, et plus largement les systèmes identifiés. Ils aboutissent à une démarche méthodologique qui fait sens, couplant à la fois des outils et des méthodes du géographe-climatologue mais également de l'écophysiologiste et de l'agronome.

Chapitre 1

Le blé : une céréale au centre d'enjeux à différentes échelles

Introduction

Le blé est une céréale ancienne et toujours au cœur de l'actualité en raison des soubresauts des marchés mondiaux, des récoltes, de la sécurité alimentaire, etc. Cultivée pour la première fois il y a plus de 10 000 ans en Mésopotamie, cette céréale a peu à peu conquis le monde jusqu'à devenir la plante cultivée la plus présente dans le monde. L'essentiel des productions est dédié à l'alimentation humaine et son rôle est central pour satisfaire la demande alimentaire mondiale. Produit agricole le plus échangé au monde, il est au centre d'enjeux sociaux, économiques et plus largement géopolitiques. La France fait partie des plus grands producteurs et exportateurs de blé puisqu'elle se classe respectivement aux 4^e et 5^e rangs mondiaux (**Figure 2**). La filière céréalière est organisée, l'exploitant bénéficie d'un soutien technique afin de produire en quantité tout en répondant à des critères qualitatifs que ce soit pour garantir les exportations que les débouchés intérieurs (panification, biscuiterie, alimentation pour le bétail, ...). Ces dynamiques sont au centre des plaines agricoles de Normandie où la céréaliculture occupe une place importante et dont la contribution au grenier à blé français est loin d'être négligeable (10 %).

Pour comprendre la place qu'occupe le blé tendre dans nos sociétés, et par conséquent dans les plaines agricoles normandes, une mise en contexte historique, géographique et économique est nécessaire. Ces éléments sont abordés par emboîtement d'échelles : mondiale, nationale et régionale.

Figure 2 : Chargement en blé d'un cargo au port de Rouen



1.1. Les enjeux alimentaires, économiques et géopolitiques du blé dans le monde

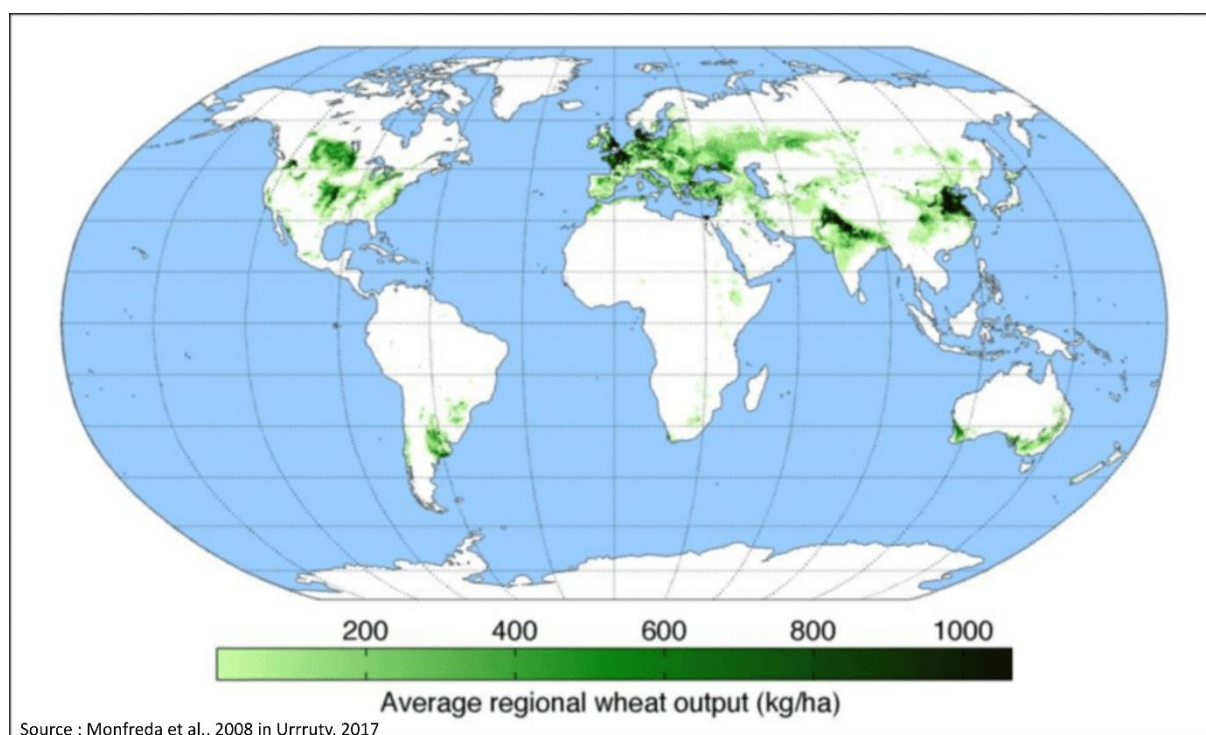
Les plaines agricoles de Normandie participent aux enjeux mondiaux du blé tendre. Ce constat s'effectue tant dans le discours des agriculteurs, justifiant l'agriculture intensive pour « *nourrir le monde* » tout en scrutant les cours mondiaux du blé, que dans le paysage ouvert qui reflète la productivité avec ses silos de stockage des productions, prêtes à être expédiées vers le Maghreb ou la Chine via les ports de Caen et de Rouen. Ces plaines sont le reflet d'une céréaliculture française résolument tournée vers l'exportation des grains. Pour comprendre ces dynamiques, il convient d'abord de présenter les enjeux mondiaux de cette céréale.

1.1.1. La plante cultivée la plus spatialement répandue dans le monde

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) est né il y a 10 000 ans lors de la naissance de l'agriculture dans le « croissant fertile », qui permettra ensuite l'émergence de la civilisation occidentale (Lev-Yadun et al., 2000). Il résulte du croisement entre un blé tétraploïde et d'une graminée sauvage (Bonjean, 2001). Cette céréale s'est ensuite diffusée au cours du temps en apparaissant vers : -5 000 en Europe en passant par le nord du bassin méditerranéen ; -6000 en Afrique via l'Égypte ; - 6500 en Asie par la route de la soie. Il apparaît plus tardivement en Amérique et en Australie, respectivement au XV^e et à la fin du XVIII^e, soit à l'époque des grandes découvertes et colonisations (Bonjean, 2001 ; Le Stum, 2017). Si le blé occupe une place importante dans nos sociétés occidentales, c'est qu'il a été à l'origine du développement agricole et des civilisations antiques méditerranéennes dont l'alimentation des populations s'est structurée autour de cette plante (Abis, 2015). Il a ensuite gagné le monde jusqu'à devenir aujourd'hui une céréale incontournable dans les régimes alimentaires planétaires.

D'après Le Stum (2017) le blé occupe 38 % des terres arables disponibles dans le monde. On le retrouve à différentes latitudes, de 57° Nord en Russie à 47° Sud en Argentine (**Figure 3**). Présent sur tous les continents à l'exception de l'Antarctique, du niveau de la mer jusqu'à 4500 m d'altitude (Tibet), le blé est cultivé sous différents climats. Les meilleurs rendements sont observés en milieu tempéré mais on le rencontre également en domaine méditerranéen ou subtropical. Ceci peut s'expliquer par sa physiologie et sa génétique qui se caractérisent notamment par l'existence d'un grand nombre de cultivars, près de 20 000, issus de divers croisements au cours du temps. Seul le blé dispose de variétés d'hiver, de printemps ou alternatives. Cette adaptabilité ne se retrouve pas chez les deux autres céréales majeures : le riz et le maïs. D'ailleurs, les surfaces qui leurs sont consacrées à l'échelle mondiale, respectivement de 167 et 157 Mha (millions d'hectares) sont inférieures à celles du blé (217 Mha) sur la période 2000-2019 (données FAOSTAT). Au total, 120 pays produisent du blé.

Figure 3 : Localisation des cultures de blé tendre et leur rendement dans le monde

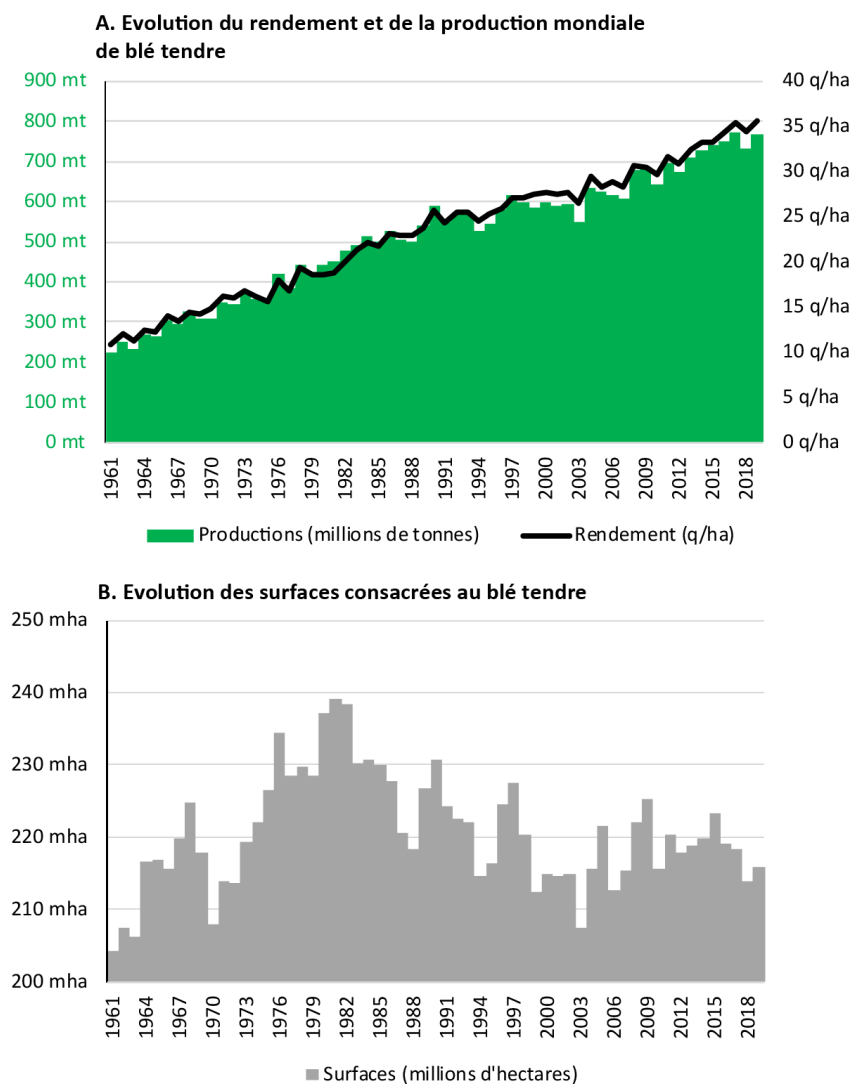


1.1.2. L'augmentation de la production mondiale pour satisfaire la demande alimentaire

Sur la période 2000-2019, d'après les données FAOSTAT, environ 670 Mt (millions de tonnes) de blé sont produites chaque année. En termes de masse, c'est la quatrième culture mondiale derrière le sucre de canne (1640 Mt), le riz (1130 Mt) et le maïs (865 Mt). Cette moyenne est même de 752 Mt sur les cinq dernières années puisque la tendance est à la hausse, sans interruption majeure depuis les années 1960 (**Figure 4 A**). Un léger ralentissement à partir des années 1990 est toutefois observé jusqu'au milieu des années 2000. Les productions ont été multipliées par près de 2,5 en 60 ans, passant d'un peu plus de 220 à 766 Mt (**Figure 4 A**). Les surfaces consacrées au blé s'élèvent à 217 Mha (millions d'hectares) sur les 19 dernières années (**Figure 4 B**). Elles ont d'abord augmenté de manière significative, de 205 à près de 240 Mha (+17 %) de 1961 à 1979. Elles reculent (-10%) jusqu'au début des années 2003 pour revenir à un niveau équivalent à celui des années 1960 malgré une variabilité interannuelle importante (**Figure 4 B**). Une légère augmentation est ensuite constatée au cours de la seconde partie des années 2000. Cependant, elle ne se confirme pas ensuite compte tenu de l'augmentation des surfaces en maïs et soja. Si les productions ont augmenté c'est surtout grâce à l'amélioration des rendements mondiaux¹ qui ont triplé, passant de 11 à 35 q/ha (quintaux à l'hectare) de 1961 à 2019 (**Figure 4 A**).

¹ Historiquement, l'accroissement des productions agricoles a été permis par l'augmentation des surfaces cultivées au cours du 19^e siècle, notamment par le défrichement de dizaines de millions d'hectares pour créer de nouvelles terres agricoles par des agriculteurs européens venus cultiver les dits « pays neufs » (Etats-Unis, Canada, Argentine, Brésil, Afrique du Sud et du Nord, Australie et Nouvelle-Zélande, Russie méridionale). Depuis les années 1960 ce sont les rendements qui permettent l'augmentation des productions. Si des zones du globe continuent à être défrichées, les surfaces totales augmentent peu à cause des pertes annuelles liées à l'érosion des sols, l'épuisement des sols, la salinisation liée à une mauvaise gestion de l'irrigation ou encore l'étalement urbain (Charvet, 2018).

Figure 4 : Rendements, production mondiale (A) et surfaces en blé (B) depuis 1961



Ces évolutions s'expliquent par une agriculture ayant gagné en productivité (a) pour répondre à la demande alimentaire croissante², mais également en raison d'une modification des régimes alimentaires tendant à l'uniformisation (b) :

- (a) Le plan Marshall financé par les Etats-Unis (1947) permet la mécanisation et la motorisation de l'agriculture de l'Europe de l'ouest. Le tracteur remplace la charrue tirée par les bœufs et les chevaux. Des terres auparavant destinées à l'élevage sont converties en labour. En 1962, la PAC (Politique Agricole Commune) vise l'autonomie alimentaire du continent par l'intermédiaire de diverses subventions aux exploitations agricoles, l'organisation des marchés agricoles et encourage notamment le recours aux fongicides. Elle favorise la productivité agricole qui se caractérise par une hausse des rendements. Dans le même temps, la sélection et la création variétale permettent le recours à des variétés plus productives moins vulnérables aux maladies et supportant des niveaux de fertilisation

² La population mondiale a augmenté de +207 % de 1950 à 2020 passant de 2,5 à 7,8 milliards de personnes d'après les données de l'ONU (Organisation Mondiale des Nations Unies).

élevés. Elles sont moins sensibles à la verse³ grâce à l'introduction de gènes de nanismes issus de blés nains japonais raccourcissant les pailles (variété Norin 10 - Le Stum, 2017). Pour garantir leur haut potentiel ces variétés exigent d'importantes quantités d'intrants industriels⁴. L'utilisation des nouvelles variétés à haut rendement et le recours aux engrais (azotés, phosphatés et potassiques), aux produits phytosanitaires (herbicides, fongicides et insecticides) et à l'irrigation caractérisent la deuxième révolution agricole⁵ (Charvet, 2004). Dans les pays en développement tels que ceux de l'Asie du Sud-Est ou le Mexique, les mutations vers une agriculture intensive caractérisent la « révolution verte » favorisée par la mise en place de politiques agricoles fortes (Charvet, 2018). L'Afrique subsaharienne en revanche reste sur une agriculture en terrains sec. Le manque d'organisation étatique et d'encadrement n'a pas permis la diffusion des innovations (Charvet, 2004), l'augmentation des productions étant surtout liée à une hausse des surfaces cultivées (Neveu, 2017). Depuis les années 2000, les pays de la Mer Noire (Russie, Ukraine, Kazakhstan) augmentent leurs productions, conséquence de la chute de l'URSS et de l'exploitation des anciens grands domaines kolkhozes et sovkhoses (Charvet, 2018).

- (b) Comme le précise Charvet (2004) le développement de l'élevage industriel de porcs et de volailles dans plusieurs régions du globe a participé à l'augmentation de la demande en blé tendre. En effet, ces animaux monogastriques sont nourris à partir de céréales, farines ou tourteaux issus de graines oléagineuses. Dès les années 1990 le blé est également mélangé au soja (provenant des Etats-Unis et du Brésil) dans la fabrication d'aliments pour le bétail. Par ailleurs, les régimes alimentaires se sont uniformisés lors des dernières décennies, en lien notamment avec le processus de mondialisation. L'aide alimentaire provenant des Etats-Unis et de l'Union européenne à destination des pays pauvres est principalement composée de blé et de farines de blé. Par conséquent, la consommation de produits à base de blé a augmenté en Afrique et Asie alors même que leur régime alimentaire était fondé auparavant sur les tubercules et le riz. Les nouvelles habitudes alimentaires des villes font concurrence à l'agriculture locale, rendant ces pays une fois de plus dépendant des céréales produites par les pays riches. Dans le même temps, un nouveau modèle alimentaire provenant d'Amérique du Nord apparaît dans les principales villes du monde avec la restauration rapide, dont les denrées sont en grande partie issues de céréales. Les Trente Glorieuses dans les pays développés favorisent l'apparition d'une consommation de masse et l'émergence de la grande distribution.

Les rendements sont très contrastés à l'échelle globale. Charvet (2018) rappelle qu'ils varient de 1 à 1000 par unité de main-d'œuvre. En Afrique du Nord et du Proche-Orient, la céréaliculture attelée pour des exploitations de quelques dizaines d'hectares ne permet pas de produire plus d'une centaine de quintaux par travailleur. Pour les pays ayant des exploitations pouvant dépasser les 100 q avec puissance mécanique, ce sont 10 000 q qui sont produits par travailleur. Ainsi, ces éléments se matérialisent dans le paysage agricole et la taille des exploitations. Le blé est alors cultivé dans de grandes plaines céréalières sous les latitudes tempérées. Ces sont les Wheat Belts des Etats-Unis, la prairie canadienne, la Pampa d'Argentine, les plaines de l'Ukraine et du sud de la Russie ou

³ Des hauts niveaux de fertilisation azotés peuvent engendrer la verse du blé.

⁴ Des fertilisations importantes peuvent engendrer des maladies.

⁵ La première révolution agricole est attribuée à la fin des jachères à la fin du Moyen Âge. Une révolution agricole correspond à des mutations importantes sur des périodes longues (Charvet, 2004).

encore de l'Europe tel que le Bassin parisien en France. En Inde du Nord, Chine du Nord et dans le Bassin méditerranéen, ce sont principalement de petites exploitations qui produisent le blé.

Cette céréale constitue aujourd'hui « la première source d'alimentation humaine devant le riz et loin devant le maïs » (Le Stum, 2017). En effet, 70 % des productions de blé y sont dédiés et c'est l'aliment de base pour 40 % de la population mondiale. On le retrouve notamment en Europe, au Proche-Orient, en Asie centrale et du Nord-Est, en Amérique du Nord ou en Australie pour la confection de « grains mondés, farines, pains, biscuits, pâtisseries, nouilles, soupes, barres céréalières, etc. » (Le Stum, 2017). Toutefois, la tendance à l'uniformisation des régimes alimentaires n'empêche pas la persistance de traditions et d'habitudes alimentaires héritées (Charvet, 2004). Pour la consommation des céréales elles correspondent à leur aire de domestication et de première diffusion (Charvet, 2018). Ainsi le riz reste très largement consommé en Asie et compose 50, voire 75% des rations alimentaires, le maïs en Amérique latine, le mil dans l'Afrique sahélo-soudanienne, le blé pour le Proche-Orient et l'Europe.

Le blé joue un rôle primordial dans la sécurité alimentaire mondiale. Les quantités produites dans les prochaines décennies seront essentielles pour répondre aux besoins alimentaires d'une population en augmentation. Toutefois, les rendements stagnent dans certaines régions du globe en raison du changement climatique. C'est le grand défi du XXI^e siècle pour l'agriculture qui devra parallèlement répondre à des critères de durabilité tout en produisant assez pour nourrir le monde (voir partie 1.1.6).

1.1.3. Les principaux acteurs du marché du blé : producteurs, exportateurs et importateurs

Les premiers pays producteurs de blé tendre (**Tableau 1**) dans le monde sur la période 2000-2019 sont par ordre décroissant⁶ : la Chine (114 Mt), l'Inde (82 Mt), les Etats-Unis (57 Mt), la Russie (54 Mt) et la France (37 Mt). Ils détiennent la moitié des productions mondiales.

Tableau 1 : Les plus grands producteurs de blé tendre dans le monde (surface et rendement associés)

Pays	Classement	Production moyenne (t)	Part dans la production mondiale (%)	Surface (ha)	Rendement (q/ha)
Chine	1	114 102 705	17,0	23 981 528	47,5
Inde	2	82 623 523	12,3	28 357 716	29,0
Etats-Unis	3	56 910 788	8,5	19 083 543	29,9
Russie	4	54 326 161	8,1	24 264 041	22,1
France	5	36 963 493	5,5	5 267 154	70,2
Canada	6	26 638 462	4,0	9 526 735	28,0
Allemagne	7	23 362 972	3,5	3 123 407	74,7
Pakistan	8	22 740 485	3,4	8 667 379	26,2
Australie	9	22 066 403	3,3	12 392 672	17,8
Ukraine	10	20 617 074	3,1	6 203 605	33,0

François Beauvais, 2020 (données FAOSTAT)

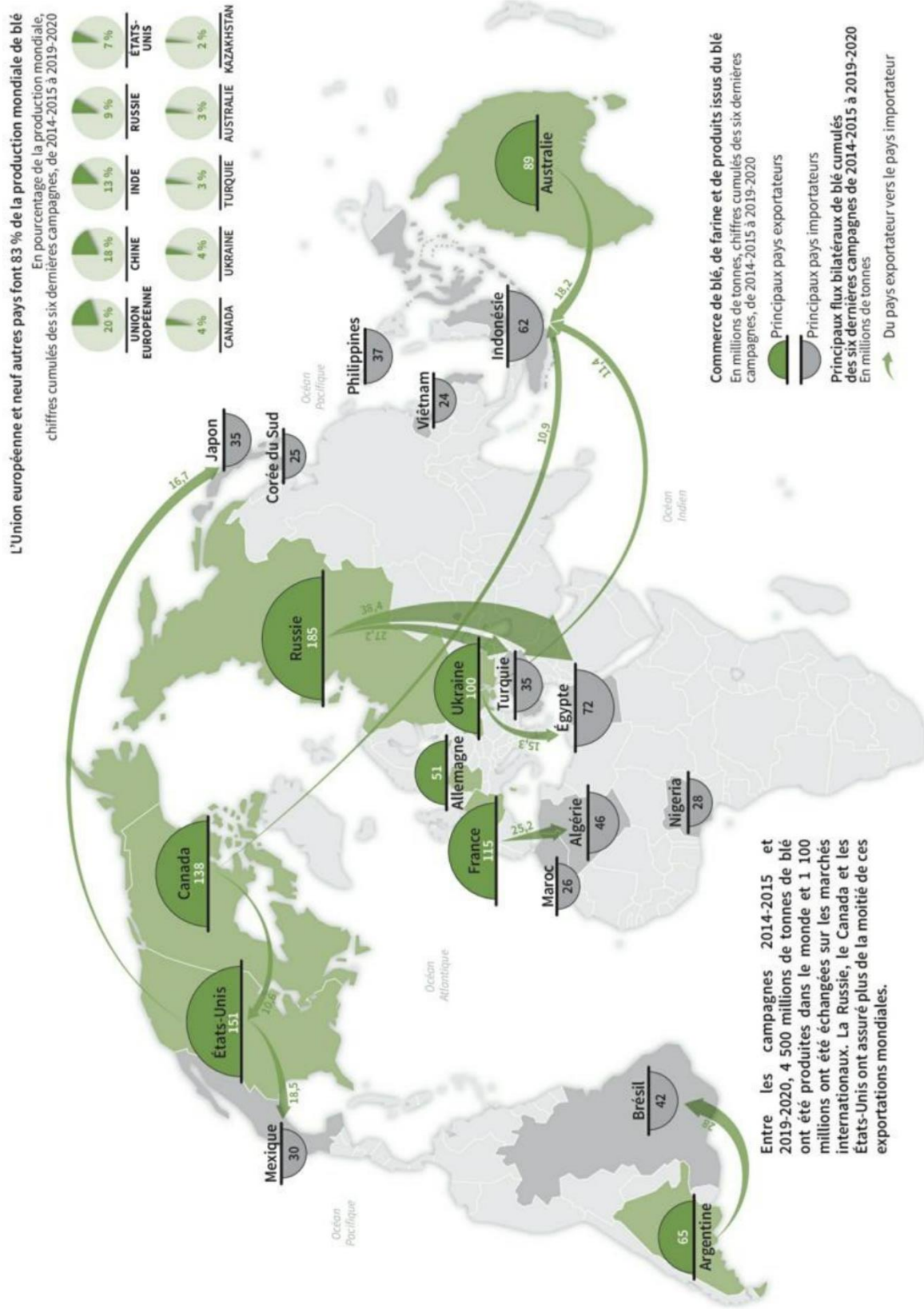
⁶ Si l'on considère l'Union Européenne, les productions sont de plus de 140 Mt ce qui la placerait au premier rang mondial.

Le blé est le produit agricole et alimentaire le plus échangé au monde (Charvet, 1990). Il représente 45 % des échanges de toutes les productions céréalières confondues (Le Stum, 2017). Sur l'ensemble des productions mondiales, 30 % sont exportées. C'est plus que le riz et les fruits et légumes dont la part commercialisée sur les marchés mondiaux est respectivement de 10 et 5 % (Abis, 2015). Les principaux exportateurs (**Figure 5**) font partie des pays développés. La Russie domine avec plus de 30 Mt exportés chaque année, principalement à destination de l'Égypte et de la Turquie. Les États-Unis et le Canada exportent environ 25 Mt chacun, à destination du Mexique, du Japon et de l'Indonésie. La France et l'Ukraine sont les 4^e et 5^e exportateurs mondiaux avec respectivement 19 et 16 Mt/an, vendus principalement aux pays du Maghreb et à l'Égypte. Ces cinq premiers pays concentrent 65 % des exportations mondiales. Seulement onze états dépassent les 4 Mt exportées, ce qui correspond à près de 90 % des exportations mondiales. Plus des trois quarts des pays du monde (et de tous les continents) sont des importateurs de blé. L'Asie fait partie des principales aires où la demande en blé est élevée, en raison de sa forte population (4,5 milliards d'individus). La consommation de blé vient compléter celle du riz. L'Indonésie est d'ailleurs le premier importateur mondial avec plus de 10 Mt/an. La demande est également importante pour les pays d'Afrique du Nord et du Proche Orient. Ce sont les aires de domestication historique du blé, ce qui explique la dépendance de cette région du globe envers les céréales puisqu'elles y sont ancrées (Charvet, 2018). Ainsi, l'Égypte est le 2^e importateur mondial (9,3 Mt) et satisfait ainsi la moitié de sa consommation nationale. L'Algérie, 3^e importateur mondial (8,4 Mt) doit quant à elle acheter 75 % de sa consommation. Bien que l'Europe ait un climat avantageux, plusieurs états sont également dans l'obligation d'importer tels que : l'Italie (4,2 Mt), l'Espagne (3,4 Mt), les Pays-Bas (3,1 Mt), la Belgique (2,4 Mt) et même l'Allemagne (2,1 Mt ; données FAOSTAT 2018).

Au final, il existe des pays produisant assez de blé pour garantir leur demande intérieure mais qui ne produisent pas de surplus pour exporter. Parmi les 10 principaux pays producteurs, c'est le cas par exemple de la Chine qui importe même en très faible quantité (au regard de ses productions), ou de l'Allemagne en Europe. Les autres en revanche sont en mesure d'exporter tout en garantissant leur demande intérieure. Ils ont une position dominante sur le marché du blé ce qui matérialise leur puissance et leur rayonnement (Charvet, 1990). C'est le cas par exemple de la France, du Canada et des États-Unis. On soulignera toutefois le cas particulier de l'Inde qui vend une partie de son blé, faute de capacités de stockage (Pouch et Kheraief, 2016). Enfin il existe les pays qui ne produisent qu'en trop faible quantité et sont fortement dépendant des producteurs. Ce sont notamment les plus gros importateurs. Pour Abis (2012), les pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient sont même en situation « d'hyperdépendance » envers les marchés mondiaux.

D'après Abis (2015), la répartition des récoltes de blé dans le temps et dans l'espace donne une stabilité au marché du blé. Les saisons étant inversées entre l'hémisphère nord et sud et cette céréale étant récoltée en période estivale, des productions sont disponibles toute l'année. A contrario, les accidents météoclimatiques peuvent provoquer une instabilité du marché du blé. Au cours des dernières décennies, les productions ont augmenté de façon à répondre à la demande et parfois plus que les besoins. Cependant entre 1998 et 2013, les productions étaient inférieures à la demande une année sur deux, ce qui s'est traduit sur le marché du blé par une augmentation des prix.

Figure 5 : "Commerce mondial du blé : un jeu d'interdépendance"



Laura Margueritte in DEMETER 2021 ; Sources : US Department of Agriculture ; Agritel France Export Céréales ; CIC ;

1.1.4. Satisfaire la demande alimentaire mondiale : un défi du XXI^e siècle

Les productions agricoles sont dépendantes du climat et de sa variabilité. Les accidents climatiques sont sources d'insécurité alimentaire. Depuis quelques décennies le changement climatique a des répercussions sur l'agriculture et la sécurité alimentaire (FAO, 2016, 2018), principalement à cause de l'augmentation de la température et des sécheresses (Lobell et al., 2013).

Parallèlement, d'après l'ONU, le nombre d'humains sur terre continue d'augmenter, et pourrait s'élever à 10 milliards de personnes en 2050⁷. L'offre alimentaire globale devra pour cela augmenter de 70 %. Face aux limites d'expansion des zones cultivables, des recherches (Parry et al., 2011 ; Reynold et al., 2011) démontrent que l'augmentation de la productivité des cultures est nécessaire pour atteindre cet objectif. D'après les organismes internationaux tels que la FAO⁸, CIMMYT et le G20, les rendements mondiaux de céréales devraient augmenter de 1,5 %/an à l'échelle mondiale pour satisfaire cette demande mais la trajectoire actuelle n'est que de 0,6 %/an (Charmet et Vallius, 2017). La progression des rendements du blé ralentit depuis les années 1990, passant de 0,46 à 0,32 q/ha/an (Gallais, 2017). La stagnation s'observe sur 36 % des surfaces mondiales de blé, notamment en Europe, Inde et Chine (Ray et al., 2012) mais augmente toutefois en Argentine. Deux causes sont identifiées pour l'Europe : la modification des itinéraires techniques mobilisant moins d'intrants, ainsi que le réchauffement climatique avec la hausse du nombre de jours d'échaudage thermique⁹ pendant le remplissage des grains (Gallais, 2010). Lobell et al (2011), estiment que la production de blé a diminué de 5,5 % depuis les années 1980 à cause du changement climatique (principalement lié à la température ; Morgounov et al., 2013). Néanmoins, ce signal peut être masqué dans certains pays comme la Russie, la Turquie ou le Mexique où les rendements augmentent grâce aux nouvelles technologies, à la fertilisation au CO₂ et d'autres facteurs. Dans le même temps, la productivité du riz ralentit également depuis 25 ans à l'échelle mondiale¹⁰ tandis que celle du maïs stagne en Chine, Inde et Europe¹¹.

Le changement climatique constitue un facteur limitant à la satisfaction de la demande alimentaire et à l'amélioration de la nutrition alors même qu'il convient parallèlement de développer une agriculture durable (FAO, 2016). Toutefois, il conviendra de ne pas négliger les régions du globe où le climat des prochaines décennies pourrait être favorable aux céréales. C'est par exemple le cas de la Russie, citée dans le dernier rapport DEMETER (Hervé et Le Stum., 2021). Enfin, rappelons que d'autres facteurs génèrent des insécurités alimentaires, dont la première cause est la pauvreté¹².

⁷ L'essentiel de la croissance démographique est passé. Le pic a été atteint en 1965 avec un taux de renouvellement de la population mondiale de 2,1% (Pison, 2019). Celui-ci diminue actuellement, mais la population en valeur absolue augmente encore.

⁸ Concernant l'offre alimentaire globale, celle-ci devra augmenter de 70 % (Anon, 2009).

⁹ Une journée est échaudante lorsque la température maximale est supérieure à 25 °C et interrompt le remplissage des grains de blé.

¹⁰ La progression des rendements passe de 0,55 à 0,42 q/ha/an en 25 ans et concerne 37 % des surfaces mais cette moyenne masque une forte variabilité spatiale : 79 % en Chine, 36 % en Inde et 81 % en Indonésie (Ray et al., 2012). Sont mis en cause l'érosion des sols, la salinité de l'eau et sa disponibilité.

¹¹ Toutefois, à l'échelle mondiale les rendements du maïs continuent quant à eux de progresser sans ralentissement malgré une forte variabilité interannuelle. Ceci s'explique notamment par : le recours des Etats-Unis (premier producteur mondial) à des variétés OGM (Organismes Génétiquement Modifiés) résistantes aux maladies, un faible impact du changement climatique dans les plaines agricoles productrices (Lobell et al., 2011) et une intensification de l'agriculture (Gallais, 2015).

¹² Rappelons que les productions céréalières à elles seules suffiraient à nourrir la population mondiale si elles étaient équitablement réparties (Annexe 1).

Pour garantir la sécurité alimentaire, il conviendra également de lutter contre les effets délétères de ces facteurs présentés dans l'annexe 1.

Au final, le blé apparaît comme une culture mondiale. L'alimentation humaine est le premier débouché de cette céréale. Les régimes alimentaires dans le monde se sont uniformisés au cours des 70 dernières années, engendrant une forte demande en céréales. Parallèlement l'agriculture intensive a permis d'augmenter les productions de cette denrée agricole la plus échangée au monde. La France fait partie des plus gros pays producteurs et exportateurs mondiaux. Le pays occupe de ce fait une place importante dans l'offre alimentaire mondiale, dans un contexte où les insécurités alimentaires pourraient être plus nombreuses en raison du changement climatique.

1.2. Le blé en France : une culture majeure de la filière céréalière

La culture du blé en France, présente sur presque tout le territoire, répond à un débouché principalement tourné vers l'exportation des grains. Les productions sont importantes et répondent à des exigences de qualité pour garantir les débouchés. L'ensemble de la filière est organisé pour parvenir à ces objectifs qui se retrouvent donc également dans les plaines de Normandie.

1.2.1. Poids économique et organisation de la filière céréalière

Le blé tendre fait partie intégrante de la filière céréalière française. Sur les cinq dernières années, 10,7 Mha sont consacrés aux céréales pour produire 66 millions de tonnes. Le blé concentre à lui seul 5 Mha et 37 Mt, soit 46 % de la SAU céréalière et 56 % des productions. Les autres céréales majeures sont le maïs (13,3 Mt), l'orge (10,4 Mt) et le blé dur (1,2 Mt).

D'après FranceAgriMer, cette filière recense près de 300 000 exploitations agricoles spécialisées, 154 sociétés de collecte, 914 négociants et 394 moulins. En allant de la production-collecte à la première transformation (meunerie, malterie, amidonnerie, alimentation animale...) et seconde transformation (boulangerie, biscuiterie, brasserie...), la céréaliculture génère 440 000 emplois selon l'Interprofession (<https://www.passioncereales.fr/>). En 2018, les chiffres de l'INSEE annoncent une valeur ajoutée brute hors subventions de 10,1 milliards d'euros, soit 14 % de toutes les productions agricoles confondues hors services. La filière est présente sur tout le territoire français, puisque le blé est consommé dans toutes les régions, mêmes celles où il est très faiblement cultivé.

La France est le 8^e exportateur mondial de céréales. Elle est moins bien classée que pour le seul blé (5^e rang mondial). Ceci s'explique par le fait que les productions de maïs ont une vocation principalement fourragère à destination de l'alimentation animale. Le riz est quant à lui quasi-absent du territoire¹³. Sur le marché international, la filière céréalière française rayonne surtout de par ses productions et exportations de blé tendre. Compte tenu de la forte demande alimentaire en blé, cette céréale constitue le « pétrole doré » de la France (Abis, 2015). Dans l'Union Européenne, le pays est le leader de la céréaliculture.

1.2.2. Les débouchés du blé tendre en France

D'après les données FranceAgriMer, sur la période allant de 2011 à 2017 (campagnes 2011/12 – 2017/18¹⁴) l'essentiel des productions françaises de blé tendre est mis sur le marché après collecte (90,7 %). Elles sont complétées par les stocks de la campagne précédente (7,8 %), les importations (1,2 %) et les incorporations¹⁵ (0,2 %). Seulement 7,5 % sont consacrées à l'autoconsommations ou aux autres usages à la ferme.

Les productions de blé sont supérieures à la demande intérieure. Depuis les années 1995, la panification n'est plus l'utilisation principale (Le Stum, 2017). Le premier débouché concerne

¹³ Seulement 82 000 tonnes de riz sont récoltées en France sur les 5 dernières années (données FranceAgriMer).

¹⁴ *Nb* : Les chiffres pris en compte pour 2017/18 sont issues des estimations fournies en février 2018.

¹⁵ Il s'agit de l'incorporation de blé par les éleveurs dans les aliments des volailles.

l'exportation avec plus de 17 Mt de grains, ce qui représente 48% de la production totale annuelle (**Tableau 2**). 58 % des exportations depuis l'hexagone est destiné aux pays tiers, principalement l'Algérie (plus de 2 Mt), le Maroc, la Côte d'Ivoire, le Sénégal, le Cameroun, le Gabon, le Liban, le Yémen et la Chine. Le reste (42 %) est importé par les pays de l'Union Européenne notamment la Belgique, les Pays-Bas, l'Italie, l'Espagne, le Portugal et le Royaume-Uni. Une infime partie part à destination des DROM-COM (Département Région d'outre-mer et Collectivité d'outre-mer - France). L'alimentation pour le bétail arrive en 2^e position (13,4 %), devant la panification (8,1 %), suivie de près par l'amidonnerie (7,9 %) et les stocks (7,8 %) qui seront remis sur le marché lors de la prochaine campagne. Les autres débouchés (alcool et biocarburants, biscuiterie, divers et autres, exportation de farine, semences, freintes) représentent les 14,8% restants.

Sur ces sept années, la quantité de blé pour les différents débouchés est stable, excepté celle destinée à l'exportation qui varie selon les quantités produites. Si les productions baissent, alors les quantités exportées sont plus faibles puisque les débouchés intérieurs prévalent. C'est d'ailleurs ce qu'il s'est produit lors de la campagne 2016/2017.

Tableau 2 : Débouchés de la production de blé tendre mise sur le marché sur la période 2011/12 à 2017/18

Débouché	Valeur relative (%)	Valeur absolue (1000 t.)
Exportations grain	48	17 282
Fabricants d'Aliments du Bétail (FAB)	13,4	4 840
Panification	8,1	2 908
Amidonnerie / Glutennerie	7,9	2 849
Stock final sur le marché	7,8	2 786
Alcool (y compris biocarburants)	4,4	1 599
Biscotterie, biscuiterie et pâtisserie industrielles	3,5	1 247
Uti. diverses alim. et non alim. / Conditionneurs / Malterie	1,9	699
Exportations farine	1,8	640
Semences	1,1	388
Autres	1,1	413
Freintes	1	349
Total	100	35 999

François Beauvais, 2019 (Données FranceAgriMer)

Le rendement n'est pas le seul objectif. Pour la commercialisation du blé et le maintien des débouchés, la filière céréalière doit tenir des exigences de qualité. Pour une bonne conservation des grains, la teneur en eau doit être inférieure à 16 %. Les grains brisés ne doivent pas être supérieurs à 4%, les grains germés et les impuretés à 2 % (Le Stum, 2017). Le "poids spécifique", correspondant à la masse volumique des grains, doit être supérieur à 76 kg/hl pour la meunerie et à 72 kg/hl pour l'alimentation animale. Le taux de protéines doit être supérieur à 11,5 % pour répondre à la demande du marché en qualité nutritionnelle. C'est un critère majeur pour la meunerie et l'amidonnerie. Il donne au blé son caractère panifiable et permet au pain de lever. Si pour le pain cru il doit être autour de 11 %, les exigences sont plus importantes pour les produits surgelés (jusqu'à 14 % ; **Tableau 3**). La force boulangère (W) constitue également un critère important dans

la panification du blé. L'aptitude à la réalisation du pain est insuffisante en dessous de 150, moyenne entre 150 et 180 et bonne au-delà de 180. A l'inverse, la biscuiterie a recours à des blés au taux de protéine inférieur à 11 % et à la force boulangère sous le seuil de 150.

Tableau 3 : Exigences requises pour la fabrication de différents produits de la boulangerie viennoiserie-pâtisserie

Produit	Biscuit	Pain cru	Brioche	Croissant frais	Croissant surgelé
Teneur en protéines du grain	< 11 %	10,5 - 11,5 %	11 - 13 %	11 - 13 %	12 - 14 %
Force boulangère (W)	< 150	150 - 250	200 - 350	200 - 300	250 - 400

Source : Arvalis - Institut du Végétal

Le blé français exporté est concurrencé par d'autres exportateurs à la qualité nutritionnelle souvent supérieure (Arvalis, 2017). Pour répondre à ce critère, l'interprofession s'est d'ailleurs dotée en 2013 d'un "plan Protéines blé tendre" pour garantir ce critère qualité, tout en maintenant de hauts rendements dans le cadre d'une agriculture préservant l'environnement (Charmet et Vallius, 2013).

D'après les données FranceAgriMer, en 2020, 98 % des productions françaises ont un poids spécifique supérieur à 76 kg/hl. La force boulangère (Annexe 2) dépasse le seuil de 150 pour 93 % des blés. Concernant le taux de protéines seulement 66 % des blés sont au-dessus du seuil de 11,5 %, c'est-à-dire qu'un peu moins de la moitié ne répond pas aux exigences. Dans ce cas ils sont, soit mélangés avec du blé à fort taux de protéine, ou classés en blés fourragers. Sur la période 2004-2018, les valeurs associées aux indicateurs de qualité restent assez proches entre les régions, mais une disparité spatiale est tout de même constatée (**Tableau 4**). Les valeurs des indicateurs de qualité de la partie nord, et plus particulièrement nord-ouest sont plus faibles que pour la moitié sud du pays. A titre d'exemple, le taux de protéine des régions PACA, Rhône-Alpes-Auvergne, Occitanie et Bourgogne-France-Comté est supérieur à 12% alors qu'il est de 11 et 11,3 % en Bretagne et en Normandie. Les raisons de ces disparités spatiales ne semblent pas expliquées dans la littérature scientifique. Toutefois, on peut émettre deux hypothèses : le recours à des apports azotés et des variétés différentes ou encore la sécheresse après la floraison (plus récurrentes dans la partie sud) favorisant la concentration de l'azote dans le grain (Arvalis, 2013).

Tableau 4 : Moyenne de la qualité des blés tendres des régions françaises sur la période 2004-2018

Région	Teneur en eau	Poids spécifique	Taux de protéines	Indice de chute de Hagberg	Force boulangère (W)	P/L
PACA	11,4	78,8	12,9	353,4	232,6	0,7
Auvergne-Rhone-Alpes	12,5	78,2	12,3	305,1	213,9	0,8
Occitanie	12,7	77,9	12,3	340	232,9	0,7
Bourgogne-France-Comté	12,5	77,4	12,1	293,9	200,3	0,7
Grand-Est	13	77,3	11,9	278,8	182,1	0,7
Ile-de-France	12,9	77,1	11,9	297	201,2	0,8
Centre-Val-de-Loire	12,7	77,1	11,8	306,4	194,2	0,8
Hauts-de-France	13,9	77	11,6	268,3	186,2	0,8
Nouvelle-Aquitaine	12,8	78,1	11,6	322,8	195,9	0,8
Pays-de-la-Loire	13,1	78	11,6	317,6	204,1	0,8
Normandie	14,1	77,2	11,3	290,2	180,6	0,8
Bretagne	14,1	77	11	264,9	170,5	0,8
France	12,5	77,8	12,2	311,4	210,5	0,7

François Beauvais, 2020 (données FranceAgriMer) ; l'indice de chute de Hagberg, la force boulangère et l'indice P/L (équilibre de la farine) définissent le caractère panifiable du blé.

1.2.3. Le blé dans le territoire français

La **Figure 6** localise les cultures de blé tendre en France et leur part dans la Surface Agricole Utile (SAU). Elle a été réalisée à partir des données RPG 2016 (Registre Parcellaire Graphique), agrégées dans des mailles de 2500 ha selon la méthode de Marie et al (2014). Les plus fortes densités sont localisées dans la partie nord du Bassin parisien, principalement dans la quasi-totalité des Plaines agricoles des Hauts-de-France, dans celles de Normandie (Eure et Plaine de Caen) ainsi qu'au sud de l'Ile de France et en Beauce (Centre). On retrouve une telle proportion également dans l'unique plaine céréalière d'Auvergne : la Grande Limagne. Le blé est également très fortement représenté dans le centre-ouest (du Vendômois au Pays Niortais) et le Dijonnais mais encore dans le nord-est et le sud-ouest du territoire. Dans la typologie des combinaisons d'utilisation agricole du sol de Marie et al (2014), ce sont les plaines françaises très spécialisées en céréales (et plus largement en grandes cultures). Le blé est associé à l'orge, surtout à l'est et sud-est du Bassin parisien. Le colza est présent sur l'ensemble de cette zone, ainsi que les cultures protéagineuses (pois, féveroles, ...). Le tournesol fait partie des rotations culturales en Charente et dans le Sud-Ouest. La betterave et les pommes de terre complètent des assolements dans la partie nord du Bassin parisien tandis que le lin se concentre surtout au Nord-Ouest. Il existe en France d'autres plaines de grandes cultures, orientées autour du maïs grain (Alsace, Bresse) mais le blé y occupe une place moins importante (15 à 20 % de la SAU). Outre ces grandes plaines, le blé intègre le système fourrager des zones bocagères spécialisées dans l'élevage.

Le blé est donc cultivé sur l'ensemble du territoire français, aussi bien dans des plaines spécialisées en grandes cultures, qu'en complément dans des régions d'élevage. On le retrouve même, certes en très faible proportion, dans les grandes vallées de montagne (sillon Alpin par exemple). Toutefois,

c'est surtout dans le Bassin parisien que l'on retrouve cette plante. Les sols y sont épais et fertiles, les précipitations régulières, avec une faible occurrence des jours de chaleur. Les rendements, dépassant les 80 q/ha sont largement supérieurs à la moyenne nationale (71 q/ha ; **Figure 7**). Dans les plaines les plus productives, ils peuvent dépasser les 100 q/ha. Le sud ne dispose pas de telles conditions favorables. Le blé semé est donc alternatif ou de printemps (cycle court et nécessitant peu de besoin en vernalisation – voir chapitre 3). Ainsi dans le Sud-Ouest les rendements avoisinent 50 q/ha tandis qu'autour de la Méditerranée ils sont inférieurs à 40 q/ha.

Figure 6 : Surfaces en blé tendre en France

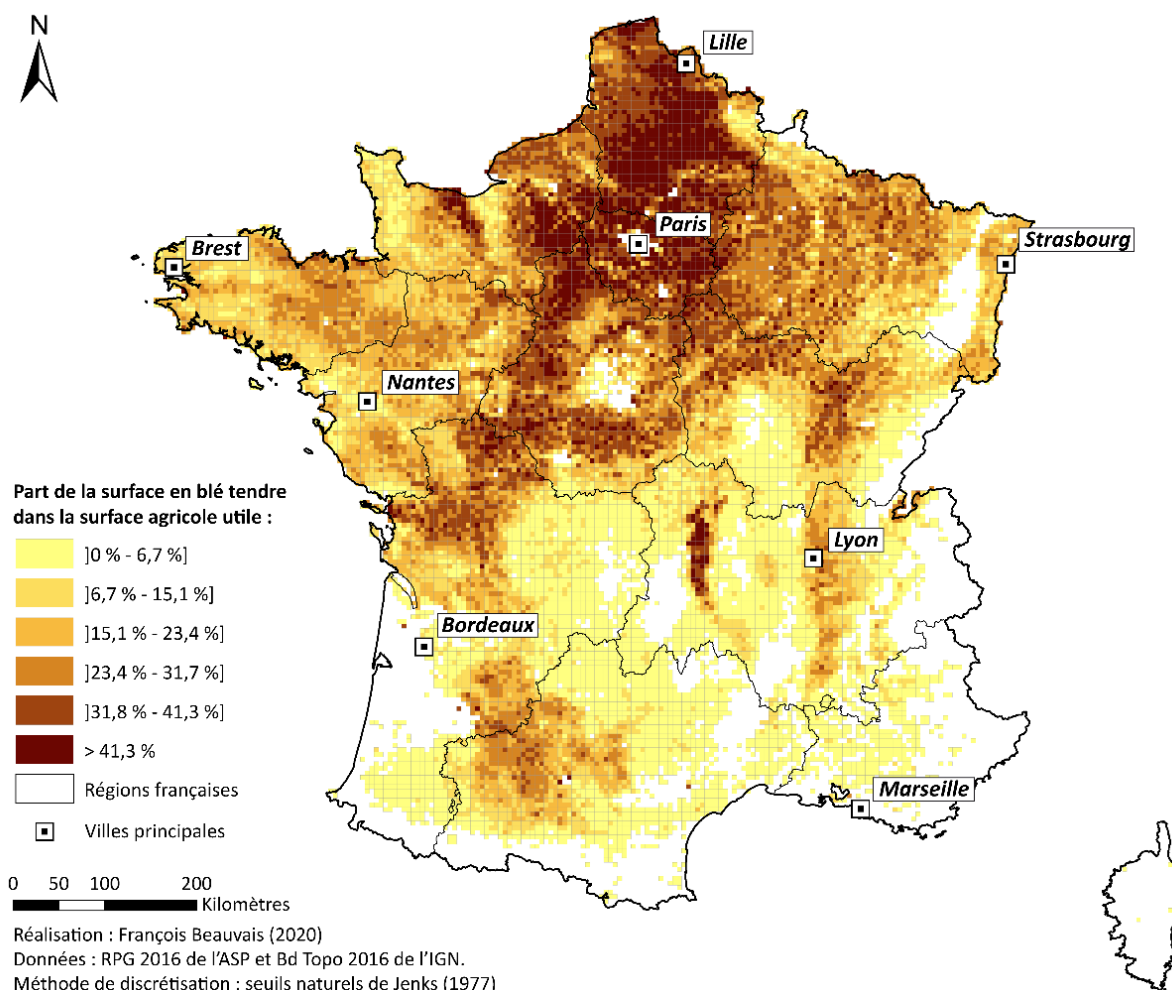
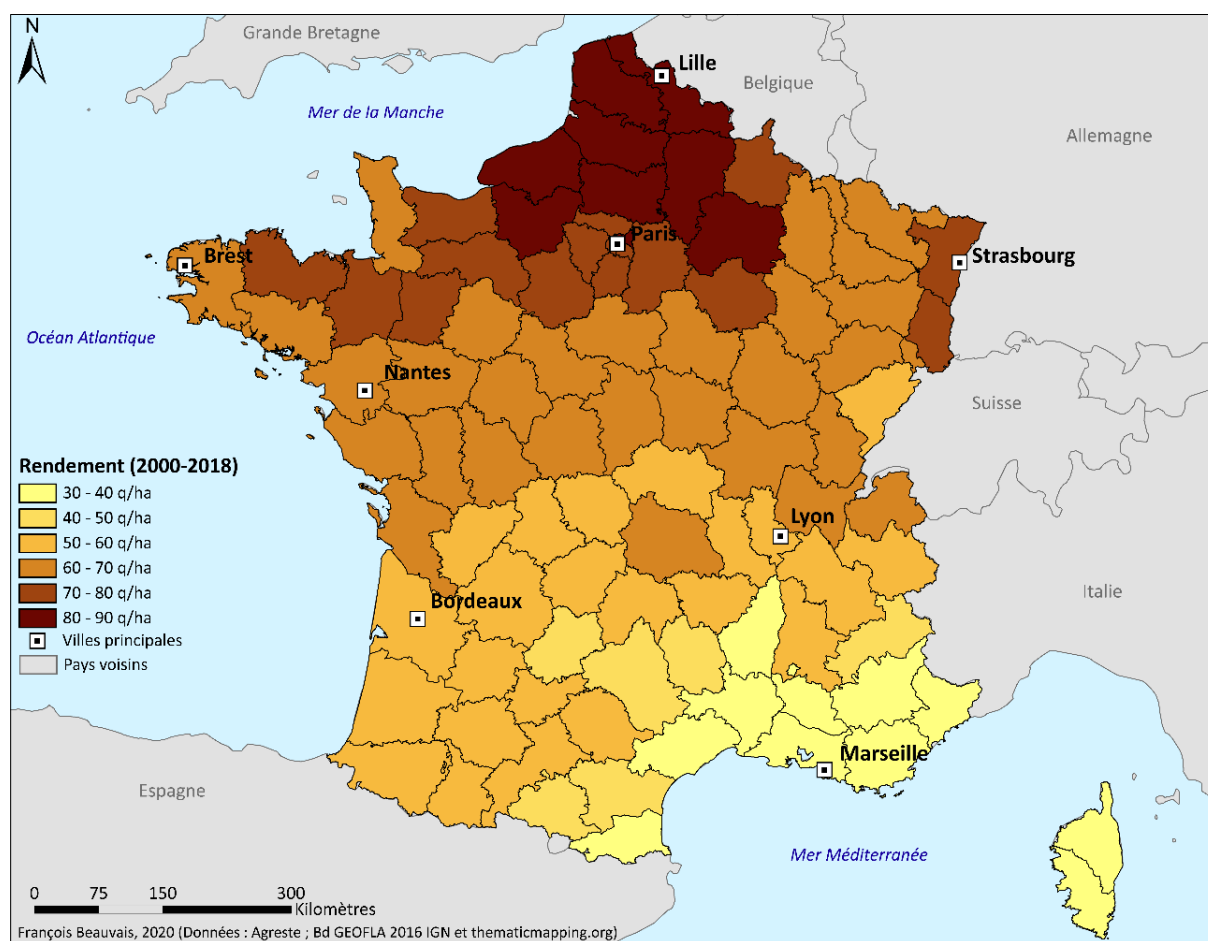


Figure 7 : Rendement moyen du blé tendre des départements français sur la période 2000-2018



Les départements aux productions les plus importantes (**Figure 8**) correspondent logiquement à ceux ayant le plus de surfaces consacrées au blé tendre et ayant des rendements élevés. La Somme est le premier contributeur du grenier à blé français (1,6 Mt), devant l'Aisne (1,5 Mt) et le Pas-De-Calais (1,4 Mt). 29 départements produisent plus de 500 000 tonnes de blé chaque année dont 8 dépassant le million.

Plusieurs ports français exportent les grains de céréales vers l'étranger (**Figure 9**) : Rouen (6,7 Mt), la Pallice - La Rochelle (3,7 Mt), Dunkerque (1,7 Mt), Bordeaux (0,8 Mt), Nantes (0,6 Mt), Fos-sur-Mer (0,4 Mt), Bayonne (0,4 Mt) et Caen (0,3 Mt). D'autres ports interviennent mais pour de plus faibles quantités (la somme de leurs exportations atteint tout de même 1,4 Mt). A noter que Rouen est le premier port exportateur de céréales de l'ouest de l'Europe.

Figure 8 : Le blé tendre produit en moyenne par départements (2000-2018)

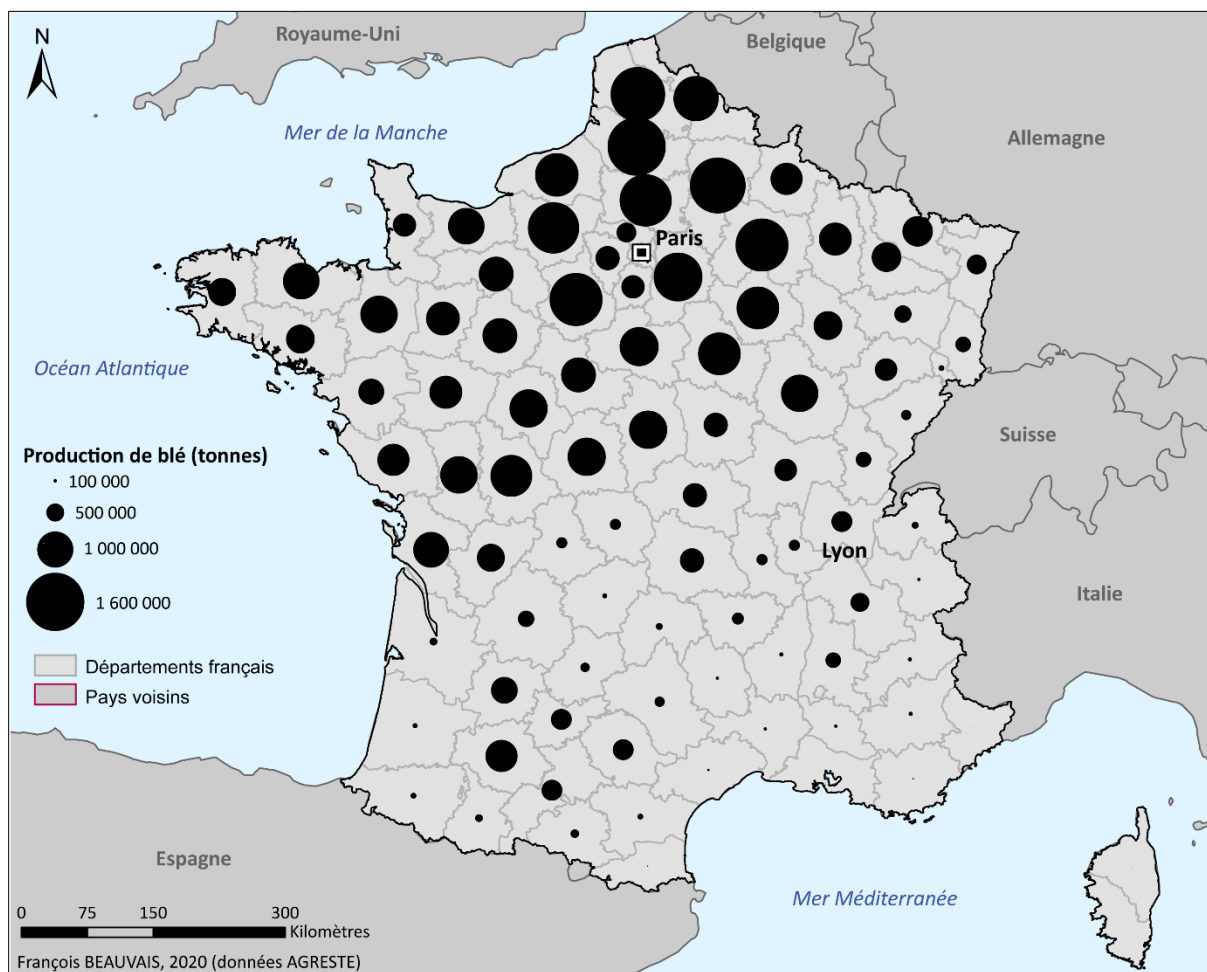
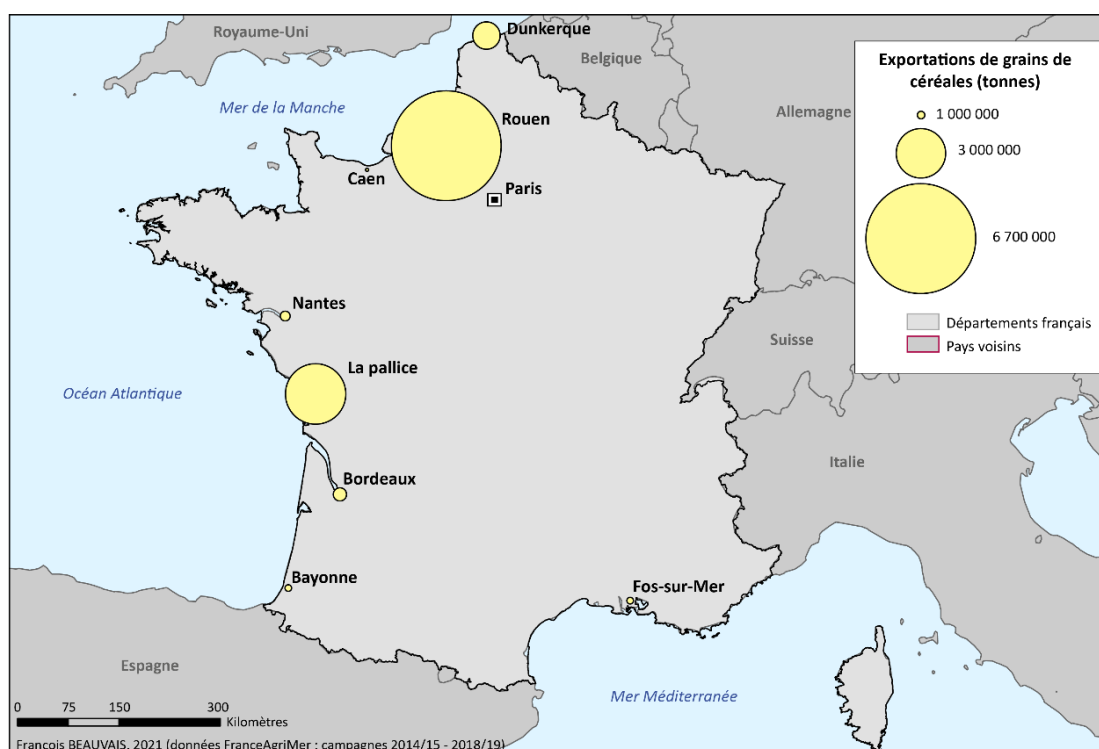


Figure 9 : Principaux ports exportateurs de grains de céréales (campagnes 2014/15 – 2018/19)



1.2.4. La culture de blé en France : une productivité qui stagne à partir des années 1990

Au 19^e siècle le rendement national pour le blé augmente faiblement mais de manière continue, alors même que cette période fut instable politiquement. Il passe ainsi de 7,1 q/ha en 1815 à 11,8 q/ha en 1885. Les surfaces agricoles sont en hausse (de 4,85 Mha à 7 Mha). Le climat pourrait être un facteur explicatif dans la mesure où le blé aurait pu s'adapter au réchauffement constaté à partir de 1850 (fin du Petit Âge glaciaire)¹⁶. La sélection variétale est initiée (introduction de variétés anglaises en Flandres et en Picardie en 1850) mais elle ne porte pas encore ses fruits. C'est à partir de 1880 sous l'impulsion de Vilmorin que les croisements de blé vont permettre la création de variétés plus productives. Le progrès relatif aux techniques culturales se diffuse lentement tout au long du siècle, la charrue remplace l'araire et les premiers engrais phosphatés apparaissent (Le Stum, 2017).

Au cours de la première partie du XX^e siècle, le seuil de production des 10 Mt est dépassé seulement à deux reprises : en 1907 et en 1954. Les rendements progressent selon la même tendance que lors de la période précédente, grâce à la création variétale, au progrès du matériel de culture et l'apport de phosphates, de 11,6 à 15,3 q/ha. Cependant les surfaces consacrées au blé diminuent de 2,7 Mha de 1880 à 1950. La période fut marquée par deux crises débouchant sur deux guerres mondiales provoquant une chute conséquente de la production (Le Stum, 2017). Pour améliorer les rendements en vue d'assurer l'autosuffisance alimentaire du pays et la sécurité sanitaire des semences échangées, le catalogue officiel est créé en 1931. Il oriente la sélection variétale. Pour être inscrite au catalogue, une variété doit alors répondre aux tests phénotypiques et de qualité agronomique. L'ONIB¹⁷ (Office National Interprofessionnel du Blé), créé en 1936, organise la politique céréalière avec le prix minimum garanti aux agriculteurs afin de relancer les productions. Un prix national du blé est fixé avec des livraisons de blé obligatoires à des organismes stockant les céréales (négociants et coopératives), qui se trouvent dans l'obligation d'acheter tous les blés offerts par les cultivateurs et mettant fin à la relation producteur-meunier (Kaplan, 2012).

C'est après la Seconde Guerre mondiale que les rendements et les productions augmentent de manière significative, respectivement multipliés par 3 et 4 (**Figure 11 A et B**). Il en va de même pour les surfaces consacrées à cette céréale (+31%) principalement au cours des années 1970 et 1980 (**Figure 11 C**). Dans un contexte de reconstruction, la politique nationale encourage la productivité afin de garantir une fois de plus l'objectif d'autosuffisance du pays. La France s'était d'ailleurs à ce titre, inscrite parmi les pays exportateurs lors de la création du Conseil international du blé en 1949. Dès 1953 elle devient excédentaire en blé. Le Plan Jean Monnet¹⁸, avec le financement du Plan Marshall, a largement contribué à moderniser l'agriculture. Le machinisme agricole permet la réduction du temps alloué aux travaux et améliore leur précision. Les CUMA

¹⁶ Il s'agit d'une période de basses températures (-1 à -1,5°C par rapport à l'actuel) sur l'Europe de 1550 à 1850 en raison d'une variation de l'activité solaire (Deconinck, 2006).

¹⁷ L'ONIB devient l'ONIC (Office national interprofessionnel des céréales) en 1940.

¹⁸ *Nb* : En 1946 l'objectif du plan de modernisation et d'équipement était : « d'assurer un relèvement rapide du niveau de vie de la population, et notamment de son alimentation ; de moderniser et d'équiper les activités de base (houillères, électricité, sidérurgie, ciment, machinisme agricole et transports) ; de moderniser l'agriculture ; d'affecter à la reconstruction le maximum de moyens, en tenant compte des besoins des activités de base et en modernisant l'industrie des matériaux de construction et celle du bâtiment et des travaux publics ; de moderniser et de développer les industries d'exportation pour assurer en 1950 l'équilibre de la balance des comptes » (CGP, 1956). Cinq plans se sont succédé de 1947 à 1975.

(Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole) permettent à leurs adhérents de bénéficier du matériel. Les recherches de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique¹⁹ - créée en 1946) alimentent le progrès agricole²⁰. Les "lois Pisani" d'orientation agricole (5 août 1960 et 16 janvier 1962) organisent la politique agricole française. Les agriculteurs montent en compétences grâce à une réforme de l'enseignement supérieur agricole. Le CETA (Centre d'Etudes Techniques Agricoles) et les villages témoins promeuvent les semences certifiées et les engrais azotés (Le Stum, 2017). Ils constituent désormais les Instituts Techniques Agricoles (ITA), regroupés au sein de l'ACTA (Association de Coordination Technique Agricole). Ils répondent de façon appliquée à la demande des exploitants. Pour cela ils diffusent des références techniques, scientifiques, d'outils et mènent plusieurs essais de terrain que les agriculteurs et conseillers agricoles retrouvent dans divers comptes-rendus. Cette « chaîne de connaissance » est complétée par le rôle des chambres d'agriculture²¹. Les exploitants agricoles consultent également les techniciens et commerciaux des sociétés de collecte et d'approvisionnement (souvent sous la forme de coopératives), pour l'approvisionnement en intrants (semences et produits phytosanitaires) et la commercialisation des productions. Ils sont en relation avec les négociants pour la vente auprès de courtiers qui sont en contacts avec les acheteurs. Les semences certifiées²², c'est-à-dire inscrites au catalogue officiel qui en regroupe environ 300, sont produites par des semenciers qui fournissent ces sociétés d'approvisionnement.

Ces réorganisations structurelles ont impulsé une agriculture productiviste²³ et intensive, permettant la hausse des rendements. Elle s'est matérialisée concrètement sur le terrain par l'apparition de nouvelles variétés grâce à la sélection et à la création variétale. L'épi est plus fourni et afin de limiter le risque de verse les pailles sont raccourcies, jusqu'à l'apparition de blés de plus petite taille grâce à l'introduction d'un gène de nanisme dans les années 1970. Dès 1974, les doses d'engrais chimique (azote) sont calculées selon l'état de la plante (méthode des bilans d'Hébert en 1969). Enfin, les produits phytopharmaceutiques permettent de lutter contre les mauvaises herbes (herbicides) et sont diffusés également au cours des années 1970, tout comme les fongicides (contre les maladies) et un peu plus tard les insecticides (contre les ravageurs) et les régulateurs de croissance (Le Stum, 2017 ; Abecassis et al, 2009). Ces progrès ont permis une nette augmentation des rendements qui atteignent désormais 70 q/ha. Ce haut-niveau de production est garanti par une filière organisée et performante où les exploitants agricoles profitent d'un soutien technique (Abecassis et Rousset., 2012 ; **Figure 10**).

¹⁹ Cet organisme français est appelé depuis le 1^{er} janvier 2020 l'INRAE ([Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement](#)).

²⁰ L'INRAE produit aujourd'hui la recherche fondamentale mais également appliquée, et diffuse des connaissances scientifiques ainsi que les innovations. Cet organisme forme les agronomes et agriculteurs et éclaire les décisions des pouvoirs publics.

²¹ Les chambres d'agriculture sont des publics sous tutelle de l'Etat regroupent 103 établissements, présents à l'échelon national, régional et départemental et sont administrés par des élus du milieu agricole. Elles diffusent les informations agricoles et les vulgarisent auprès des agriculteurs et proposent des conseils.

²² Les semences doivent être certifiées pour être commercialisables. D'après l'Article 1 du décret français 85-605 il est autorisé de multiplier, cultiver, échanger ou donner des semences non inscrites au catalogue. Les récoltes qui en sont issues peuvent être vendues. En revanche la commercialisation de ces semences est interdite, c'est-à-dire que les semences ne peuvent pas être vendues si elles ne sont pas inscrites dans le catalogue (Abecassis et Bergez, 2009).

²³ Il s'agit là du productivisme que Prével (2008) définit de la façon suivante : « Outre ses rendements, l'agriculture productiviste se caractérise par le fait qu'elle ne se soucie pas des conséquences que peuvent occasionner ses pratiques. Produire abondamment et à tout prix : telle pourrait être sa devise ».

Figure 10 : Organisation des secteurs de la production (d'après Abecassis et Bergez, 2009)

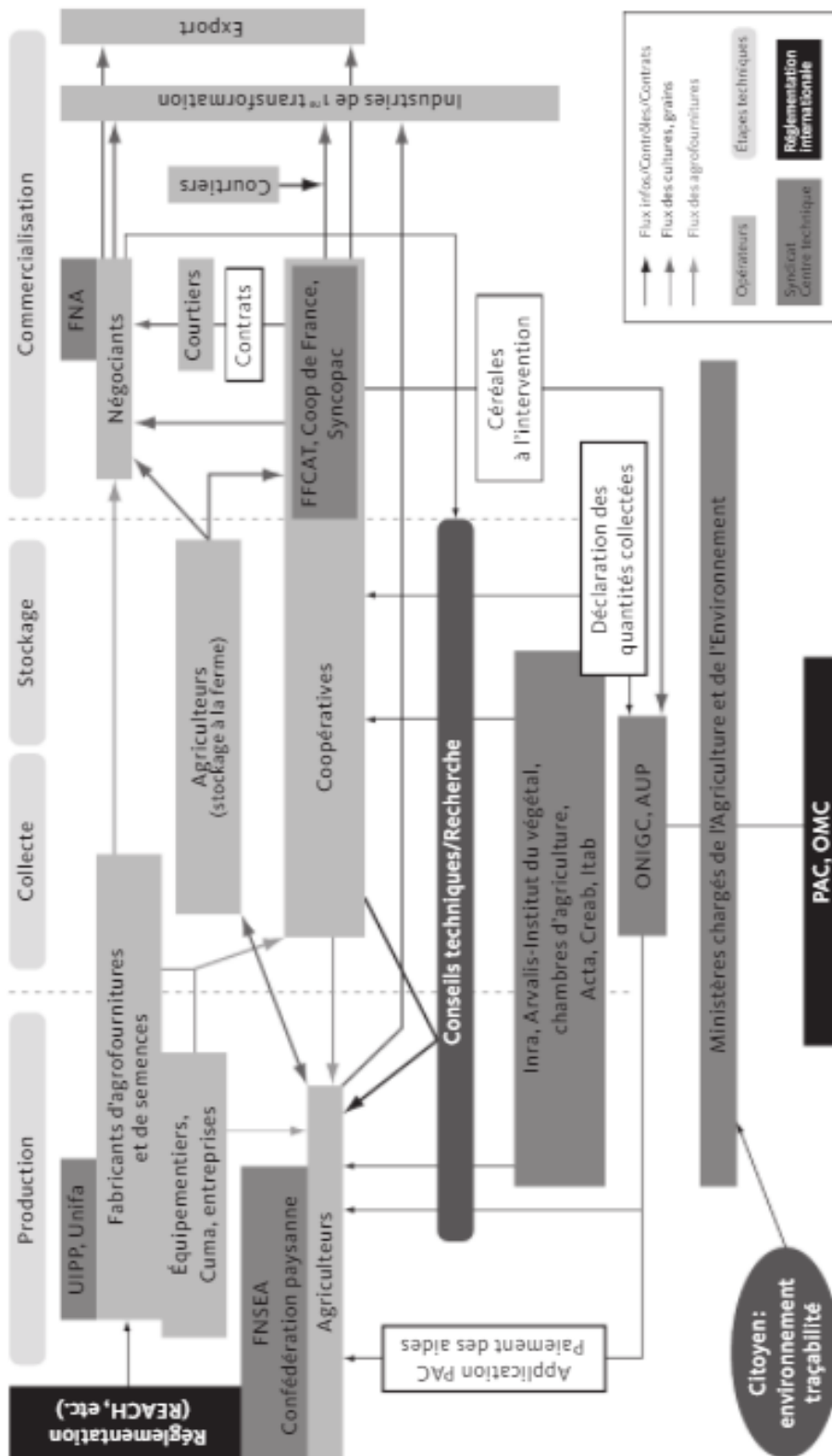
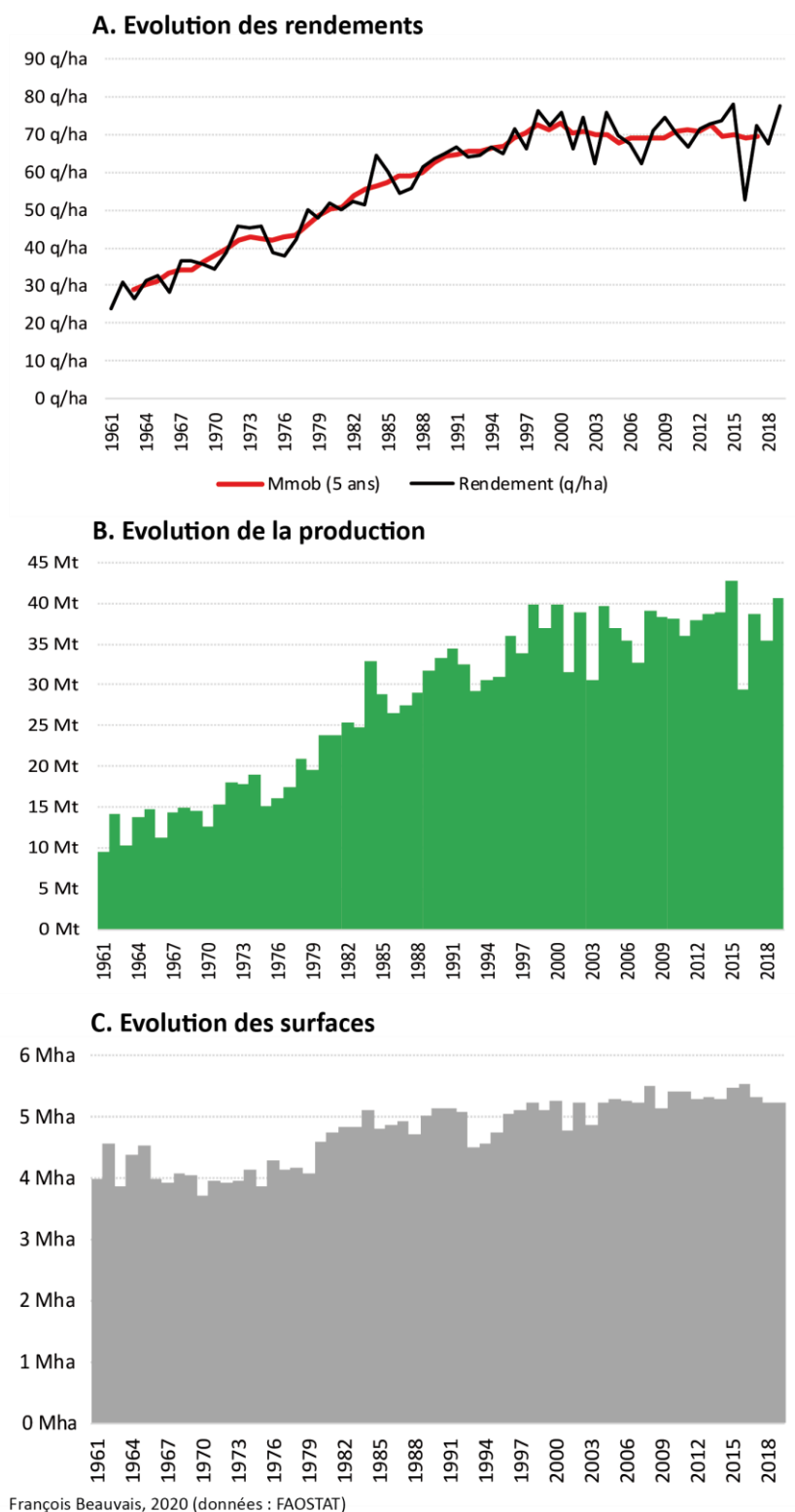


Figure 11 : Evolution en France des rendements (A), productions (B), surfaces (C) du blé tendre de 1961 à 2019



Cependant, à partir du milieu des années 1990 les rendements stagnent (**Figure 11 A et Tableau 5**). Pour en comprendre les causes, Gate (2009) étudie les facteurs à l'origine de ce plafonnement. Le progrès génétique aurait continué à progresser de l'ordre d'1q/ha/an et même 1,3 q/ha/an en conduite culturale sans traitement fongicide. Les apports en azote ont diminué,

mais ils sont réalisés en lien avec les besoins de la plante et la perte en rendement serait estimée à - 1 q/ha/an. Il en va de même pour la protection fongicide, en baisse, mais dont l'impact serait inférieur à - 2 q/ha/an. Si la progression des rendements avait suivi la tendance 1955-1989, ils seraient aujourd'hui supérieurs de 14 q/ha/an. Après déduction des 3 q/ha/an liés à la baisse des apports en azote et de fongicides ainsi que faible impact de la modification des rotations culturales la cause la plus probable semble d'abord être climatique. Une hausse des déficits hydriques dans les bassins de production français est constatée au cours de la montaison du blé. Il en va de même pour le nombre de jours d'échaudage lors de la période de remplissage du grain. Ces phénomènes sont rattachés au changement climatique qui expliquerait 50 à 88 % des variations des rendements dans les départements français (Gate, 2009 ; Gate et al, 2010 ; Brisson et al, 2010). Mais d'autres menaces peuvent également peser sur la production. En 2016, la France connaît une chute historique des rendements en raison d'une fin d'automne et d'un hiver doux, suivi d'un printemps humide, favorisant le développement des pathogènes (Ben-Ari et al., 2018).

Tableau 5 : Evolution en France des rendements, productions, surfaces du blé tendre par décennies de 1961 à 2019

	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2019
Rendement (q/ha)	31,7	44,4	57,8	68,9	69,5	70,3
Progression (%)		40%	30%	19%	1%	1%
Progression (q/ha/an)		1,3	1,3	1,1	0,1	0,1
Surfaces (ha)	4 106 610	4 111 150	4 898 540	4 977 997	5 193 961	5 350 558
Progression (%)		0%	19%	2%	4%	3%
Progression (ha/an)		454	78739	7946	21596	17400
Productions (t)	13 013 801	18 297 674	28 372 198	34 376 677	36 121 516	375 837 29
Progression (%)		41%	55%	21%	5%	4%
Progression (t/an)		5 28387	1 007 452	600 448	174 484	162 468

Nb : Les progressions sont calculées à partir des moyennes des décennies
François Beauvais, 2020 (données : FAOSTAT)

Le blé tendre est la céréale majeure cultivée en France. Cette plante est produite sur presque l'ensemble du territoire français mais on le retrouve surtout dans les grandes plaines céréalières aux espaces plans et dégagés. Ces dernières décennies, la céréaliculture a gagné en productivité grâce à une intensification des moyens de production et à l'organisation de l'ensemble de la filière. Cependant, les rendements stagnent depuis 30 ans en raison d'une augmentation des jours de chaleur et des sécheresses liés au changement climatique.

1.3. La Normandie : une région productrice de blé tendre

La Normandie compte plusieurs plaines de grandes cultures dont la Plaine de Caen (Calvados). Le blé y occupe une place essentielle. L'organisation de la filière locale et les débouchés s'inscrivent dans la logique nationale, où l'essentiel des productions participe à répondre à la demande mondiale comme en attestent les exportations via les ports de Rouen et de Caen.

1.3.1. La Normandie : une région productrice de blé tendre

Les plaines de grandes cultures constituent un angle mort de la recherche géographique caennaise. Plusieurs études, portant notamment sur l'occupation agricole du sol notifient la présence de ces plaines céréalières, à l'échelle française (Marie *et al.*, 2014), du Grand-Ouest ou de l'ex-région bas-normande (Marie, 2009 ; Bermond et Marie, 2014 ; Preux, 2019) ou bien dans le cadre de l'étude de systèmes d'exploitation maraichers (Guillemain, 2020). Toutefois, l'organisation de la filière et les productions n'ont été que très peu étudiées. En 1970, Solignac-Lecomte recense dans *l'Atlas de Normandie* les productions et les capacités de stockage. En 2000, le CESER de l'ex-région Basse Normandie dresse un rapport sur cette filière aboutissant à trois propositions pour la conforter et la développer : améliorer la qualité des blés, optimiser la logistique et les moyens de communication et diversifier les productions. En amont de cette thèse, un mémoire de master (Beauvais, 2016) aborde ce secteur à l'intersection entre l'organisation de la filière et l'évolution du contexte biopédoclimatique (historique et prospectif). En 2020, *l'Atlas social de Caen* présente une planche de présentation de l'organisation de la filière grandes cultures de cette région agricole (Preux *et al.*, 2020). Ce travail de thèse n'a pas vocation à se consacrer exclusivement aux questions d'organisation de la filière céréalière normande mais il convient d'en présenter les contours. La place du blé tendre dans l'agriculture normande est présentée ci-dessous, tandis que les éléments d'analyse à échelle plus fine (d'une plaine agricole) sont présentés dans le chapitre 4 présentant la Plaine de Caen et de Falaise.

1.3.1.1. Le blé tendre dans la SAU Normande

D'après les données RPG 2016, l'agriculture normande occupe deux millions d'hectares²⁴, ce qui correspond à 70 % de la surface régionale. A la considération de ce ratio, elle est d'ailleurs la première région agricole française. Ces surfaces sont utilisées par 38 900 exploitants et co-exploitants pour 29 200 exploitations agricoles dont la taille moyenne est de 70 ha. Les cultures représentent 58% des surfaces agricoles et les prairies 38 % (dont 31 % pour les permanentes). Le reste (4 %) comprend les fourrages, légumes et fleurs ou encore les vergers. Le blé tendre occupe 43 % des surfaces consacrées aux cultures devant le maïs (22 %), le colza (12 %), l'orge (11 %) et les plantes à fibres (5 %). Ces cinq plantes occupent 93 % de la SAU consacrée aux cultures (**Tableau 6**).

L'agriculture régionale est diversifiée et quelques grands ensembles se dégagent (**Figure 12**), dans les régions bocagères de l'Ouest de la Normandie, les systèmes agricoles sont principalement tournés vers l'élevage bovin laitier, notamment dans le Centre-Manche et le Bocage Normand. Les exploitations spécialisées dans l'élevage bovin-viande se retrouvent surtout dans le Pays d'Auge, le Pays de Bray et quelques régions agricoles de l'ouest. A contrario, les plaines de Caen (Calvados), Evreux et du Vexin (Eure) sont spécialisées dans les grandes cultures avec une place importante accordée aux céréales (notamment en Plaine d'Evreux) et se caractérisent par des paysages ouverts. Des espaces de poly-culture et poly-élevage matérialisent l'interface entre ces deux ensembles tel le Pré-Bocage ou le Bessin. Ce type d'OTEX (Orientation technico-économiques des exploitations agricoles) domine la Seine-Maritime, mais est également présente dans l'ouest de l'Eure, le Perche,

²⁴ Précisons ici que les données RPG ne sont pas exhaustives. Le taux de couverture est d'environ 90 % de la SAU en raison du biais lié aux déclarations PAC (Preux., 2019).

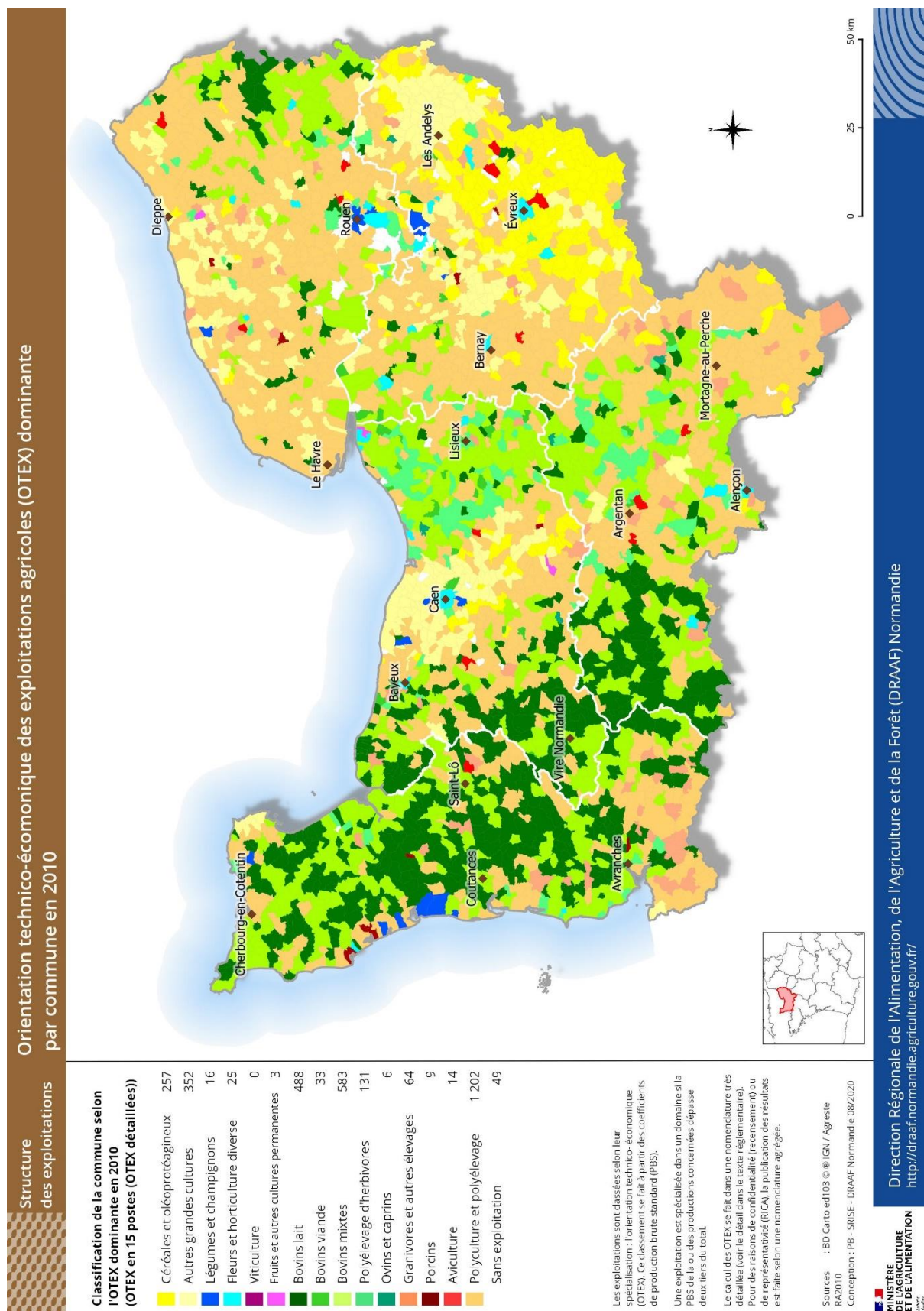
la Plaine d'Alençon et le Sud-Manche. Les bassins de productions légumières sont présents sur le littoral de la Manche. Les espaces non-agricoles sont les villes (principalement les agglomérations caennaise, rouennaise et havraises) ou les grandes forêts (Balleroy-Cerisy, Andaine, Ecouves ou de Roumare).

Tableau 6 : Les cinq premières cultures normandes

Rang	Cultures	Hectares	% dans la SAU consacrée aux cultures
1	Blé tendre	485253	42,8
2	Maïs grain et ensilage	248575	21,9
3	Colza	135545	12
4	Orge	128396	11,3
5	Plantes à fibres	55624	4,9

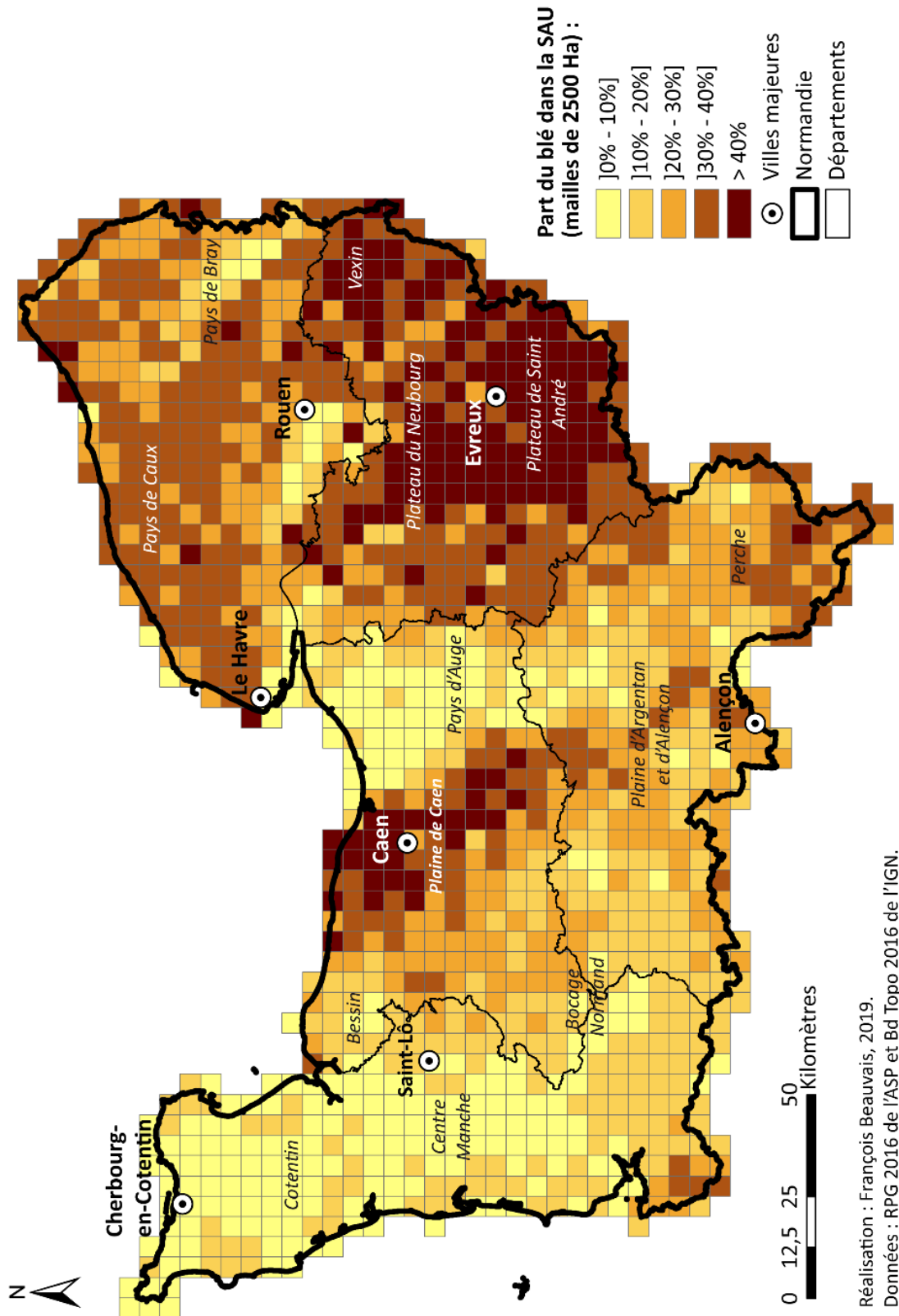
François Beauvais, 2020 (données RPG 2016)

Figure 12 : Orientations technico-économiques des exploitations agricoles normandes en 2010



Le blé est cultivé dans toute la Normandie. Les densités de blé sont plus importantes à l'est de la région. Dans le Pays de Caux, la part de cette céréale dans la SAU peut dépasser 30 %. Mais dans les plaines de l'Eure elle est supérieure à 40 % voire parfois 50 % (**Figure 13**). C'est également le cas en Plaine de Caen. Celle-ci occupe une position atypique, entre les collines du Pays d'Auge et du Bocage Normand consacré à l'élevage. Elle se prolonge jusqu'à Alençon mais les densités y sont beaucoup plus faibles. Le Perche, en périphérie par rapport à la Beauce, comprend également des surfaces en blé non négligeables. Le blé est surtout présent sur les zones de plateaux où se concentrent les grandes cultures. Ces espaces plans proposent un paysage ouvert, contrairement aux bocages. Ces régions agricoles comportent des exploitations agricoles de grandes dimensions foncières (souvent plus de 100 ha), économiques et d'investissement technique (Preux, 2019).

Figure 13 : La surface de blé tendre dans la SAU en Normandie en 2016



Le blé tendre d'hiver est semé à l'automne (d'octobre à décembre) et est récolté l'été (entre mi-juillet et mi-août). Dans les plaines de grandes cultures, il est cultivé une année sur deux voire deux années sur trois. Les cultures de printemps (betterave, lin, maïs) ou le colza en culture d'hiver constituent les têtes d'assolement²⁵.

D'après les données FranceAgriMer (2015-2020) l'essentiel de la production de blé est en blé tendre d'hiver, objet de cette thèse. Le blé tendre de printemps n'est presque pas semé dans la région (seulement 375 t récoltées chaque année). Le blé dur, qu'il soit d'hiver ou de printemps n'est également que très peu produit (3 700 t).

1.3.1.2. Productions normandes et poids économique de la filière céréalière

Sur les cinq dernières années, d'après les données FranceAgriMer, la production céréalière moyenne annuelle s'élève à près de 4,8 Mt. La filière normande se structure principalement autour du blé tendre avec 3,6 Mt (76 %) moissonnées chaque année. L'orge arrive en deuxième position (0,8 Mt) devant le maïs grain (0,2 Mt). D'autres céréales sont produites tel que le triticale, l'avoine, le blé dur, le sorgho ou le seigle, mais en très petites quantités (2 %) – (Tableau 7).

Tableau 7 : Principales céréales cultivées en Normandie (2016 – 2020)

Rang	Culture	2016	2017	2018	2019	2020	2016-2020	Ratio (%)
1	Blé tendre	3042927	3952802	3591281	4187281	3225375	3599933	75,4
2	Orge	781475	848481	765136	961759	795309	830432	17,4
3	Maïs grain	161610	200683	224263	235631	360401	236518	5,0
4	Triticale	36380	40470	29848	41820	32176	36139	0,8
5	Avoine	41074	66812	50060	43220	45193	49272	1,0
6	Autres céréales	9969	13085	17450	19240	18544	15658	0,3
7	Blé dur	2190	4885	2955	4110	4470	3722	0,1
8	Sorgho	525	780	840	1508	4455	1622	0,0
9	Seigle et méteil	1040	1625	1513	1815	2596	1718	0,0
	Total	4077190	5129623	4683346	5496383	4488519	4775012	100

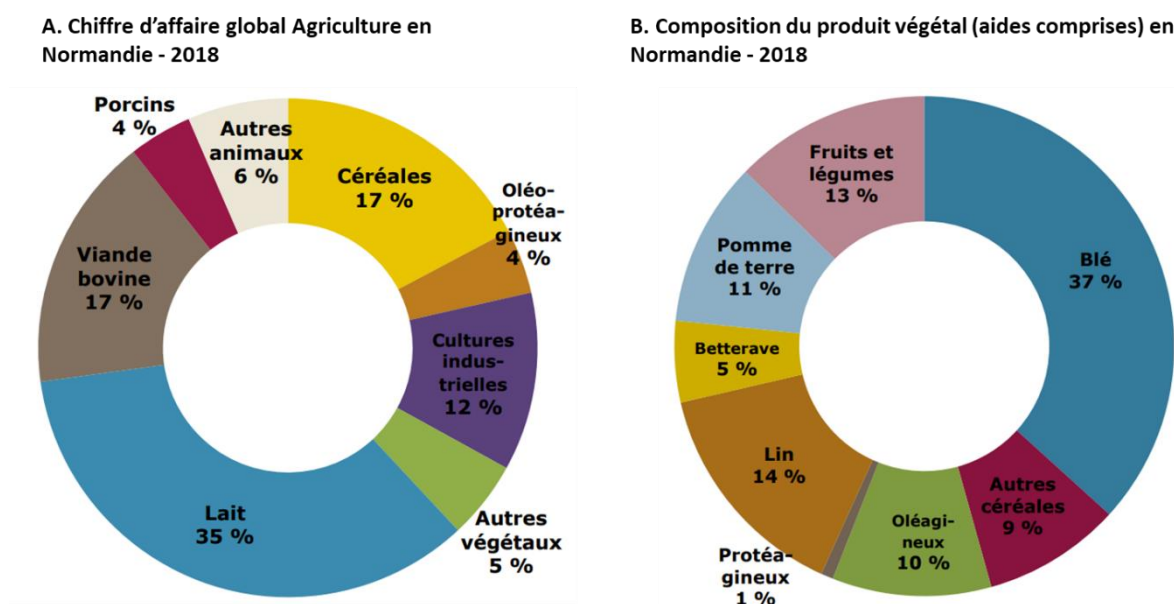
François Beauvais, 2021 (données FranceAgriMer)

D'après l'interprofession, 26 000 emplois sont liés à la production, la collecte, la négoce et la transformation des céréales pour une valeur ajoutée de 1,1 milliard d'euros (10 % du total national).

Dans le chiffre d'affaire agricole normand (4 milliards d'€ hors aide en 2018), les productions animales dominant (62 %), les céréales y contribuent à hauteur de 680 millions (17 %) dont 566 millions pour le blé (14,5 % - Figure 14).

²⁵ Une tête d'assolement est une culture qui intervient en première dans les rotations culturales des céréales. Il s'agit par exemple des cultures de printemps comme le lin, les betteraves, le maïs, les pois ou le colza qui est en revanche une culture d'hiver. Les rotations culturales sont la plupart du temps du type « tête d'assolement – blé – blé » ou « tête d'assolement – blé – orge ». Les rotations permettent d'améliorer la structure du sol et d'augmenter leur fertilité, de mieux gérer les adventices (mauvaises herbes) ou encore favorisent une meilleure résistance aux maladies et aux ravageurs.

Figure 14 : Chiffre d'affaire global (A) et composition du produit végétal (aides comprises ; B) en Normandie



Source : Pôle économie et prospective des Chambres d'agriculture de Normandie, 2019

Chaque année, 7,6 Mt de céréales sont exportées depuis les ports de Rouen et de Caen, drainant un bassin de production qui dépasse les limites régionales. Le blé est exporté à destination du Maghreb (2,4 Mt), de l'Union Européenne (1,1 Mt), de l'Asie (0,9 Mt) et du Moyen-Orient (0,8 Mt). L'orge est quant à elle acheminée vers l'Asie (0,5 Mt) et le maïs en Union Européenne (1,1 Mt)²⁶.

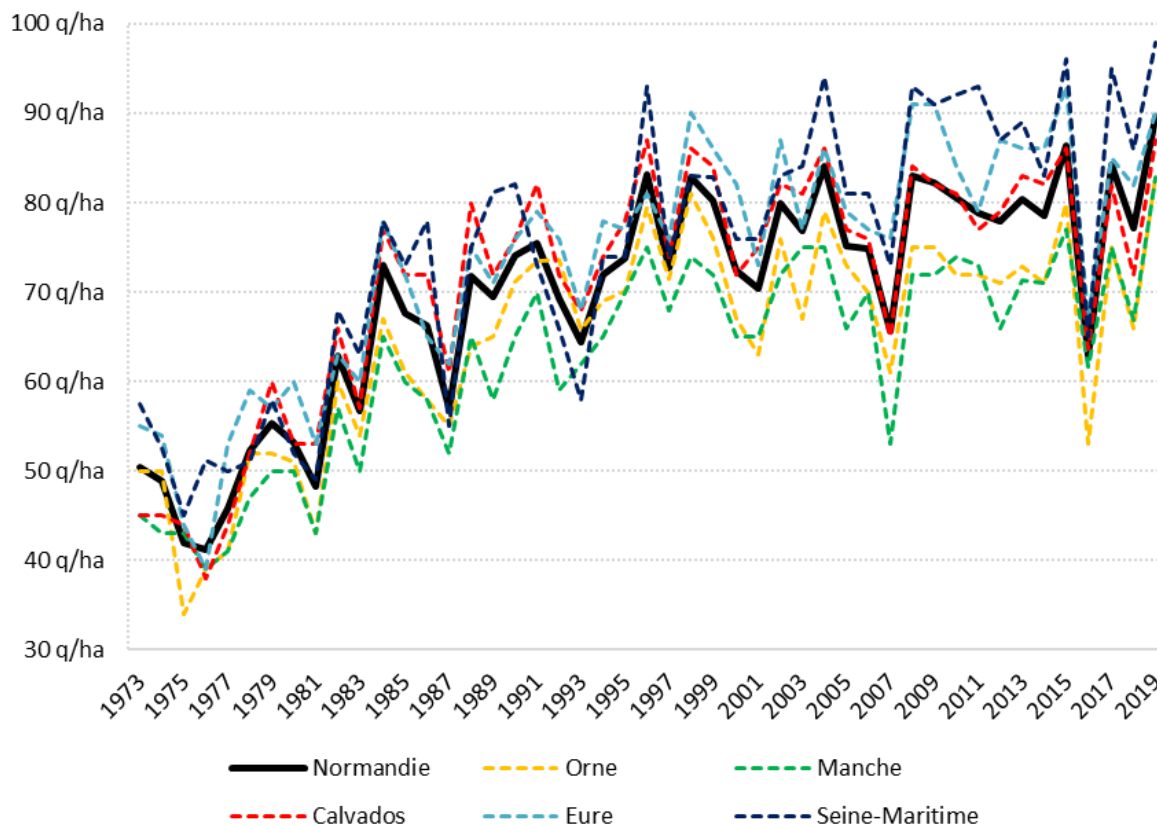
Le blé occupe alors une place importante dans la filière céréalière et plus largement dans l'agriculture normande. Les productions sont importantes et équivalent à environ 10 % du total national avec 3,6 Mt. C'est la 4^e région productrice de blé tendre, derrière les Hauts-de-France (6,7 Mt), le Grand Est (4,8 Mt) et le Centre-Val-de-Loire (4,1 Mt). Ces hauts niveaux de production sont garantis par un grand nombre de surfaces allouées à cette céréale mais surtout grâce à des rendements élevés. En effet, sur la période 2000-2016 le rendement régional moyen est de 77q/ha (Seine maritime 85 q/ha ; Eure 82 q/ha ; Calvados 78 q/ha ; Orne 70 q/ha et Manche 69 q/ha²⁷), soit 6 q de plus que la moyenne nationale (71 q/ha). Ces performances s'expliquent d'une part en raison de conditions physiques favorables (climat océanique et sols fertiles) mais également par l'organisation de toute la filière et de politiques agricoles avantageuses aux échelons national et européen. Au cours des dernières décennies, ces rendements ont évolué des années 1970 à 2010 de 49 à 80 q/ha. De la même façon qu'à l'échelle nationale, la productivité stagne depuis les années 1990 (Figure 15) en raison du changement climatique, avec notamment une hausse des jours de chaleur (voir partie 2). C'est la première cause identifiée, tel que le souligne le rapport 2017 de

²⁶ Ne disposant pas de données à l'échelle régionale pour la filière agricole (emplois, exportations, ...) l'ensemble des chiffres provenant de l'Interprofession céréalière (<https://www.passioncereales.fr/>). Concernant les exportations, la période correspondant aux quantités annuelles exportées n'est pas précisée. On ne sait alors pas s'il s'agit de la moyenne de plusieurs années ou de la dernière campagne. Dans le bilan, les exportations sont précisées pour 6,8 Mt. Les exportations des 1,2 Mt restantes ne sont pas précisées.

²⁷ Les données de l'AGRESTE sont fournies à l'échelle départementale et cachent les disparités internes à ces départements.

l'ORACLE (Observatoire de l'Agriculture et du changement CLimatique) de la Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie. L'application de la Directive Nitrates (12 décembre 1991) pourrait également expliquer cette stagnation.

Figure 15 : Evolution des rendements de 1973 à 2019 en Normandie



François Beauvais, 2020 (données : CRAN et AGRESTE)

Le blé occupe une place importante en Normandie, que ce soit dans les surfaces, le chiffre d'affaire agricole ou les emplois associés. La région dispose de grandes plaines céréalières spécialisées dans cette culture. Depuis les années 1990 la productivité de cette région disposant pourtant d'un environnement favorable (climat océanique et sols fertiles) aux rendements élevés stagne en raison du changement climatique.

1.4. La plaine de Caen : une plaine de grandes cultures en Normandie

La Plaine de Caen constitue plus spécifiquement la région agricole d'étude pour ce travail de thèse. Cet espace laboratoire est retenu car il est caractéristique des plaines de grandes cultures normandes, et plus particulièrement de la culture du blé tendre. Cette sous partie a pour vocation de présenter cet espace d'étude dans ses dimensions agricoles.

1.4.1. Situation géographique

La Plaine de Caen se localise dans le Calvados et occupe la partie centrale de ce département (**Figure 16** et **Figure 17**). C'est un espace d'environ 1240 km², s'étendant sur une longueur de 50 km du nord vers le sud, et d'une largeur de 30 km d'ouest en est. Elle est bordée au nord par la mer de la Manche, à l'est par la vallée de la Dives (limite Pays d'Auge), au sud par la vallée de l'Ante (limite Plaine de Trun), au sud-ouest par la vallée de la Laize (limite Massif Armoricain) et à l'ouest par celle de la Seulles (limite du Bessin – Brunet, 2004 ; Germain-Vallee et Lespez, 2012). Ces limites sont donc perceptibles dans le relief. La Plaine de Caen constitue un vaste bas-plateau²⁸ topographique avoisinant 180 m d'altitude NGF sur les rebords sud-ouest et s'abaissant en glacis peu élevé en direction de la vallée de la Dives (30 m d'altitude NGF) à l'est et de la mer de la Manche au nord (0 m d'altitude NFG).

Localisée à l'ouest du Bassin Parisien, la Plaine de Caen repose sur une structure monoclinale (pendage des couches stratigraphiques vers l'est), composée de calcaires jurassiques moyens (ère mésozoïque) du Bathonien et du Bajocien (environ 166 à 170 millions d'années), entre lesquelles se glissent des marnes issues des mêmes étages. L'ensemble est surmonté, principalement au nord de Caen, de formations superficielles appelées limons des plateaux pouvant atteindre localement plusieurs mètres d'épaisseur et participent à la fertilité des sols. Cet espace est donc relativement plan, mais entaillé de vallées qui en constituent les principales ruptures de pente. Ainsi en plus des vallées délimitant cette entité, celles de la Thue, Mue, Dan, Odon, Orne, Muance ou encore du Laizon sont recensées. Ces vallées se concentrent pour la plupart dans la partie septentrionale de la Plaine de Caen. Les cours d'eau prennent leur source soit dans le bassin sédimentaire ou dans le massif ancien, et s'écoulent sur ce plateau selon un axe sud-ouest/nord-est pour rejoindre la Mer de la Manche. Le réseau hydrographique, contrairement au reste de la région est peu dense, du fait du substrat perméable qui explique la présence d'aquifères : la nappe libre du Bathonien et la captive du Bajocien (libre lorsqu'elle n'est pas recouverte par les calcaires et marnes du Bathonien). Elles permettent d'approvisionner la population de l'agglomération caennaise en eau, et constitue également une ressource pour l'agriculture usant de l'irrigation dans les zones de « petits sols » (voir chapitre 3). Les sols épais et relativement bien drainés expliquent quant à eux des rendements de blé tendre performants, d'autant plus que le climat tempéré océanique y est favorable.

²⁸ D'un point de vue topographique la Plaine de Caen est bien un plateau. Le terme de « plaine » est associé au vocabulaire agricole.

Figure 16 : Localisation de la Plaine de Caen dans l'occupation du sol du Calvados

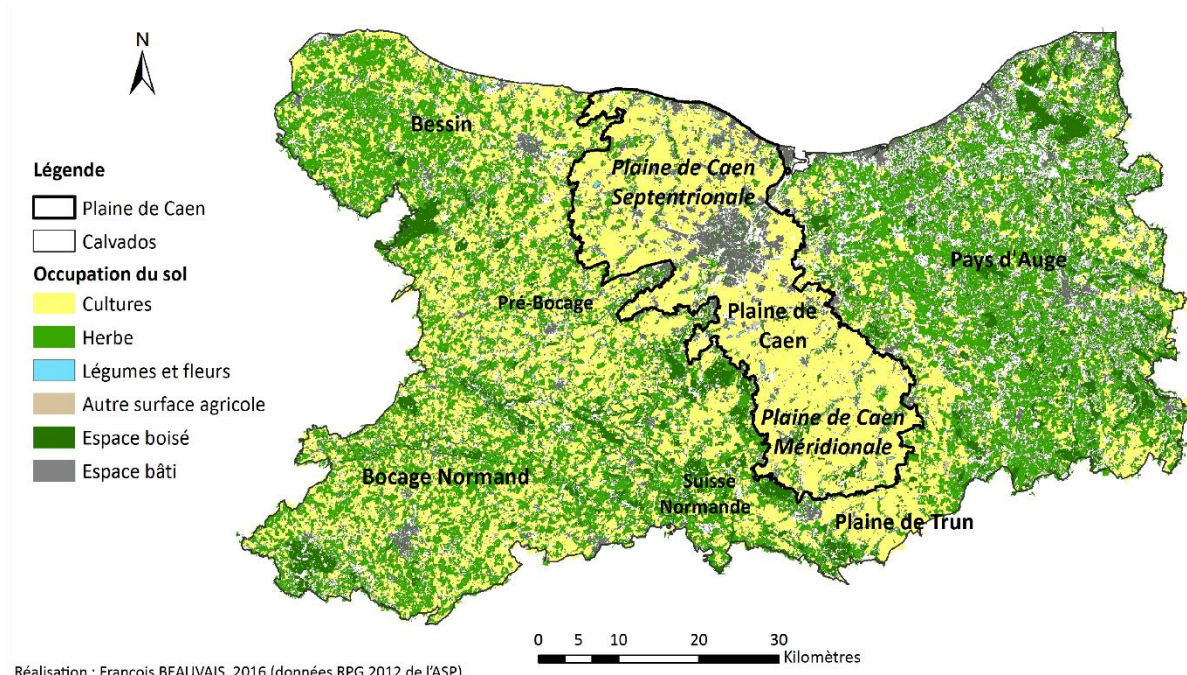
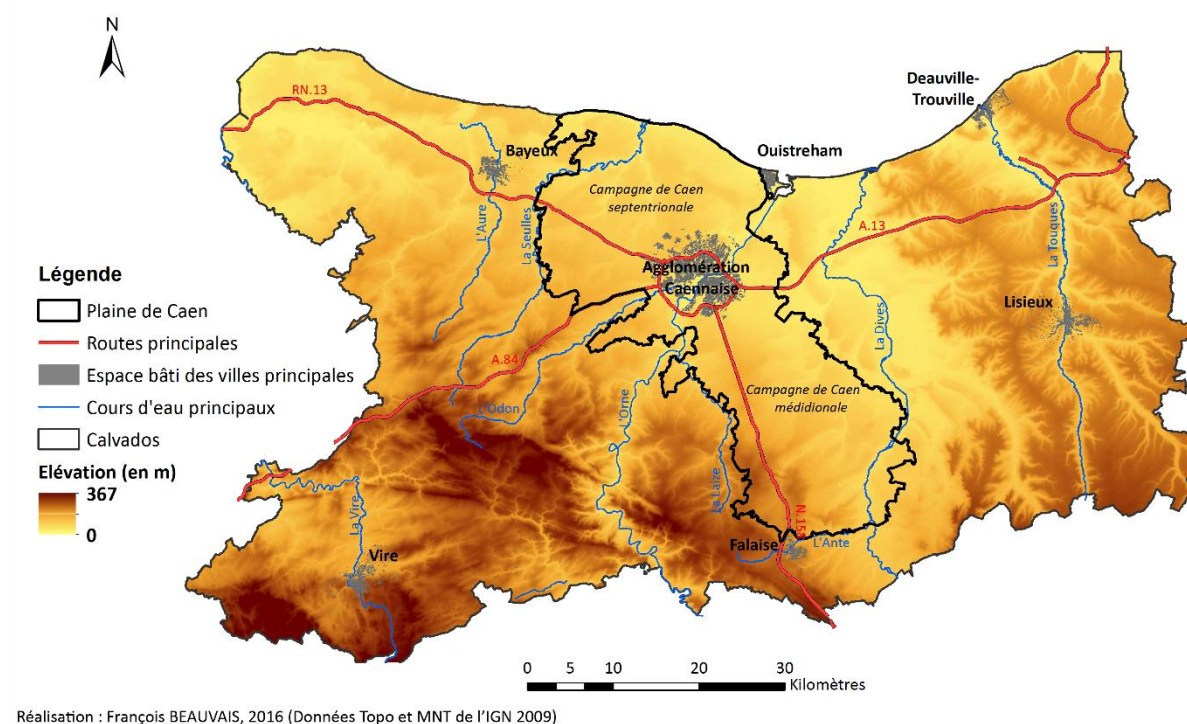


Figure 17 : Localisation de la Plaine de Caen : situation géographique et altimétrique



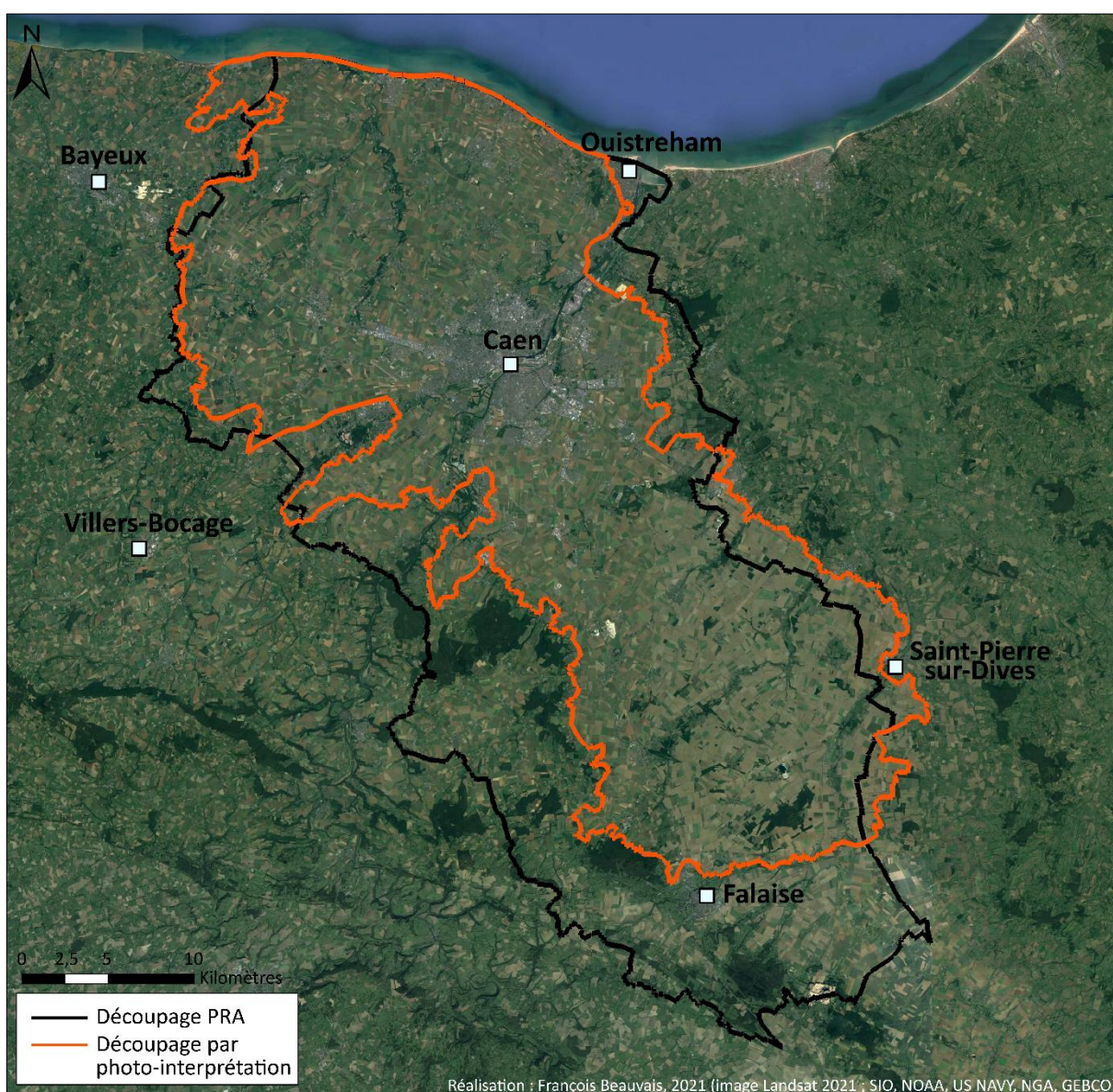
1.4.2. Une plaine agricole de grandes cultures

La Plaine de Caen est une Petite Région Agricole (PRA). Il s'agit d'une entité constituée d'un ensemble de communes qui forment une zone agricole homogène. Ce découpage est né en 1946 à la demande du Commissariat au plan pour l'aménagement et le développement de l'agriculture. Il

est notamment utile pour les études de l'INSEE sur l'évolution de l'agriculture (ORD INRA, site internet²⁹).

Cependant, lorsque l'on s'intéresse à l'occupation du sol ou que l'on se rend sur le terrain, on constate aisément que des zones comprises dans le découpage de la PRA (Petite Région Agricole) ne sont pas représentatives de la céréaliculture de la Plaine de Caen. C'est le cas par exemple de sa partie sud-ouest, à l'interface avec la Suisse-Normande (rattachée à la PRA du Bocage Normand). Les prairies et les densités de haies sont plus importantes. Ce n'est plus le paysage d'openfield des grandes cultures. Ce constat peut s'expliquer d'une part en raison du découpage communal, qui ne se juxtapose pas au paysage agricole (Marie et al., 2014 ; Preux, 2014 ; Beauvais, 2016 ; Preux 2019). D'autre part, mais nous pouvons également nous demander si certains secteurs furent rattachés

Figure 18 : L'espace de la Plaine de Caen : comparaison du découpage de la PRA avec celui effectuée à par photointerprétation



²⁹[https://odr.inra.fr/intranet/carto/cartowiki/index.php/Petites_R%C3%A9gions_Agricoles#:~:text=La%20R%C3%A9gion%20Agricole%20\(RA\)%20est.%C3%A0%20cheval%20sur%20plusieurs%20d%C3%A9partements.&text=La%20Petite%20R%C3%A9gion%20Agricole%20\(PRA,d%C3%A9partement%20et%20de%20la%20RA.](https://odr.inra.fr/intranet/carto/cartowiki/index.php/Petites_R%C3%A9gions_Agricoles#:~:text=La%20R%C3%A9gion%20Agricole%20(RA)%20est.%C3%A0%20cheval%20sur%20plusieurs%20d%C3%A9partements.&text=La%20Petite%20R%C3%A9gion%20Agricole%20(PRA,d%C3%A9partement%20et%20de%20la%20RA.)

par défaut (à l'interface avec les systèmes voisins) à la PRA ou parce que l'extension du blé a évolué depuis 1946 (date de création des PRA).

Nous proposons alors de retenir un nouveau découpage, premier résultat de la recherche (**Figure 18**), réalisée en 2016 au cours du mémoire de recherche de master 1. Il s'appuie sur les limites exposées dans l'Inventaire régional des paysages de Basse Normandie de Brunet (2004), qui reposent sur les ruptures de pentes des principales vallées exposées dans la sous-partie précédente. On suppose alors que l'entrée paysagère et l'occupation du sol reflètent la réalité du fonctionnement des systèmes agricoles. De fait, la plaine agricole de Caen-Falaise se matérialise par des espaces plans et dégagés. Pour ajuster au mieux la délimitation, le découpage est fondé, d'une part sur le MNT du Calvados (identification des ruptures de pentes des vallées et des avants-buttes du Pays d'Auge) et sur la photo-interprétation de la BD ORTHO de l'IGN 2009³⁰ (identification de l'occupation du sol et des paysages) sous Arcmap. La délimitation de cet espace d'étude a été réalisée en deux temps. Un premier tracé est effectué au 1/24 000, échelle à partir de laquelle il est possible de distinguer la délimitation des parcelles agricoles et la densité des réseaux de haies, tout en ayant une vue d'ensemble. Une révision du découpage est ensuite menée au 1/6000. On ajoute également à cela la connaissance du terrain qui aide parfois à trancher. Dès lors que le réseau de haie et les prairies deviennent denses, avec une moindre proportion des cultures, on établit les limites de la Plaine de Caen. Ainsi les zones où le découpage déborde de la plaine agricole sont exclues (**Figure 19** et **Figure 20**). En revanche le découpage s'étend parfois plus loin que les vallées qui le cadrent. C'est le cas par exemple au sud-est où les espaces dégagés débordent en direction du Pays d'Auge en allant un peu plus à l'est de la Vallée de la Dives (**Figure 21**). Au nord-ouest la plaine pénètre dans le Bessin, au-delà de la vallée de la Seulles (**Figure 22**). Enfin, la plaine ne s'arrête pas aux ruptures de pentes des principales vallées puisque l'on retrouve des champs de blé sur les versants (**Figure 23**).

³⁰ Dans le cadre de ce travail nous disposons uniquement de cette date. Cependant, au regard des photos aériennes récentes le découpage de 2009 reste valide.

Figure 19 : Exclusion de l'interface Suisse-Normande/Plaine de Caen dans le découpage de l'espace d'étude

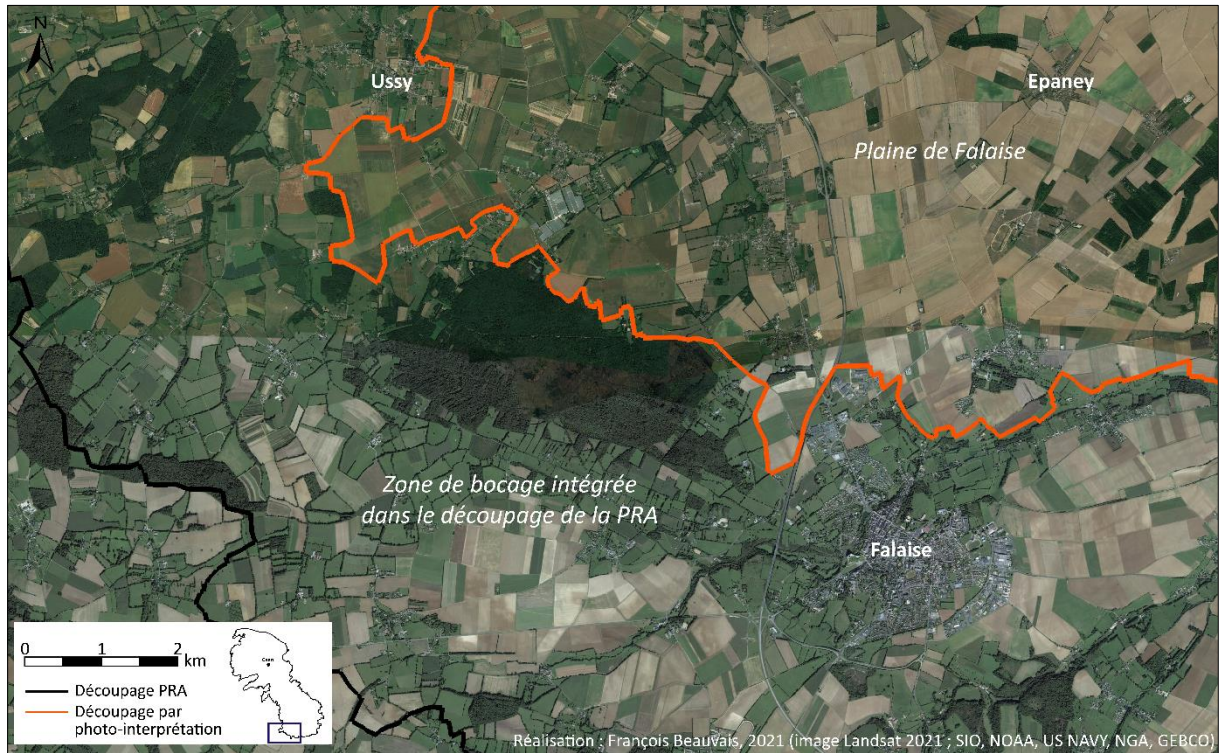


Figure 20 : Exclusion des marges du Pays d'Auge dans le découpage de l'espace d'étude

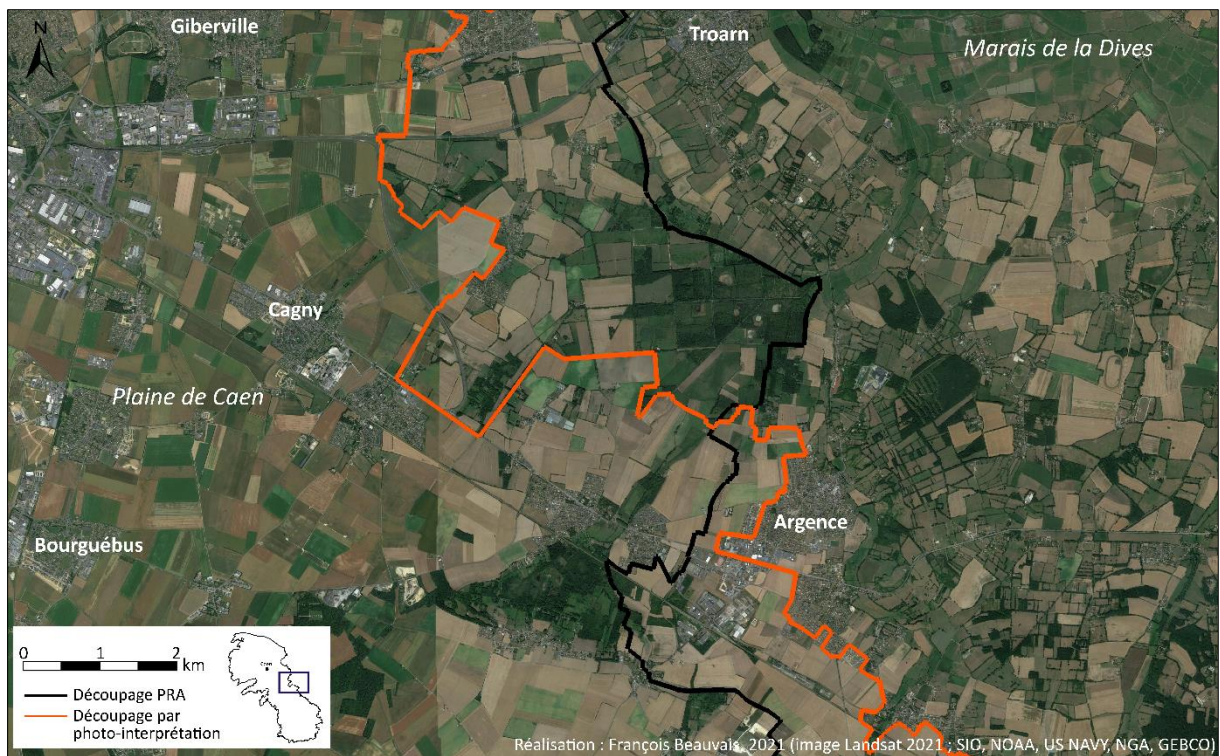


Figure 21 : Plaine de Caen débordant du découpage de la PRA

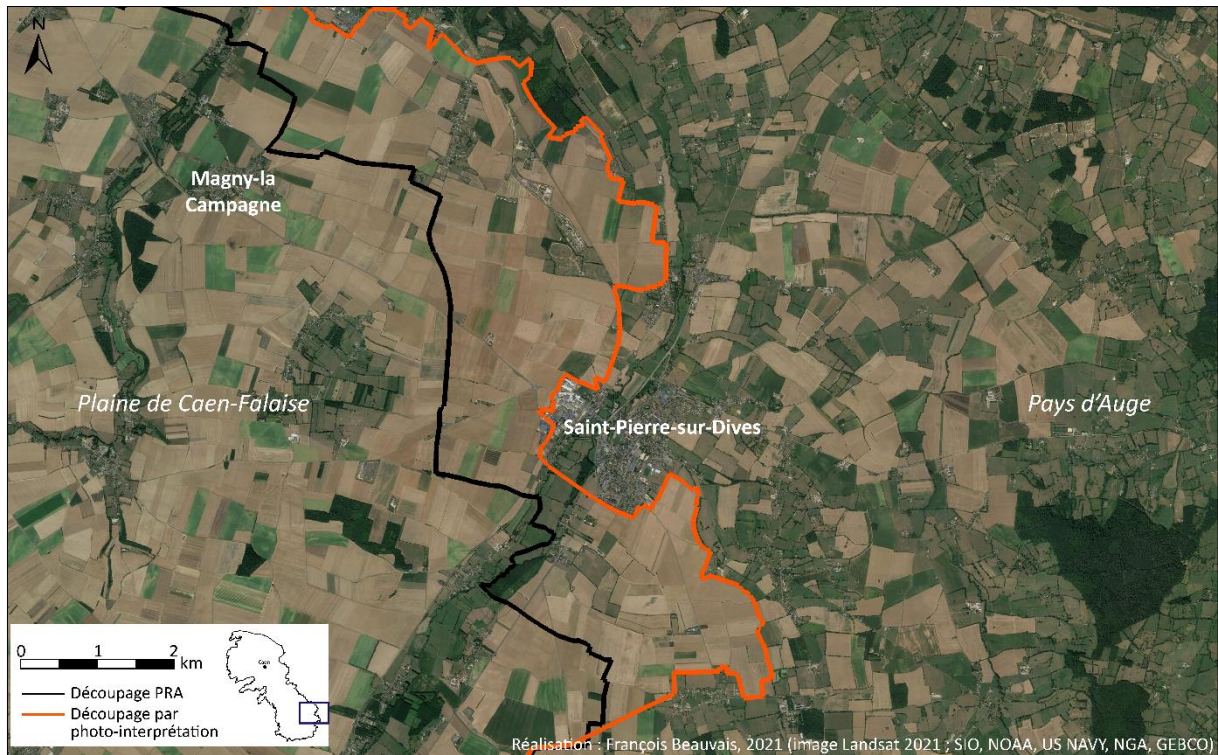


Figure 22 : Avancée de la Plaine de Caen en direction du Bessin

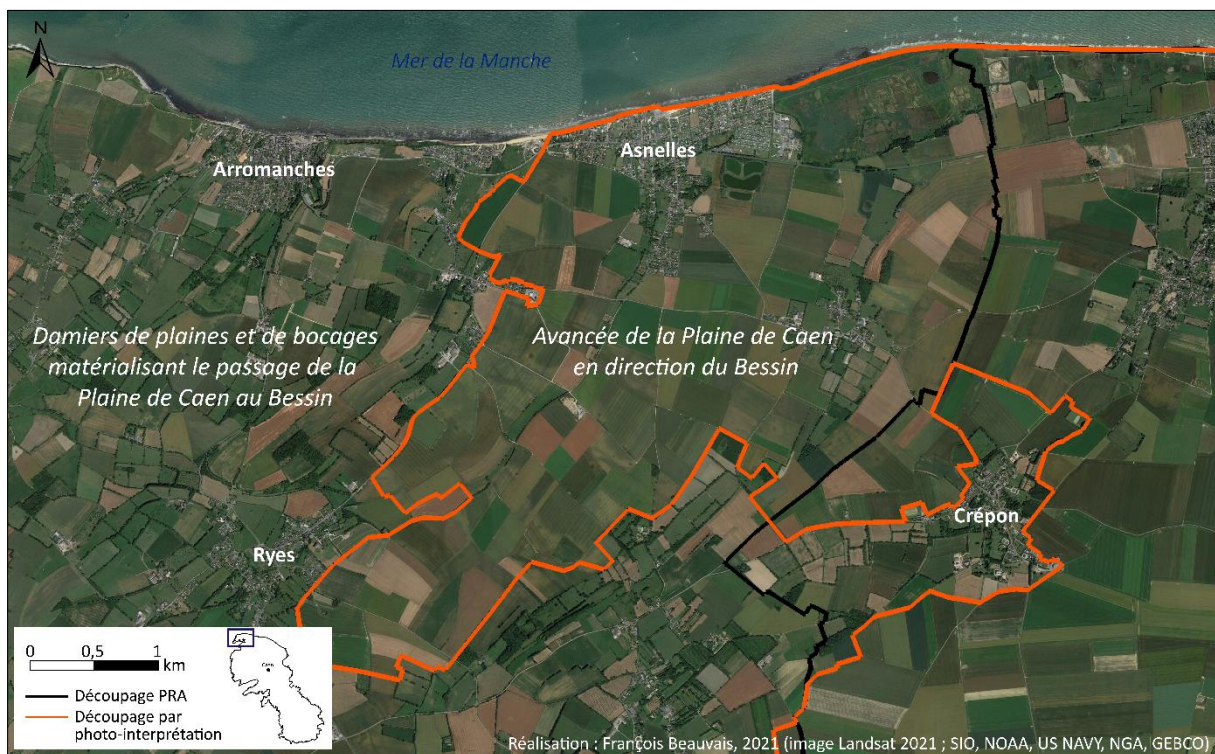
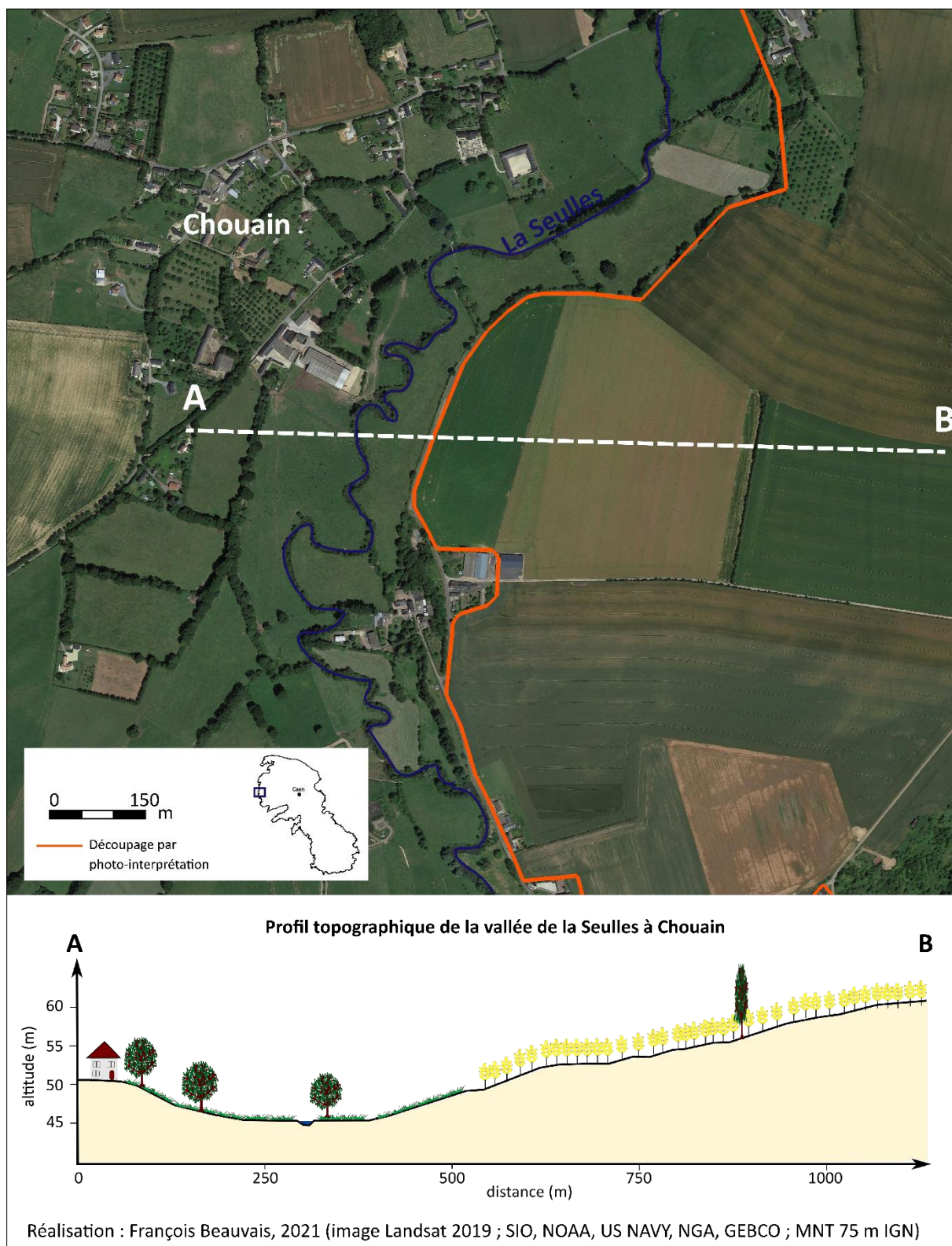


Figure 23 : Progression de la Plaine de Caen dans la vallée de la Seulles

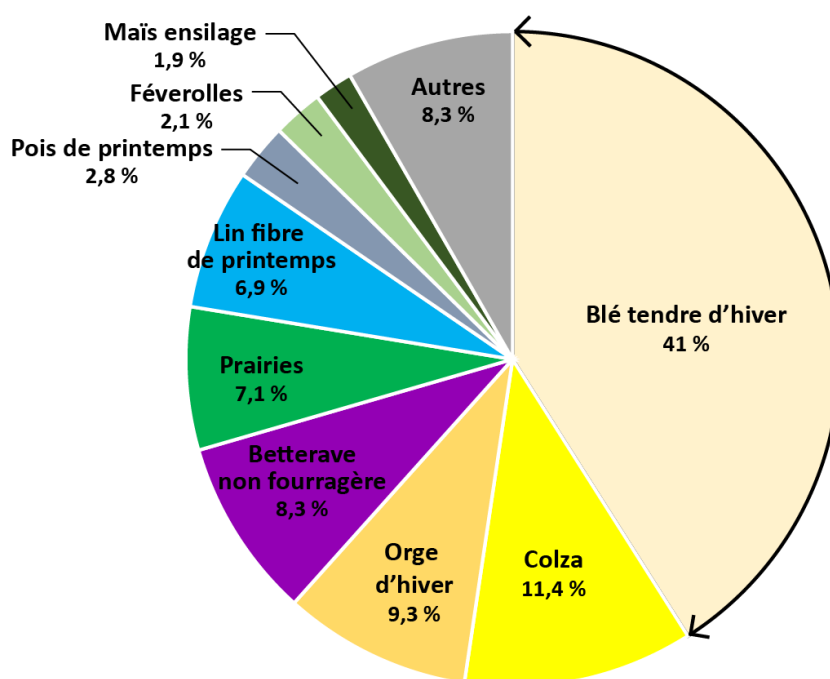


Cette délimitation est certes subjective puisqu'elle est liée à l'interprétation du paysage par l'auteur, néanmoins, elle aboutit à un découpage probablement plus représentatif du paysage d'openfield. Il permet de définir dans l'espace, le terrain d'étude que l'on entend par « Plaine de Caen et de Falaise » pour ce travail. Cette délimitation nous est apparue pertinente à la fois d'un point de vue

agricole, pour retenir la zone relative aux systèmes d'exploitation caractéristiques de la Plaine de Caen, mais également pour le volet climatique puisque dans le cas d'une occupation du sol différente des espaces d'openfield et d'une topographie plus accidentée, on peut considérer que le topoclimat y trouve ses marges. Elle permet d'être cohérent avec la conceptualisation exposée dans le chapitre 4, dans lequel l'agrosystème grandes cultures de la Plaine de Caen se matérialise dans l'espace. En revanche, la principale limite réside dans le fait que les statistiques agricoles sont fondées sur les découpages communaux. Dans le cas d'un diagnostic agricole il convient de juxtaposer les communes relatives à ce découpage qui perdrait alors en précision.

La superficie de ce découpage est de 1011 km², soit 101 000 ha. Les surfaces agricoles concernent 76 440 ha, ce qui correspond à 73 % de la surface totale. Ces surfaces agricoles sont majoritairement composées de cultures, à hauteur de 84 %. Le blé tendre d'hiver domine l'assolement avec 41 % de la SAU, devant le colza d'hiver (11 %), l'Orge d'hiver (9 %), la betterave sucrière (8,3 %), les prairies (7 %), le lin fibre de printemps (7 %), le pois de printemps (2,8 %), les féverolles (2,1 %) et le maïs ensilage (1,9 %). Les autres assolements représentent moins de 1 % du total, mais leur cumul s'élève tout de même à 8 % (Figure 24).

Figure 24 : Principales occupations du sol agricole en Plaine de Caen en 2016



Réalisation : François BEAUVAIS, 2020 (données RPG 2016 de l'ASP ; traitements réalisées à partir du «Code culture» des parcelles comprises dans le découpage réalisé par photo-interprétation)

La Plaine de Caen constitue une région agricole de grandes cultures, principalement céréalière puisque le blé et l'orge représentent 50 % de la SAU. Cependant, il convient de caractériser plus précisément cet espace agricole en étudiant la répartition et la représentativité des cultures dans l'espace agricole, pouvant induire des différences de systèmes d'exploitation agricoles³¹. L'idée est d'identifier des zones davantage occupées par certaines cultures. Pour cela nous reprenons ici de

³¹ Il existe des données OTEX (Orientation Technico-Economique des eXploitations), mais les découpages étant administratifs, ils ne correspondent pas à l'espace d'étude délimité par photo-interprétation. De plus certaines données sont soumises au secret statistique. C'est pourquoi cette analyse est réalisée à l'aide du RPG.

nouveau le travail réalisé dans le cadre du mémoire de master 1 à partir du RPG 2012 (niveau 1 en 28 groupes). En comparant ces données pour l'ensemble de la Plaine à celles du RPG 2016 **Tableau 8**, on constate que l'assolement en blé a diminué de 12 % et l'orge a augmenté de 17 %. Les protéagineux et les plantes à fibres (lin textile de printemps) ont augmenté quant à eux de 44 et 31 % mais concernent des surfaces agricoles 6 fois moins importantes. On notera toutefois la perte d'un peu plus de 600 Ha de SAU très probablement au profit de l'artificialisation des sols comme en atteste le rapport de l'AGRESTE (2020) sur la consommation du foncier agricole en Normandie entre 2008 et 2018.

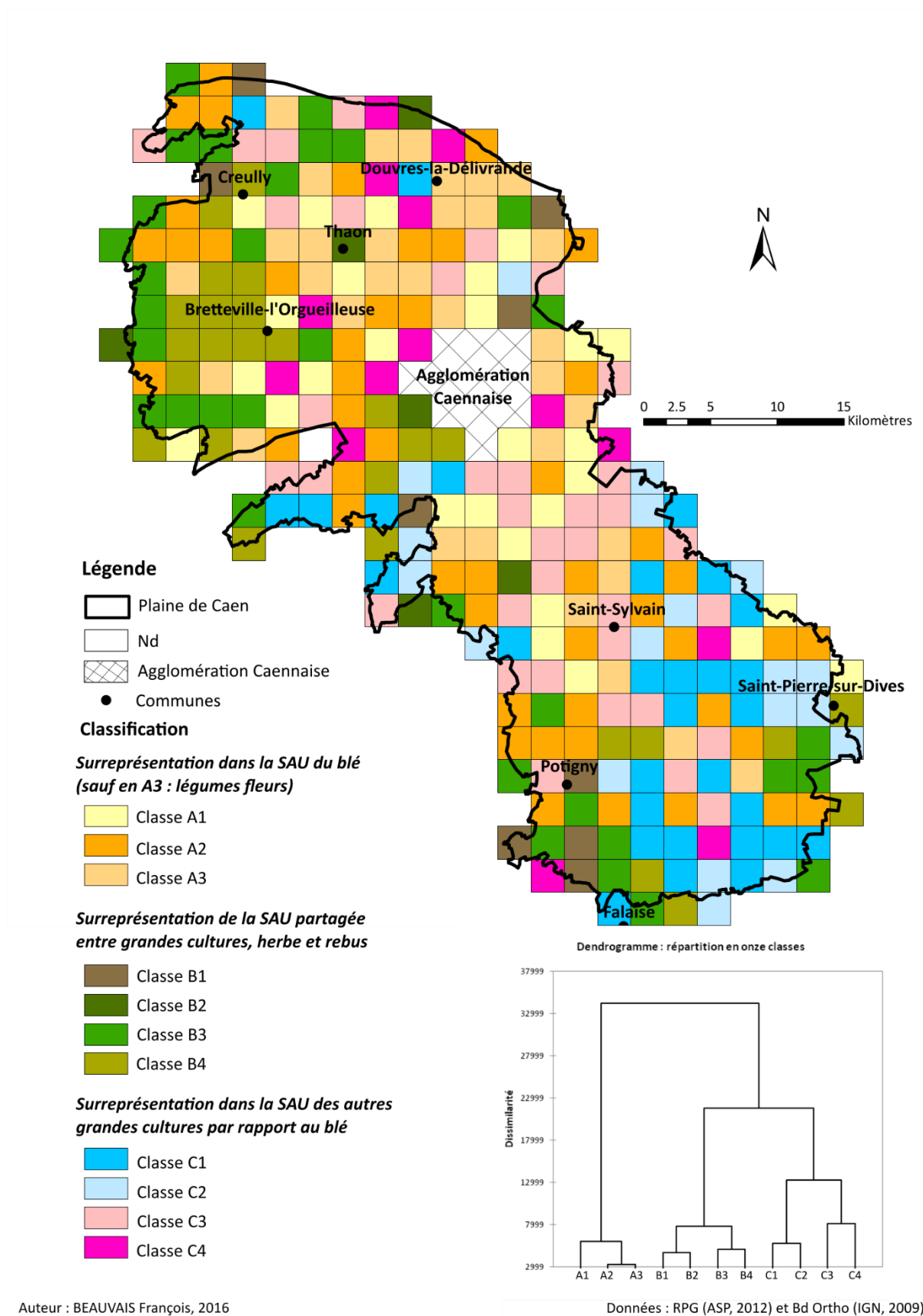
Tableau 8 : Comparaison de la répartition de l'assolement de la Plaine de Caen entre 2012 et 2016

	Surfaces (Ha)		% SAU		Evolution
	2012	2016	2012	2016	
Blé tendre	35694	31365	46,3	41,0	-12,1
Colza	8888	8707	11,5	11,4	-2,0
Autres cultures	7359	7576	10	10	2,9
Orge	6462	7546	8,4	9,9	16,8
Prairies	6235	6086	8	8	-2,4
Plantes à fibres	4057	5326	5,3	7,0	31,3
Protéagineux	2877	4144	3,7	5,4	44,0
Légumes - Fleurs	1216	1413	1,6	1,8	16,2
Autre assolement	4283	4277	6	6	-0,1
Total	77071	76440	100	100	-0,8

Réalisation : François BEAUVAIS (données RPG 2012 & 2016 de l'ASP)

La Plaine de Caen est caractérisée par l'importance de la grande culture structurée autour des céréales et plus particulièrement du blé. Néanmoins, des systèmes de production se distinguent comme en témoigne la classification ascendante hiérarchique (CAH) de l'occupation agricole du sol de la Plaine de Caen, présentée par la **Figure 25** et **Tableau 9** (détails disponibles dans l'annexe 3). Ainsi on retrouve les systèmes principalement céréaliers (blé, orge et autres céréales) et de grandes cultures (colza, betteraves, lin, tournesol) sur les plateaux. On constate toutefois que l'orge est davantage surreprésentée dans la partie sud-est de la Plaine, secteur composé de « petits sols » et où le cycle de cette céréale, plus court que le blé d'hiver, permet d'éviter la sécheresse estivale. Les systèmes mixtes alliant polyculture et élevage se localisent au niveau des petites vallées, en bordure de la Plaine de Caen et à l'ouest de sa partie nord. Les systèmes de production plutôt tournés vers le maraichage quant à eux se situent au nord à proximité du littoral, des villes ou sous forme d'isolement au sein de la Plaine de Caen. Le maraichage peut aussi se retrouver au sein des exploitations agricoles d'abord tournées vers les grandes cultures.

Figure 25 : Cartographie de la classification de la SAU de la Plaine de Caen suivant le RPG 2012 (Agrégation des îlots dans des grilles carrés de 2000m de côté – CAH selon la méthode de Ward)



Auteur : BEAUVAIS François, 2016

Tableau 9 : Classification de la SAU de la Plaine de Caen - tableau des écarts types complémentaire à la cartographie

Classes	Blé tendre	Mais/Fourrages	Orge	Autres céréales	Colza	Tournesol	Protéagineux	Plantes à fibres	Herbe	Autres cultures industrielles	Légumes et fleurs	Rebus
A1	2,0	-0,2	-0,7	-0,7	-0,8	-0,1	-1,5	-0,4	-0,9	0,1	-0,5	0,2
A2	1,0	-0,3	-0,2	-0,4	0,1	-0,7	0,9	0,0	-0,7	-0,4	-0,3	-0,8
A3	0,6	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	0,0	0,0	0,1	-0,9	0,7	2,3	-0,8
B1	-1,2	0,5	-0,3	-0,7	1,1	-0,7	0,2	-0,6	2,1	-0,8	-1,0	0,7
B2	-1,1	-0,7	-0,4	-0,6	-1,2	-0,7	-0,6	2,9	0,9	-0,6	1,3	-1,0
B3	-0,1	2,9	-0,4	-0,2	-0,3	-0,7	2,1	-0,4	0,2	-0,6	-0,3	2,5
B4	0,6	-0,1	-0,5	-0,2	-1,0	-0,4	-0,8	-0,4	1,2	-0,4	-0,3	0,1
C1	0,1	-0,5	0,9	2,8	0,2	2,4	0,9	-0,5	-0,7	-0,2	0,1	-0,1
C2	-0,8	-0,5	2,7	0,6	0,1	-0,7	-0,4	-0,6	0,0	-0,7	-0,9	-0,7
C3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	2,3	1,1	-0,5	-0,2	-0,8	0,3	-0,6	-0,4
C4	-0,9	-0,7	-0,3	0,1	-0,3	0,6	-0,4	0,1	-0,3	2,7	0,3	0,3

Réalisation : François Beauvais., 2016 (données RPG 2012 centrées et réduites par rapport à la moyenne et à l'écart-type - mise en lumière des surreprésentations et des sous-représentations (agrégation des ilots dans des grilles carrées de 2000 m de côté - classification ascendante hiérarchique selon la méthode de Ward).

Enfin, le découpage de la Plaine de Caen et de Falaise considéré pour ce travail est celui d'un plateau topographique de champs ouverts. La culture du blé domine largement la SAU. Mais si cette recherche s'intéresse à cette culture, il convient de garder à l'esprit que l'espace agricole de cette entité ne se résume pas uniquement à celle-ci puisque d'autres grandes cultures sont présentes dans les rotations culturales (orge, colza, lin, betteraves, protéagineux, oléagineux, ...) ou bien relatives à d'autres systèmes d'exploitation (élevage, maraîchage) dans des proportions beaucoup plus faibles. Cette répartition n'est pas homogène dans l'espace.

1.4.3. Le système agro-alimentaire des grandes cultures en Plaine de Caen : une déconnexion entre production, transformation et consommation ?

La Plaine de Caen se structure principalement autour de la culture du blé tendre, mais également autour d'autres grandes cultures présentes dans les rotations culturales. Toutes ces productions s'inscrivent dans un système agro-alimentaire qu'il convient de renseigner pour comprendre les enjeux agricoles de cet agrosystème³² (Preux et al., 2020 ; **Figure 26**)³³. Les informations présentées sont issues de la BD Sirene de l'INSEE, de l'enquête du mémoire de master 1 (2016) et de plusieurs sources journalistiques, en raison de l'absence de données sur les productions agricoles et leurs débouchés à l'échelle de la Plaine de Caen³⁴. En effet, les statistiques de l'AGRESTE et de FranceAgriMer sont la plupart du temps fournies aux échelles départementales ou régionales.

Les productions céréalières de la Plaine de Caen sont encadrées par les sociétés de collecte et d'approvisionnement. Leurs silos marquent d'ailleurs l'empreinte de la céréaliculture dans le paysage agricole. Les coopératives³⁵ de Creully et d'Agrial, ayant toutes deux leur siège social dans

³² L'agrosystème de la Plaine de Caen dans ce travail n'est pas uniquement abordé du point de vue biophysique, mais intègre pleinement le socio-système.

³³ Cette sous-partie est issue d'un travail co-réalisé avec Thibaut Preux (Maître de Conférences au laboratoire RURALITES – Université de Poitiers) et Laura Pauchard (Ingénieure d'études au laboratoire ESO Caen – Université de Caen) pour l'Atlas social de Caen.

³⁴ Pour ce travail nous sommes appuyés sur le découpage de la PRA, notamment pour l'usage de la BD Sirene.

³⁵ Les Coopératives se distinguent des sociétés privées. Les agriculteurs sont adhérents et ont des parts sociales qui sont fonction du chiffre d'affaire qu'ils font avec la Coopérative (les achats de céréales).

L'agglomération caennaise, collectent et assurent l'encadrement technique de la production végétale, aux côtés de deux sociétés privées (D2N et Lepicard). Elles collaborent avec d'autres organismes tels qu'Arvalis L'Institut du Végétal dans le cas par exemple d'essais variétaux. L'exploitant agricole vend les céréales auprès de ces organismes collecteurs (Annexe 4). Ces sociétés de collectent vendent le blé et autres céréales à des intermédiaires. Ce sont les courtiers qui constituent ensuite des volumes de céréales pour l'exportation vers l'étranger. Les productions sont exportées via les ports de Rouen et de Caen-Ouistreham.

Une partie du blé tendre, de l'orge et du colza produite localement est transformée par Agrial dans ses usines bretonnes, ainsi que par l'usine Sanders de Bretteville-l'Orgueilleuse qui approvisionne les éleveurs dans un rayon de 70 kilomètres. Le reste de la production céréalière trouve d'autres débouchés locaux (installation récente d'une malterie à Saint-Martin-des-Entrées, usine de bio-éthanol à Lillebonne, etc.).

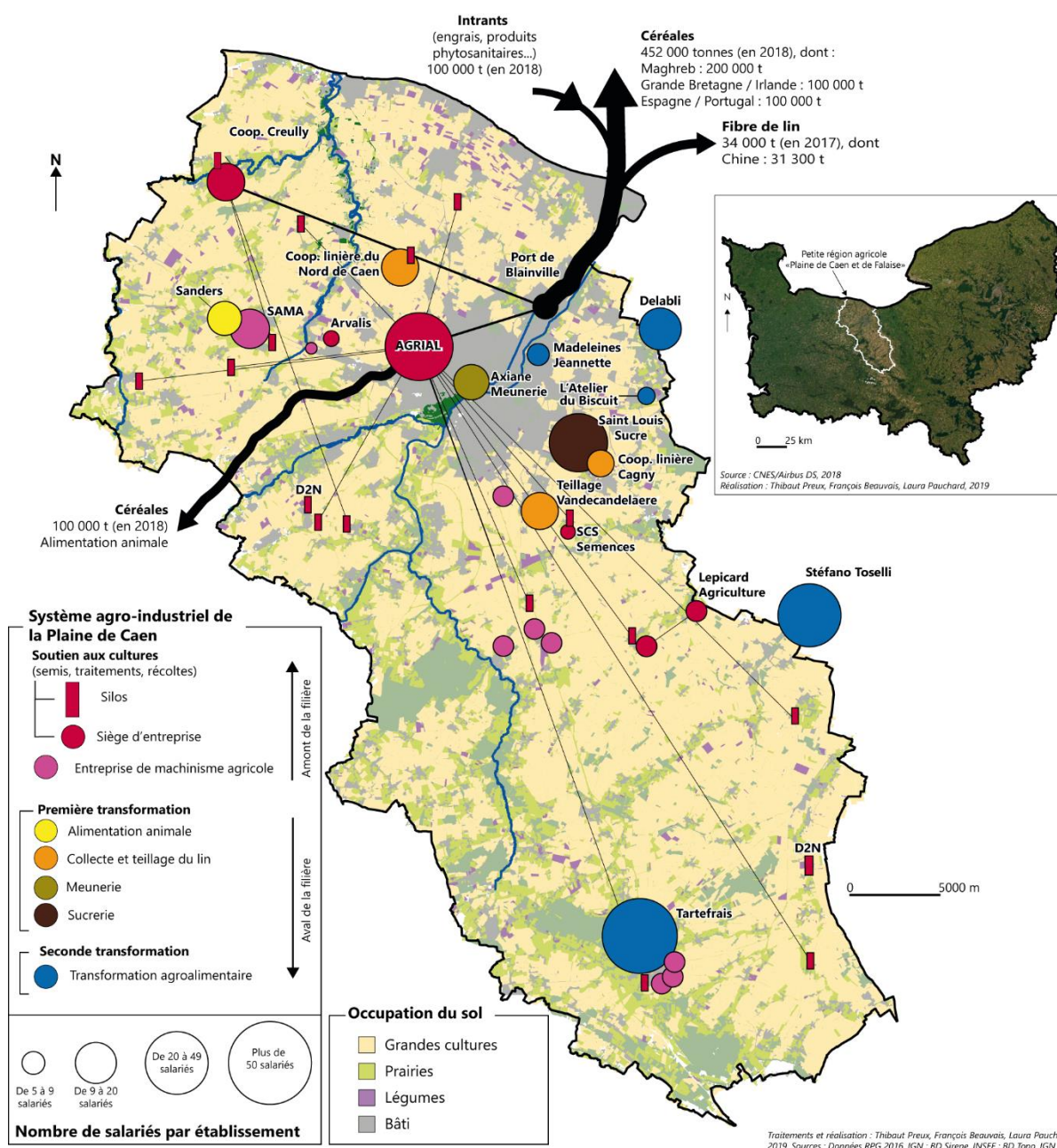
Occupant une moindre surface, les cultures industrielles à forte valeur ajoutée sont pleinement intégrées dans les rotations culturales des exploitations comme dans le système productif agricole de l'agglomération. C'est le cas en particulier pour la culture du lin qui repose sur un haut niveau de capitalisation et s'appuie sur un savoir-faire technique spécifique. Les 34 000 tonnes produites annuellement dans la Plaine de Caen sont acheminées vers les trois usines de teillage qui permettent d'en extraire la fibre (coopératives linières de Cagny et de Villons les Buissons, entreprise Vandecandelaere à Bourguébus), avant d'être exportées vers la Chine pour la fabrication textile.

Par ailleurs, chaque année, un million de tonnes de betteraves est produite par 580 exploitants. Ces betteraves sont transformées à l'usine Saint-Louis de Cagny en 160 000 tonnes de sucre, acheminés ensuite vers les pays tiers de l'Union européenne par la voie maritime. Cependant, en 2021 la fermeture définitive du site par le groupe allemand Südzucker, actionnaire unique de l'entreprise est actée. Elle engendre la suppression de 82 salariés et de 70 saisonniers. Les betteraves, cultures de printemps pourraient être remplacées par l'orge, les pois, le maïs grain ou encore les productions légumières.

L'agglomération caennaise accueille également une industrie agro-alimentaire reposant en partie sur la transformation d'une matière première issue des grandes cultures. Marqueur du paysage industriel de la Presqu'île de Caen, la meunerie Axiane transforme en farine du blé de la région Centre pour approvisionner les boulangeries normandes. D'autres entreprises de seconde transformation sont également implantées dans la Plaine de Caen (Tartefrais à Falaise, Stefano Toselli à Mézidon-Canon, Delabli à Troarn, Madeleines Jeannettes à Colombelles, etc.), qui exportent sur le marché national et international.

Alors que le développement des circuits alimentaires de proximité est souvent mis en avant dans le débat public, la géographie agricole des cultures végétales dans la Plaine de Caen révèle la déconnexion entre une production de grandes cultures, omniprésentes dans les paysages, et des activités de transformation agroalimentaire, qui ne satisfont que partiellement les besoins alimentaires d'une agglomération comptant plus de 265 000 habitants.

Figure 26 : Cartographie du système agro-industriel de la Plaine de Caen (hors légumes)



Les productions de blé tendre de la Plaine de Caen répondent à la demande mondiale en céréales et est connectée au reste du monde aussi bien dans les exportations que les importations nécessaires aux intrants. Le reste des productions céréalières trouve un débouché plus "local" pour l'alimentation animale ou d'autres débouchés. Cette logique internationale se retrouve également pour le lin exporté vers la Chine, ou même les betteraves avec les capitaux étrangers de la sucrerie de Cagny. Finalement, contrairement aux légumes qui trouvent un débouché local³⁶ (marchés, vente directe, centrales d'achat de la grande consommation ; Guillemain, 2020), les récoltes issues de ces

³⁶ Ce qui n'exclut des exportations à l'extérieur de l'agglomération caennaise comme les carottes en direction de Lessay, les choux et salades vers les usines Florette du sud de la France (Guillemain, 2020).

grandes cultures n'ont pas vocation à nourrir la population locale mais répondent à d'autres débouchés.

Conclusion du chapitre 1

La France est un pays leader dans les productions et les échanges de blé à l'échelle internationale. Inscrites dans le processus de mondialisation, les plaines agricoles de Normandie participent à ce bilan. La céréaliculture régionale occupe une place importante dans l'agriculture normande, que ce soit dans son occupation du sol ou dans son économie. Elle est connectée au reste du monde comme en témoignent les silos à grains stockant les céréales exportées ensuite par les ports de Caen ou de Rouen. Ces plaines, à l'instar de la Plaine de Caen, espace laboratoire pour cette recherche, sont alors au cœur des enjeux mondiaux alimentaires et soumises à l'incertitude des marchés économiques. Par ailleurs, les exportations ne doivent pas masquer d'autres débouchés liés à la demande intérieure, même si cette logique est surtout visible à l'échelle nationale. Au cours des dernières décennies, l'agriculture française et normande s'est intensifiée et structurée pour satisfaire ces débouchés, tant en quantité qu'en qualité. Cependant, depuis 30 ans le changement climatique est un facteur limitant comme en témoigne la stagnation des rendements en raison des jours de chaleur et des sécheresses.

Chapitre 2

Le changement climatique : une menace pour la céréaliculture normande ?

Introduction

D'après l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) la décennie 2011-2020 est la plus chaude jamais constatée dans le contexte de changement climatique contemporain. Les six dernières années sont les plus chaudes jamais enregistrées. La température moyenne annuelle à l'échelle mondiale est désormais de 14,9°C, soit 1,2°C de plus qu'à la période préindustrielle. Le réchauffement climatique et le changement climatique constituent une réalité.

Tel que nous venons de le voir dans le chapitre 1, le changement climatique est un facteur limitant aux productions agricoles, aussi bien aux échelles mondiales que locales. Les Plaines de Normandie ne sont et ne seront donc pas épargnées. Ce deuxième chapitre est une mise en contexte du changement climatique. Il en présente les causes et les observations, les scénarios RCP et la modélisation prédictive du climat sur lesquels reposent la simulation du climat futur à l'échelle mondiale mais également régionale. Enfin, le climat de Normandie et ses évolutions sont exposées.

Figure 27 : épis de blé en Normandie



2.1. Le changement climatique : définition, cause et observations à l'échelle mondiale

Réchauffement climatique et changement climatique sont des processus liés. Le premier correspond à l'élévation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère en raison de la hausse des GES (gaz à effet de serre) additifs. Le second fait référence aux effets que le premier engendre sur le climat en général (Mérot et al., 2012).

2.1.1. Changement climatique : de quoi parle-t-on ?

D'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), créé en 1988, le changement climatique concerne tout changement de climat au cours du temps. Il est défini de la façon suivante :

« Une variation de l'état du climat qui peut être identifiée (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des changements affectant la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, persistant pendant de longues périodes, généralement des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être la conséquence de processus naturels internes ou de forçages externes tels que : les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des terres » (GIEC, AR5, 2014).

A l'échelle des temps géologiques, la Terre a connu plusieurs changements climatiques naturels, provoquant une alternance de périodes froides et chaudes, dues à divers forçages externes ou internes. Dans ce travail de thèse "changement climatique" fait référence au changement climatique contemporain en cours dont l'origine est anthropique. Il est en effet causé par les activités humaines émettrices de GES additifs depuis la Révolution Industrielle. Les effets étant différents d'un point à un autre du globe, on parle parfois de changements climatiques.

2.1.2. Les causes du changement climatique (contemporain)

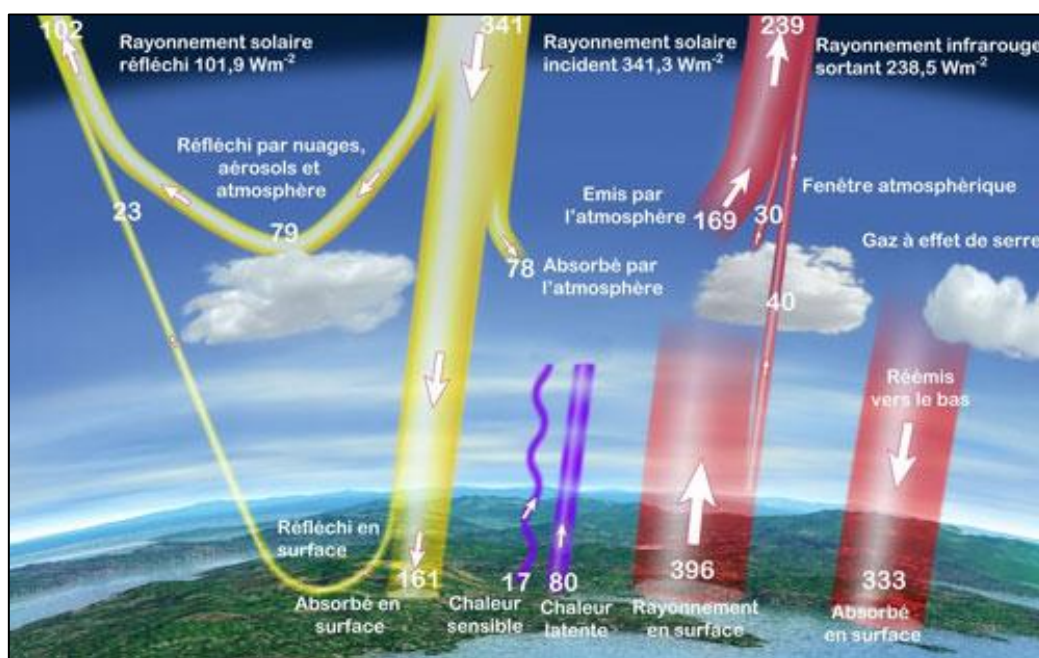
Le lien entre les activités humaines et l'accroissement des températures est sans équivoque d'après le GIEC (AR6, 2021). Pour comprendre les causes du réchauffement climatique, il convient de revenir sur l'effet de serre naturel et le bilan radiatif avant de présenter l'effet de serre additif lié aux activités anthropiques.

2.1.2.1. Effet de serre naturel et bilan radiatif

L'effet de serre (**Figure 28**) garantit une température de près de 15°C à la surface du globe et rend par conséquent possible la vie sur Terre (sans quoi la température serait de -19°C). L'échauffement de l'atmosphère s'explique par le bilan radiatif. Le rayonnement solaire incident, correspond à 342 W/m² au sommet de l'atmosphère. Deux tiers (239 W/m²) de cette énergie radiative sont absorbés par l'atmosphère (68 W/m² ; filtration via l'ozone) ainsi que les sols et les océans à la

surface du globe (161 W/m^2). Le tiers restant (103 W/m^2) est réfléchi (albédo) par l'atmosphère (nuages, aérosols, atmosphère) et les surfaces continentales et océaniques. Ces flux d'énergie correspondent aux courtes longueurs d'onde solaires (vers $0,5 \mu\text{m}$). Une fois échauffées, la Terre et l'Atmosphère émettent un rayonnement infrarouge de plus grande longueur d'onde (vers $10 \mu\text{m}$), respectivement de 396 et 169 W/m^2 . Le rayonnement infrarouge total sortant du système Terre-Atmosphère s'élève à 239 W/m^2 . 333 W/m^2 du rayonnement de surface sont réémis vers le bas et absorbés de nouveau en surface. Ceci s'explique par la présence de gaz à effet de serre, transparents au rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge (Houghton, 2011). Une partie de l'énergie reçue est restituée par la Terre sous forme de chaleur sensible³⁷ et latente à hauteur de 97 W/m^2 (flux non radiatifs). Ces deux types de chaleur participent à la redistribution de l'énergie à la surface du globe grâce aux transferts des fluides atmosphériques (masses d'air) et océaniques formant une double circulation et organisent le fonctionnement du système climatique (Vigneau, 2005).

Figure 28 : Principe de l'effet de serre (Météo-France)³⁷



L'essentiel de l'atmosphère, indépendamment de la vapeur d'eau³⁸ en quantité variable, est composé d'azote (78%) et d'oxygène (21%) mais ces gaz n'absorbent pas et n'émettent pas de radiations thermiques. Les gaz à effet de serre composent moins de 1% de l'atmosphère, parmi lesquels : le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et le protoxyde d'azote.

1.2.2.2. L'effet de serre additif

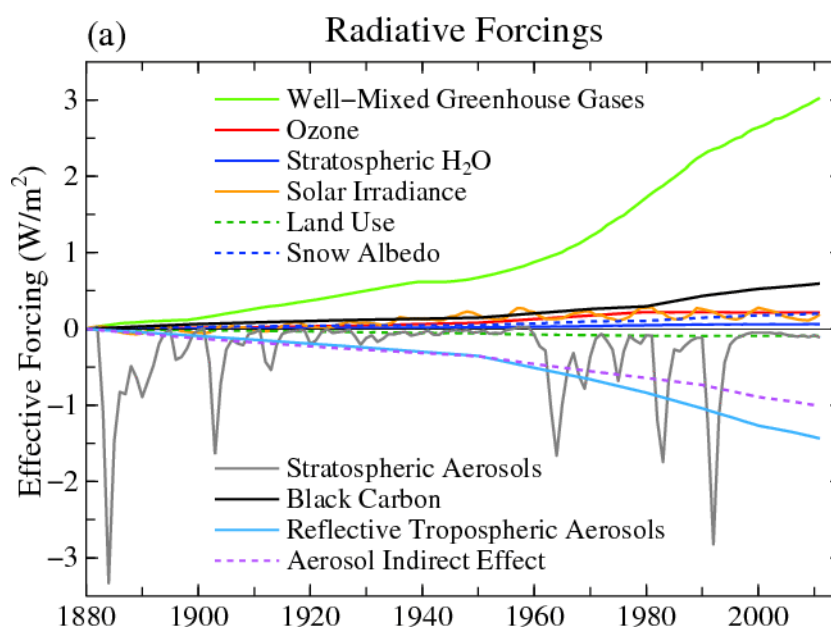
Plusieurs activités humaines participent à la création d'un effet de serre additionnel. La hausse en quantité des gaz à effet de serre accentue la capture de l'énergie émise (rayonnement infrarouge) par le système climatique. Le bilan radiatif (mesuré au sommet de la troposphère) devient positif puisqu'il correspond à la différence entre les rayonnements solaire et infrarouge. Par conséquent la

³⁷<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/comprendre-le-climat-mondial/leffet-de-serre-et-autres-mecanismes>

³⁸ La vapeur d'eau est le principal agent de l'effet de serre naturel (de l'ordre de deux tiers).

température de surface augmente, engendrant un réchauffement climatique. Les échanges d'énergie entre les différents compartiments du système climatique s'en trouvent modifiés et génèrent les changements climatiques. Le forçage radiatif augmente depuis la fin du XIX^e siècle, avec une augmentation plus marquée depuis les années 1970, passant ainsi de 1,7 à 3,2 w/m² en 50 ans (Figure 29). Cette valeur d'environ 3 W/m² correspond à l'équivalent d'une puissance solaire qui serait de 1 % supplémentaire à la valeur de base.

Figure 29 : Evolution du forçage radiatif depuis 1880 (Hansen et al., 2011)



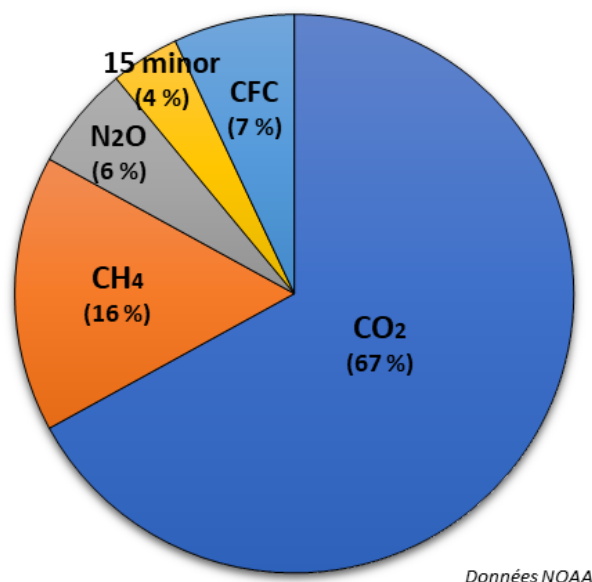
Ainsi on retrouve davantage de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en raison des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturels) mobilisés pour la production d'électricité, devant le transport, l'industrie et la construction, le secteur de l'énergie (sans électricité), le résidentiel et les autres secteurs dont le tertiaire³⁹. L'agriculture (élevage et riziculture), les décharges et les marécages émettent du méthane dont le pouvoir de réchauffement est plus fort que celui du CO₂. Le recours aux engrais est source d'émissions de protoxyde d'azote et certaines industries rejettent des gaz fluorés. En 2019, ces gaz à effet de serre contribuent au forçage radiatif respectivement de 67, 16, 6 et 7 %. Les 2 % restant étant liés à 15 autres gaz (Figure 30).

La Chine émet chaque année près de 10 000 Mt de CO₂ atmosphérique. Elle contribue à 28 % des émissions mondiales, devant les Etats-Unis (15,2 %), l'Union européenne (15 %), l'Inde (7,3 %) et la Russie (4,6 %). En considérant l'Union européenne comme une entité, ce top 5 représente 70% des émissions mondiales. Ramené au nombre d'habitants, le Qatar arrive en tête avec 37t/hab, devant le Koweït (24 t/hab), l'Arabie Saoudite (19 t/hab), le Canada (17 t/hab) et les Etats-Unis

³⁹ La part des différents secteurs est variable selon les pays. A titre d'exemple, 50 % des émissions de CO₂ en Chine sont liées à la production d'électricité, qui ne représente que 38 % aux Etats-Unis et seulement 12 % en France. A contrario, le transport est émetteur à hauteur de 41 % en France (premier secteur émetteur du pays), 38 % aux Etats-Unis et 10 % en Chine.

(16 t/hab). L'union européenne est en 8^e position avec 7 t/hab. Les français émettent 5 t/hab (Sédillot., 2020).

Figure 30 : Contribution des gaz à effet de serre au forçage radiatif en 2019



La concentration de CO₂ atmosphérique est actuellement de 416 parties par million de particules (ppm), contre 278 ppm avant la Révolution industrielle, ce qui correspond à une augmentation de près de 50%. Celle du méthane a augmenté de 721 à 1869 ppb (partie par milliard de particules), et du protoxyde d'azote de 260 à 331 ppb, soit respectivement une multiplication par 2,6 et 1,3.

La cause anthropique du réchauffement climatique est confirmée une fois de plus dans le 5^e rapport du GIEC puisque sur la période 1951-2010, il est établi que la contribution des émissions de GES est probablement de 0,5 à 1,3°C tandis que l'effet refroidissant des aérosols est compris entre -0,6 et -0,1°C. La participation des forçages naturels et de la variabilité interne du climat serait chacune comprise seulement entre -0,1 et 0,1°C.

2.1.3. Les observations du changement climatique à l'échelle globale

L'observation du changement climatique repose sur des mesures directes permettant de remonter pour les plus anciennes jusqu'au milieu du XIX^e siècle ou depuis quelques décennies à partir de la télédétection satellitaire. En 2013, dans son 5^e rapport le GIEC expose que la température de surface, combinant celle des terres émergées et des océans, a augmenté de +0,85°C sur la période 1880-2012 (**Figure 31**). D'ailleurs, le premier volet du 6^{ème} rapport, publié le 9 août 2021, précise que cette augmentation a désormais atteint +1,1 °C. Ce réchauffement s'est accentué au cours des 40 dernières années et est constaté sur la quasi-totalité de la surface du globe (**Figure 32**). Il se poursuit puisque les six dernières années sont les plus chaudes jamais enregistrées (OMM, 2020). Parallèlement les précipitations ont augmenté aux latitudes moyennes : en Europe, Amérique du Nord et du Sud, nord de l'Océanie. Elles ont en revanche diminué, notamment ces dernières

décennies en région méditerranéenne, sur le continent Africain (Sahel, Soudan, sud-est de l'Afrique Australe), Asie de l'est, sud-est de l'Australie, nord-ouest de l'Amérique et Amérique Centrale (**Figure 33**). Des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes augmentent depuis les années 1950. Les journées et nuits froides diminuent sur l'ensemble du globe. Les vagues de chaleur augmentent, notamment en Europe, Asie et Australie. Plusieurs régions du globe sont touchées par des phénomènes de précipitations intenses.

Figure 31 : Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans de 1850 à 2012 (IPCC, 2013) ;

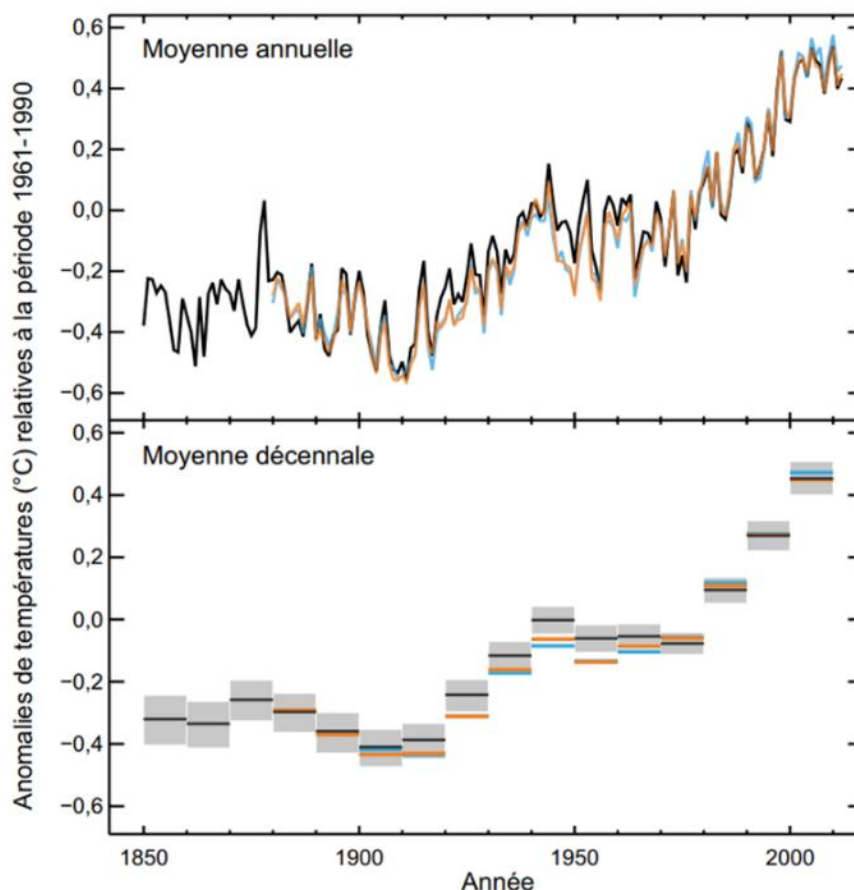


Figure 32 : Evolution de la température de surface observée entre 1901 et 2012 (IPCC, 2013)

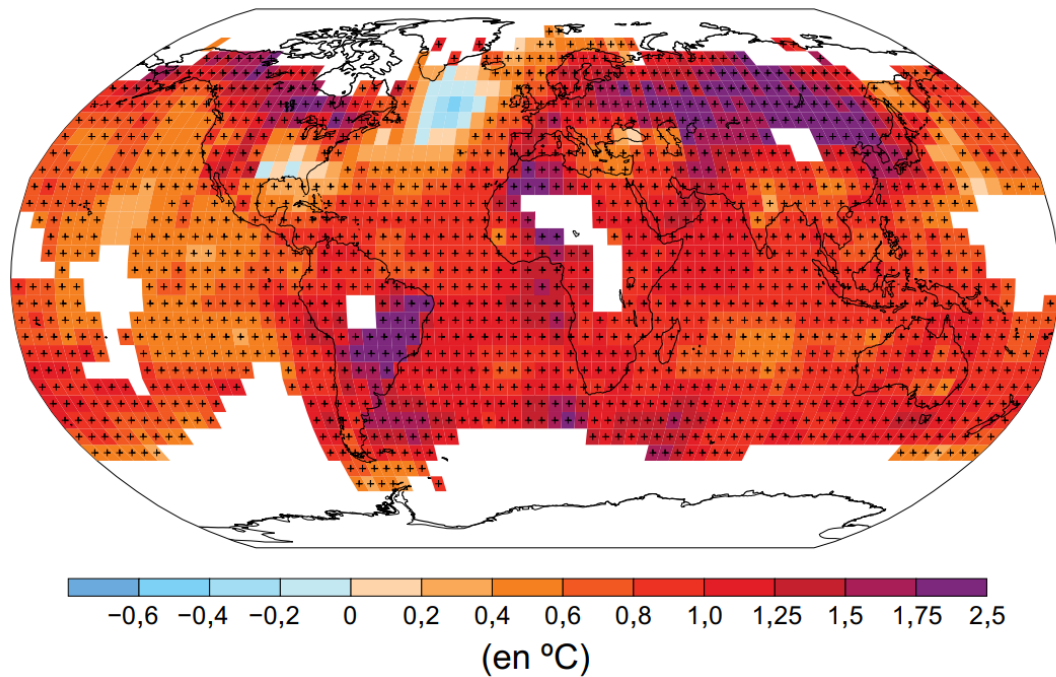
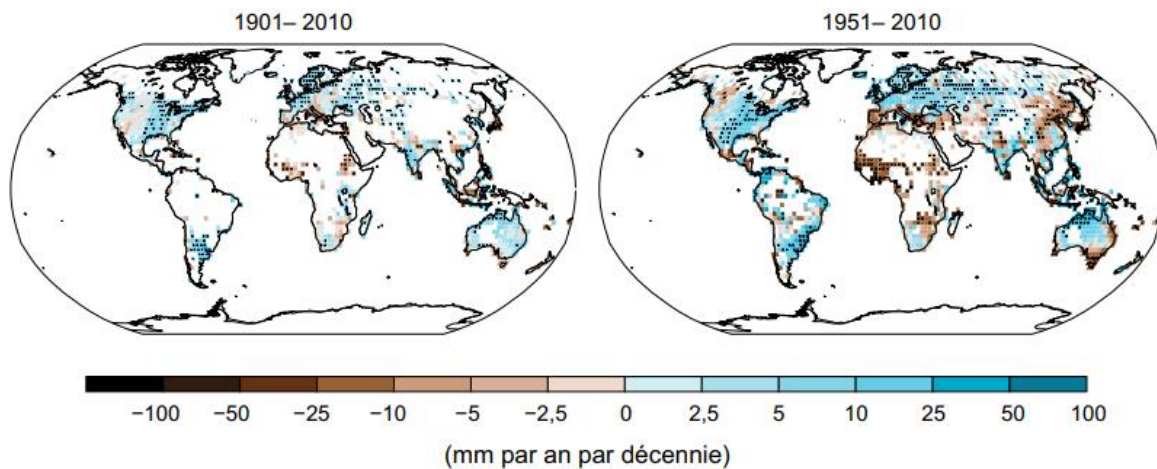


Figure 33 : Evolution des précipitations de 1901 à 2010 à la surface du globe (IPCC, 2013)



L'élévation de la température a des conséquences sur la Cryosphère. A l'échelle mondiale, la surface de la banquise a diminué de 8 Mkm² (-37 %) entre la fin des années 1980 à 2016, passant ainsi de 23 à 15 millions de km². Chaque année la perte est de 0,45 à 0,51 million de km².

La banquise de l'Arctique diminue en toute saison mais plus rapidement en été. Sa surface estivale est passée deux fois sous le seuil de 4 Mkm², en 2012 (3,4 Mkm² ; **Figure 34**) et en 2020 (3,7 Mkm²) alors qu'elle était de 6,7 Mkm² au début des années 1980.

La situation est en revanche plus complexe en Antarctique. La surface de mer englacée augmente jusqu'en 2014. Plusieurs hypothèses tentent d'expliquer ce phénomène. L'augmentation des températures a pu favoriser les précipitations neigeuses et le vent a permis l'extension de la banquise. Aussi, contrairement à l'Arctique entourée de continents, l'Antarctique est bordé par

l'océan ce qui peut favoriser son extension et expliquer dans le même temps le fait que cette région du globe ne se réchauffe pas. Ceci montre surtout que des constats contre intuitifs peuvent avoir lieu dans le cas de systèmes complexes et interconnectés et ne remet pas en cause le réchauffement planétaire⁴⁰. Néanmoins, la situation s'inverse après 2014. En trois ans l'Antarctique perd la même quantité que l'Arctique sur une période de 40 ans (Parkinson, 2019).

Figure 34 : Evolution de la banquise : valeur minimale observée entre septembre 1984 et septembre 2012 (d'après la Nasa)



Depuis 1960, les glaciers (hors calottes glaciaires) ont perdu 9000 Gigatonnes (Gt) de glace dans le monde, ce qui correspond à une couche de 20 m d'épaisseur sur une superficie équivalente à celle de l'Espagne (Zemp, 2019). Les lignes d'équilibre reculent. Par conséquent, les zones d'ablation augmentent tandis que les zones d'accumulation sont réduites et les bilans de masse deviennent négatifs. Les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique sont également touchés. Sur la période 1993-2016, ils ont respectivement perdu en moyenne chaque année 281 et 119 milliards de tonnes de glaces. Les températures du pergélisol augmentent, comme en témoignent les relevées sur la courte période 2007-2016 qui atteste d'une hausse de 0,3°C (GIEC, 2019).

Le recul des surfaces enneigées et englacées réduit l'albédo global et donc accélère de réchauffement climatique (rétroaction positive).

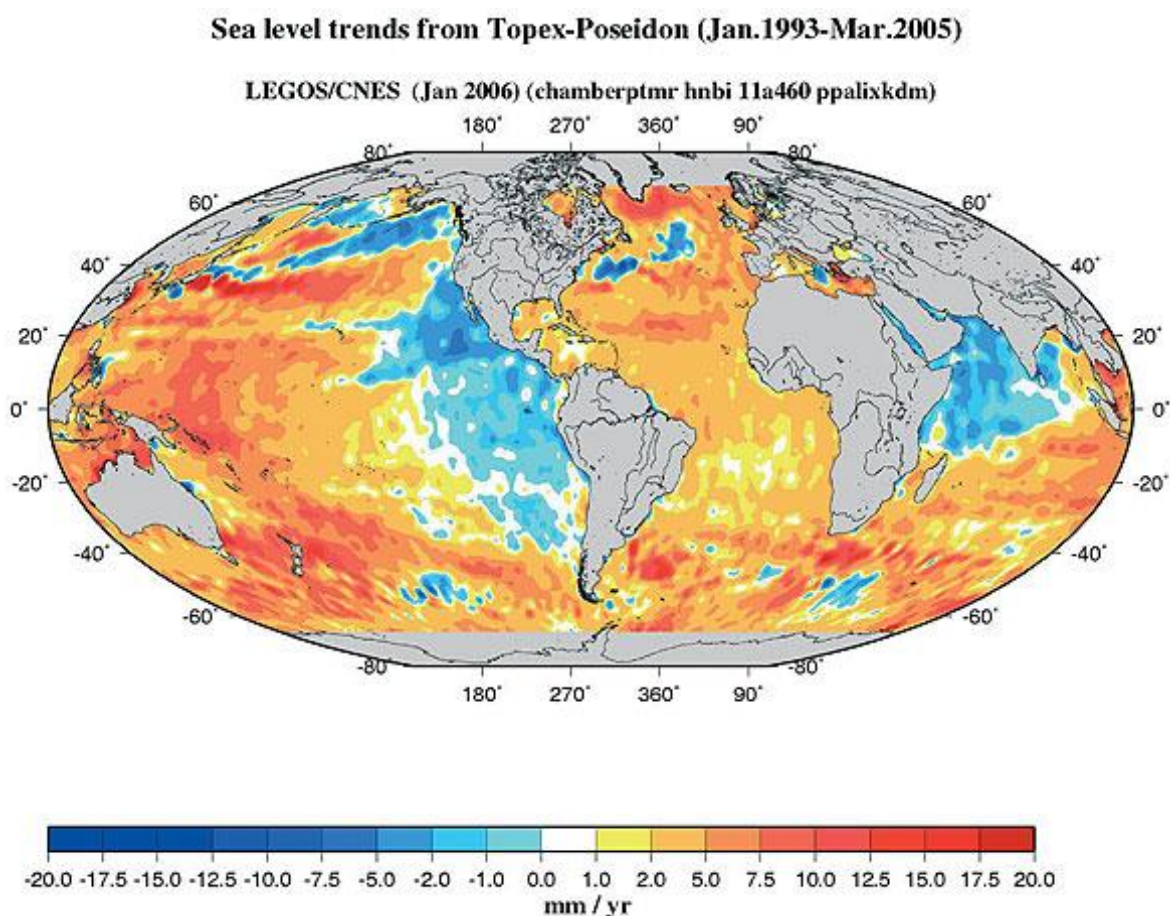
La fonte des glaces continentales d'eau douce (glaciers et calottes glaciaires), avec l'augmentation des températures de l'eau et la dilatation thermique (cause principale) des océans engendrent une hausse du niveau marin. Une hausse de 20 cm est mesurée pour le XXe siècle, correspondant à un rythme de 2 mm/an. Depuis 1993, cette progression est de 3,2 mm/an (Church et White, 2011). Si les marégraphes permettent d'évaluer l'augmentation du niveau des mers depuis la fin du

⁴⁰ Réaction de Chris Rapley (climatologue à l'University College de Londres) par rapport à l'article de Parkinson (2019) dans le journal Le Parisien, 02 juillet 2019 « Fonte de la banquise en Antarctique : tout a basculé en 2014 et on ignore pourquoi ».

XIX^{ème} siècle, les satellites altimétriques, utilisés depuis le début des années 1990 démontrent que l'élévation est inégale d'un point à un autre du globe (Figure 35).

Finalement, l'augmentation de la température, la modification des régimes pluviométriques, le recul des glaciers, la fonte de la banquise et du pergélisol sont autant de manifestations du changement climatique à l'échelle du globe.

Figure 35 : Elévation du niveau des mers entre à l'échelle du globe entre janvier 1993 et mars 2015 à partir des mesures du satellite d'océanographie TOPEX-Poseidon (d'après le GIEC, AR5)



2.1.4. Les évolutions attendues pour le futur

Le changement climatique n'est pas sans conséquences sur les sociétés humaines, les milieux et les territoires, exposés et vulnérables, aussi bien par rapport aux événements extrêmes que par les modifications plus lentes mais régulières. Pour l'anticiper et rendre les éléments exposés résilients, les projections à partir de modèles climatiques sont nécessaires pour établir des études d'impacts.

2.1.4.1. Le recours à la modélisation prédictive du climat

Avant d'exposer les projections sorties des modèles climatiques pour les prochaines décennies, il convient de présenter la modélisation prédictive du climat puisque celle-ci est mobilisée pour caractériser le futur et simuler ses conséquences sur l'agrosystème céréalier normand.

Pour comprendre la modélisation numérique du climat il faut remonter au début du XX^e siècle, aux origines de la prévision numérique du temps. En 1904, Wilhelm Bjerknes émet l'idée qu'il est possible de calculer l'évolution d'une situation météorologique à partir des données d'observation d'une situation antérieure, en mobilisant les lois qui gouvernent la dynamique de l'atmosphère (Guillemont, 2007 ; Touzé-Peiffer, 2018). Quelques années plus tard, en 1922, Lewis Fry Richardson, mathématicien anglais, expose la possibilité d'appliquer des équations discrétisées. Il réalise une première prévision de la circulation atmosphérique à +6h. Pour cela il divise le globe en carreaux de 230 km (latitude) x 200 km (longitude), contenant des niveaux verticaux (3200 colonnes verticales avec une atmosphère découpée à 4, 7 et 12 km d'altitude) et s'appuie sur 7 équations mathématiques pour calculer les mouvements de l'air. Malheureusement, après 6 mois de calculs, les résultats sont inexacts. Néanmoins, Richardson avec cette première expérience dresse les fondements des modèles numériques de prévision météorologique et de climat (Gachon, 2000). Il faut attendre l'apparition des premiers ordinateurs et leur puissance de calculs pour les premières prévisions numériques du temps. En 1950, l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), premier ordinateur électronique programmable, permet une première prévision météorologique à 24 h. Ce sont les travaux de recherche du Météorological project effectués par Von Neumann, Charney et Fjortoft à l'Université de Princeton. Quelques années plus tard ils parviennent à établir des prévisions à l'échelle du territoire des Etats-Unis. Ainsi, le premier modèle de circulation atmosphérique générale est créé en 1955 par Norman Phillips (Touzé-Peiffer, 2018) pour représenter les propriétés moyennes des déplacements de l'atmosphère dans le cadre des premières prévisions météorologiques numériques. Dès les années 1970 les modèles deviennent sphériques (à l'échelle du globe). Ils ne sont plus uniquement utilisés en météorologie mais servent désormais également pour la recherche en climatologie. C'est à partir de cette période qu'ils sont mobilisés pour simuler l'effet des GES sur les températures moyennes. En 1975, Manabe et Wetherald réalisent une simulation avec une concentration de CO₂ multipliée par deux et aboutissent à une augmentation de la température de 2,9°C (Edwards, 2010). C'est le premier test de sensibilité à partir d'un modèle de circulation générale. Les autres expériences à partir de modèles simulant une hausse des GES obtiennent également une augmentation de la température. En 1979, en comparant les travaux de plusieurs groupes, Charney établit un intervalle de confiance situé entre +1,5 et +4,5°C et ce dernier est toujours utilisé par le dernier rapport du GIEC (Touzé-Peiffer, 2018). Ces résultats confirment l'effet de serre découvert en 1827 par Fourier⁴¹ et le lien CO₂/température d'Arrhenius qui fut le premier à calculer le bilan radiatif⁴². Ils valident également

⁴¹ En 1827 Joseph FOURIER expose que la "température de surface s'ajuste pour équilibrer le bilan d'énergie à la surface et que ce bilan est dominé par deux phénomènes, l'absorption du rayonnement solaire (qui apporte de l'énergie) et les échanges par rayonnement infrarouge (qui contrôle les pertes d'énergie vers l'espace)" (Bard 2004, Pierrehumbert 2004, Dufresnes et al, 2006).

⁴² Les résultats présentés sont faux en raison de nombreuses imprécisions mais Arrhenius présente une théorie fondatrice. C'est à partir des années 1980 que l'on commence à calculer précisément les échanges par rayonnement à l'aide de codes de transfert radiatif et de bases de données spectrales en spécifiant les constituants de l'atmosphère et de la surface terrestre. La grandeur calculée est le forçage radiatif exprimé en W/m² (Dufresne, 2006).

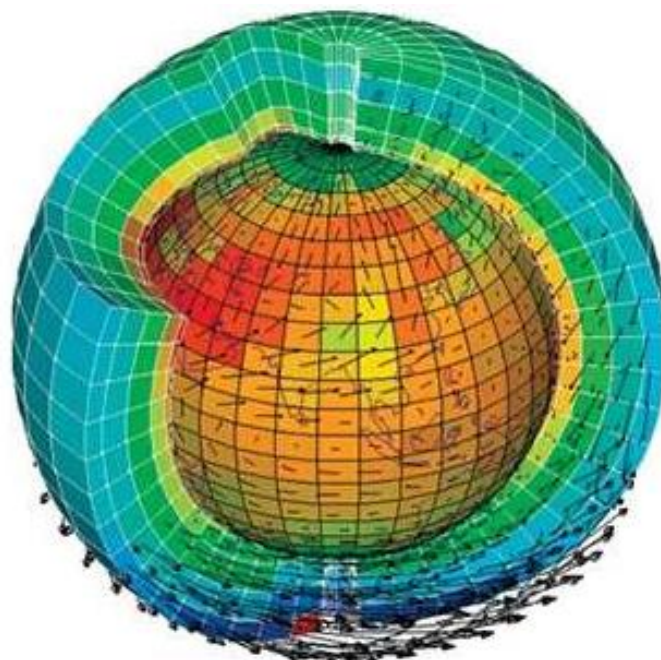
les calculs d'Angström qui aboutissent à une élévation de la température de +2,1°C. Plusieurs dynamiques ont favorisé le développement des modèles dont Guillemot (2007) présente une synthèse. Elles sont d'abord techniques avec une augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et le développement des réseaux d'observation satellitaires. L'essor des sciences de la Terre (paléoclimatologie, océanographie, géologie, géophysique, ...) avec de nouvelles techniques d'investigation (datations isotopiques, tomographie sismique, mesures météo, carottages sédimentaires et de glace) permettent de nouvelles connaissances sur le système climatique et les éléments agissant sur celui-ci. Ces recherches en paléoclimatologie révèlent la rapidité des variations climatiques et confirment le lien entre la hausse des GES et de la température en remontant plusieurs milliers et centaines de milliers d'années. Au cours de la Guerre Froide, les recherches sur les modèles climatiques sont soutenues aux Etats-Unis et en URSS pour agir sur le climat et le contrôler comme une arme (géo-ingénierie). Très rapidement ces projets sont abandonnés au profit de préoccupations environnementales : le climat devient un sujet d'actualité (inquiétudes sur le trou de la couche d'ozone, l'hiver nucléaire si explosions nucléaires, pluies acides, sécheresse au Sahel et famine associées au début des années 1970). Dans les années 1990 les modèles d'atmosphère sont couplés avec des modèles relatifs aux autres compartiments du système climatique (cryosphère, surfaces continentales, végétation et océan)⁴³ qui échangent entre eux de l'énergie, de l'eau (sous forme solide, liquide ou gazeuse) et des gaz (carbone, méthane, oxygène) – (Poitou et *al.*, 2014). L'ensemble forme ce que l'on appelle un modèle « système Terre ». Ils sont composés :

- d'une partie dynamique, qui transporte les variables selon les vents et simule ainsi le déplacement des masses d'air
- d'une partie physique simulant les échanges entre les compartiments, comprenant les paramétrisations des processus inférieurs à l'échelle de la maille dont les effets climatiques sont estimés statistiquement (convection, turbulence près de la surface, évaporation, écoulement de l'eau, précipitations, chauffage de l'atmosphère par le rayonnement solaire et infra-rouge ...).

Les mailles horizontales de ces modèles globaux sont de l'ordre de 100 km de côté. Les paramétrisations sont développées selon plusieurs niveaux verticaux pouvant aller jusqu'à 50 mailles sur 30 km d'épaisseur de l'atmosphère (**Figure 36**). Il existe aujourd'hui une quarantaine de modèle globaux dans le monde (Le Treut, 2011).

⁴³ Les premiers modèles couplés ont été développés dans les années 1960, associant les évolutions d'atmosphère et de l'océan (Planton et Dufresne, 2011).

Figure 36 : Représentation conceptuelle du découpage en grille de l'atmosphère dans un modèle climatique global (d'après L. Fairhead. LMD. CNRS)



Ces modèles ont donc pour objectif de représenter le climat de la planète à différentes échelles spatiales (du global au régional) et temporelles (de la prévision météorologique de quelques jours à la prédiction climatique de plusieurs décennies ou siècles). Cette modélisation numérique du climat mobilise un ensemble de fonctions mathématiques pour représenter les processus physiques du système climatique et effectuer des simulations à l'aide de supercalculateurs (programmes informatiques). La physique intervient avec l'usage de la thermodynamique (étude des mouvements de chaleur, donc de l'énergie et de ses transformations) et de la mécanique des fluides (étude du comportement des fluides). Le modèle évolue librement⁴⁴, résultat de l'ajustement entre l'énergie reçue et de celle perdue et parce qu'il existe des déterminants du temps et du climat qui sont connus ou prévisibles (Dufresne, 2006). Plusieurs simulations du climat du futur sont effectuées pour différents scénarios d'émission de GES. Le climat du futur résulte de la réponse du système au forçage. Les modèles numériques sont au centre de la question du changement climatique depuis les années 1980, période à partir de laquelle les climatologues ont alerté le public et la classe politique sur les risques d'un réchauffement global (Guillemot, 2007). Ces simulations alimentent notamment les synthèses du GIEC et elles exposent la nécessité de politiques climatiques afin de réduire les émissions de GES.

2.1.4.2. Les scénarios en entrée des simulations climatiques

L'intensité du changement climatique pour le futur dépendra des mesures politiques prises à l'échelle internationale pour limiter/réduire les émissions de GES en fonction de plusieurs variables telles que l'évolution socio-démographique, les changements technologiques, d'utilisation des sols ou encore de l'énergie. Pour simuler le climat du futur, le GIEC retient les scénarios SRES (Special

⁴⁴ Contrairement au modèle météorologique qui doit coller au plus près de l'état de l'atmosphère à un instant précis et qui est rappelé au fur et à mesure par les observations.

report on emissions scenarios) à la fin des années 1990. Ils sont mobilisés dans les 3^e et 4^e rapport de ce groupe d'experts. Ils correspondent à des hypothèses d'évolution socio-économiques (évolutions sociétales, modes de vie, énergie, mondialisation) traduites en émissions de GES pour le futur (Nakicenovic, 2000) et que l'on retrouve en forçage des simulations climatiques. Cependant, l'évolution du contexte socio-économique du début du XXI^e siècle rend nécessaire la définition de nouveaux scénarios (Mos et al., 2010). En effet, la rapidité du développement des pays émergents surpasse ces scénarios et les évolutions démographiques pour les prochaines décennies sont revues à la baisse. Dans le même temps le besoin d'explorer l'impact de politiques climatiques réduisant les émissions de GES devient de plus en plus prégnant. De plus, il convient de prendre en compte que ces émissions pourraient diminuer après 2100, une fois la phase de croissance terminée (Mondon et Imbard, 2013). C'est ainsi que la communauté scientifique détermine les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway ; Van Vuuren, 2011 ; **Figure 37** ; **Tableau 10**) pour la période 2006-2300 sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature scientifique. Mobilisés dans le dernier rapport du GIEC (AR5, 2014), ils établissent directement des trajectoires d'émissions et de concentration de GES, d'ozone, aérosols et d'occupation des sols. Quatre profils d'évolution des concentrations de GES sont retenus et présentés selon leur forçage radiatif (modification du bilan radiatif planétaire) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude). Plus la valeur du forçage est élevée, plus l'atmosphère emmagasine de l'énergie et se réchauffe. Le scénario RCP 2.6 correspond à une augmentation jusqu'à 3 W/m² avant 2050 puis à un déclin. Il correspond à la mise en place de politiques climatiques réduisant les émissions de gaz à effet de serre, proches des objectifs de la COP 21 de l'accord de Paris sur le climat (2015) de contenir le réchauffement climatique à +2°C à l'horizon 2100. Le RCP 4.5 fait écho à une stagnation de l'évolution de ce bilan en seconde partie du XXI^e siècle. Pour le RCP 6.0 cette stabilisation s'opérerait au début du XXII^e siècle et la croissance du forçage radiatif reste plus faible que le scénario RCP 8.5. Ce dernier illustre le climat sans politique environnementale dans le cas d'une poursuite de la logique de croissance économique actuelle. Il est le plus pessimiste (GIEC, AR5, 2014).

Figure 37 : Les RCP comparés aux précédents scénarios SRES (in Planton et al., 2013)

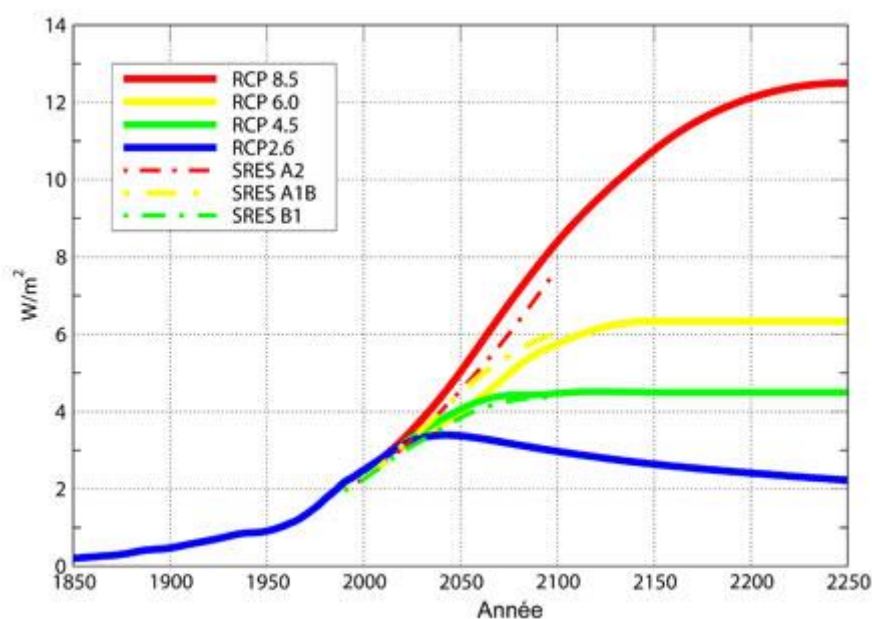


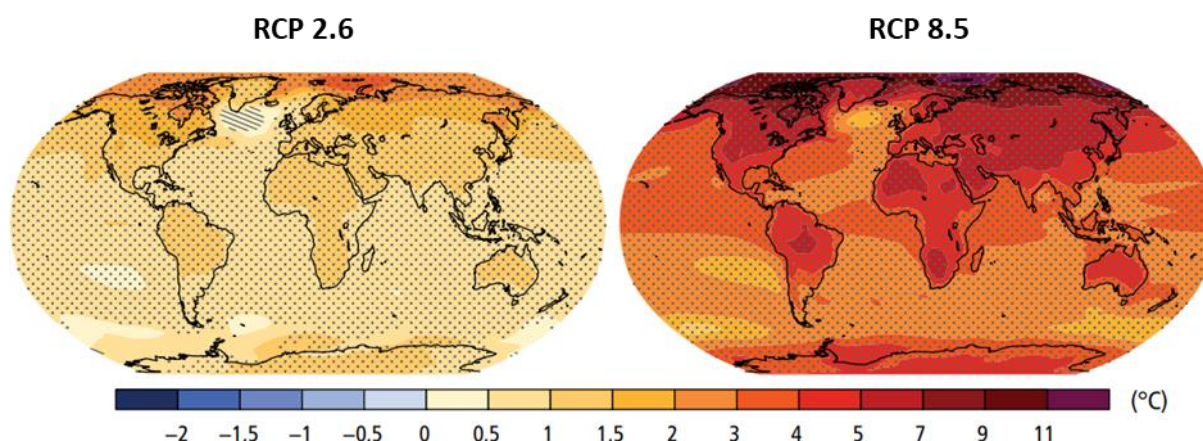
Tableau 10 : Forçage radiatif, concentration en ppp et trajectoire des quatre scénarios RCP (Moss et al., 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	croissante
RCP6.0	~6W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

2.1.4.3. L'évolution du climat associée : synthèse du cinquième rapport du GIEC

A partir de l'évolution des émissions de GES et en considérant l'absence d'éruptions volcaniques ou de fluctuations rayonnement liées aux éruptions solaires, la température moyenne du globe sur la période 2016-2035 pourrait être supérieure de 0,3 à 0,7°C par rapport à la période 1986-2005. L'élévation de la température saisonnière et annuelle devrait être plus importante dans les régions tropicales et subtropicales qu'aux latitudes moyennes (Figure 38).

Figure 38 : Augmentation de la température moyenne en surface à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5)



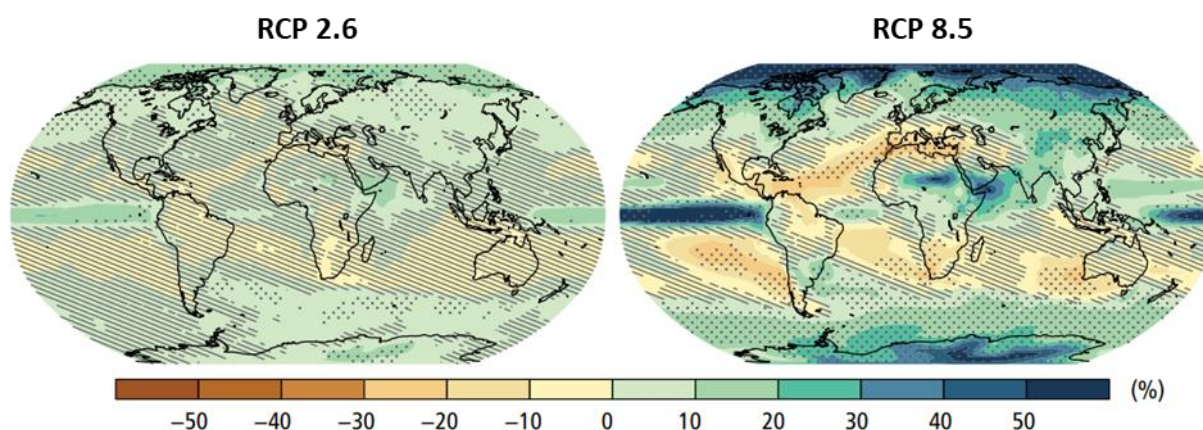
D'après les simulations du projet CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), d'ici la fin du siècle (1981-2100), la température pour le scénario RCP 2.6 n'excéderait pas celle de l'horizon proche. En revanche, l'augmentation est plus prononcée pour les autres scénarios : + 1,1 °C à + 2,6 °C avec le RCP4.5, + 1,4 °C à + 3,1 °C avec le RCP 6.0 et + 2,6 °C à + 4,8 °C pour le RCP 8.5 (**Tableau 11**). L'Arctique devrait se réchauffer plus vite que le reste de la planète. Les continents se réchaufferont très probablement plus rapidement que les océans compte-tenu de leur inertie thermique. En comparant à la période préindustrielle le GIEC juge improbable que l'augmentation des températures soit supérieure à +2°C avec le RCP 2.6. En revanche il est probable que les RCP 6.0 et 8.5 dépassent ce seuil et il n'est pas exclu que le seuil de +4°C soit dépassé dans le cas du RCP 8.5. Les régions continentales devraient voir une augmentation des extrêmes chauds (plus intenses et plus longs). Si leur occurrence devait décliner, les extrêmes froids pourraient toujours survenir.

Tableau 11 : Évolution projetée de la moyenne de la température de l'air à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen des mers pour le milieu et la fin du XXI^e siècle par rapport à la période de référence 1986-2005 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5)

	Scénario	2046–2065		2081–2100	
		moyenne	plage probable ^c	moyenne	plage probable ^d
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	moyenne	plage probable ^c	moyenne	plage probable ^d
Élévation du niveau moyen des mers (m) ^b	RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Le total pluviométrique annuel pourrait augmenter dans les hautes latitudes et l'océan Pacifique équatorial dans le cas du scénario RCP 8.5 (Figure 39). Dans les régions subtropicales arides, les précipitations diminueraient, tout comme aux latitudes moyennes, excepté dans les régions actuellement humides où elles pourraient augmenter. Aux latitudes moyennes et tropicales, les précipitations extrêmes pourraient davantage survenir. Dans les régions de moussons, ces dernières pourraient être plus intenses, plus longues et elles devraient arriver plus tard dans la saison.

Figure 39 : Evolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5)



Concernant la cryosphère à l'horizon 2100, la fonte de la banquise arctique en toute saison se matérialiserait tant par l'intermédiaire de son épaisseur que de son étendue. A la fin de l'été (septembre), sa diminution en surface serait respectivement de -43 et -94 % avec les RCP 2.6 et 8.5. La fonte serait moins sévère en hiver avec -8 et -34 %. Ces évolutions concernent également l'Antarctique, tant en volume qu'en surface. Dans le cas d'une poursuite de la tendance 1979-2012 qui correspondrait au scénario le plus pessimiste, il n'est pas exclu qu'une fin d'été puisse voir l'océan Arctique presque sans glace d'ici 2050. A la fin du siècle, les glaciers⁴⁵ pourraient diminuer de -15 à -55 % pour le scénario relatif à une réduction des émissions de GES et -35 à 85 % sans

⁴⁵ Les glaciers périphériques à l'Antarctique ne sont pas comptabilisés dans ce bilan.

politique climatique. La superficie du pergélisol des hautes latitudes de l'hémisphère nord pourrait diminuer de -37 à -81 %.

Le niveau des mers pourrait augmenter de 26 à 55 cm dans le cas du scénario RCP 2.6 et de 52 à 82 cm pour le scénario RCP 8.5. L'élévation de la température de l'océan est estimée à +0,6°C en surface et à +0,3°C en dessous de 1000 m de profondeur. L'océan Austral serait le plus impacté.

2.1.5. Quelles sont les conséquences attendues sur la culture du blé tendre dans le monde ?

Ces évolutions climatiques pour le futur dressent un constat alarmant pour la céréaliculture. D'autant plus que plusieurs études présentées dans le chapitre 1 exposent un ralentissement de la progression des rendements de blé tendre dans le monde avec une stagnation observée pour plusieurs grands pays producteurs, principalement en raison d'épisodes de sécheresses et de jours de chaleur plus nombreux.

Le développement des modèles climatiques et l'accessibilité aux données a favorisé l'émergence d'études d'impacts prospectives depuis une quinzaine d'années pour estimer les conséquences attendues sur la culture du blé tendre, dont nous proposons ici un état de l'art. L'absence de recherche en géographie sur cette thématique nous a conduit à réaliser un inventaire des travaux menés entre écophysologie et modélisation du climat.

Tout d'abord, le cinquième rapport du GIEC estime que les potentiels de rendements agricoles (toutes cultures) confondues) dans le monde pourraient baisser de -2 % par décennies d'ici la fin du siècle. Certaines projections donnent même une réduction pouvant aller jusqu'à -20 % pour les régions les plus défavorisées telles que le Sahel. Plus spécifiquement pour le blé tendre, les scénarios climatiques pourraient être bénéfiques dans certaines régions productrices alors que les rendements pourraient diminuer dans les zones où les températures optimales existent déjà (Ortiz et al., 2008). Mais en précisant l'état de l'art⁴⁶ on constate que les études sont parfois contradictoires.

2.1.5.1. Plusieurs études exposant une réduction des rendements

D'après Asseng et al (2015), mobilisant 30 modèles de cultures et 30 sites représentatifs de la céréaliculture mondiale, la production mondiale devrait chuter de 6 % pour chaque degré d'augmentation supplémentaire de la température moyenne, en raison d'une réduction de la période de croissance et du nombre de grains. Les sites du nord du Mexique, du Brésil, Soudan et de l'Inde seraient les plus touchés avec des chutes de productions pouvant aller jusqu'à -56 % pour une augmentation de +4 °C. C'est dans les plaines de Chine, d'Amérique du Nord et d'Iran que les baisses seraient les moins prononcées (-8 à -12 %). En Europe elles seraient de -12 à -20 %. D'après Zao et al (2017), l'augmentation de la température moyenne mondiale est également associée à une perte de rendement de -6 % pour chaque degré supplémentaire. Les résultats sont précisés pour les 5 plus grands producteurs de blé rassemblant plus de 50 % de la production mondiale. La

⁴⁶ Cet état de l'art est réalisé à partir des articles disponibles en Open Access ou accessibles à partir des « connexions institutions » auxquelles l'Université de Caen Normandie est abonnée. Cet état de l'art est incomplet puisque certaines publications ne sont pas disponibles gratuitement.

diminution de la productivité est plus importante en Inde et en Russie, avec respectivement -9 et -8 %, tandis qu'elle serait plus faible en Chine avec -2,6 %. La France et les Etats-Unis se situeraient quant à eux dans la moyenne mondiale.

D'autres études viennent préciser ce bilan dans plusieurs régions du globe. D'après Jul et *al* (2005) les rendements pour 10 sites représentatifs de la céréaliculture chinoise pourraient diminuer de -20 % d'ici 2070 (sans prise en compte de l'effet du CO₂ atmosphérique)⁴⁷. Liu et Tao (2012) modélisent une réduction des rendements, que ce soit en agriculture pluviale (-69 %) ou irriguée (-54 %) en considérant 5 scénarios climatiques⁴⁸. Lv et *al* (2013) constatent une avancée de la phénologie, avec une anticipation de la floraison et une réduction du remplissage, ce qui entraînerait une baisse des rendements de blé d'hiver chinois de -13 % à l'horizon 2070 pour les principales régions productrices. Mais dans le cas d'une irrigation complète, ces rendements pourraient augmenter de +26 %. En 2017, Yang et *al* retiennent 36 sites représentatifs de la céréaliculture chinoise et constatent que le rendement diminuerait en moyenne de 7 % d'ici 2100, et ce, malgré la fertilisation au CO₂ atmosphérique. Les rendements pourraient également diminuer en Inde de -50 % d'ici 2050 d'après Vashist et *al* (2013), tandis que Kumar et *al* (2014) estiment cette réduction à -15 et -25 % à l'horizon 2080. Pour Magrin et *al* (2009), les rendements de la Pampa d'Argentine seraient réduits de -7,5 % pour chaque degré d'augmentation de la température moyenne. Néanmoins, les pertes pourraient être compensées à condition d'avancer les dates de semis et dans le cas où la fertilisation CO₂ atteindrait 550 ppm (réchauffement à +2,5 °C), ce qui conduirait dans ce cas à un bilan inchangé. L'évolution des conditions climatiques pourrait également être défavorable aux plaines céréalières d'Australie. Luo et *al* (2005) simulent une baisse du rendement de -13,5 à -20 % pour 2080 sur 8 sites représentatifs de la céréaliculture Australienne. L'étude de Anwar et *al* (2007) confirme que les rendements pourraient diminuer de -29 % dans le sud-est de l'Australie à l'horizon 2070. Mais les auteurs rappellent que la fertilisation au CO₂ atmosphérique réduit la sévérité des températures de l'air plus chaudes et des précipitations plus faibles. Néanmoins, son effet est très faible puisque dans le cas d'un scénario à fortes émissions de GES, la réduction de la productivité est tout de même de -25 %. Ce bilan est confirmé par les recherches de Wang et *al* (2009) puisque le rendement serait réduit de -6 % à l'horizon 2070 dans le sud-est du pays. En Autriche, Thaler et *al* (2012) la réduction de la durée du cycle et la hausse du déficit hydrique engendreraient une baisse de rendement⁴⁹ dans le cas de pratiques inchangées (mais les rendements pourraient augmenter de +4 à +8 % en introduisant le sans-labour et la présence de haies).

⁴⁷ Les détails de cette étude ne sont pas disponibles car l'article n'est pas accessible.

⁴⁸ Les détails de cette étude ne sont pas disponibles car l'article n'est pas accessible.

⁴⁹ Les détails de cette étude ne sont pas disponibles car l'article n'est pas accessible. Le résumé de l'étude ne documente pas le chiffre associé à la réduction des rendements dans le cas des pratiques inchangées.

2.1.5.2. Plusieurs études présentant une augmentation des rendements

Zhang et Liu (2005) constatent qu'une augmentation des rendements pourrait être de +7 à +58 % dans le centre de la Chine. Les recherches de Guo et al (2010) exposent qu'une augmentation des rendements de près de 10 % d'ici 2100 pourrait concerner une autre zone productrice, la Plaine nord de Chine, et ce, sans irrigation et sans fertilisation au CO₂ atmosphérique. Mais dans le cas d'une concentration atmosphérique de 600 ppm, la productivité des plants de blé serait en hausse de 38 %. Tao et Zhang (2013) présentent également pour cette même région agricole, que le rendement serait plus important de +34 à +87 %, respectivement sans et avec prise en compte de l'effet valorisant du CO₂. Ils précisent également que la durée du cycle serait raccourcie, mais qu'il s'agirait de la période végétative, puisque les stades suivants arrivent plus tôt à une période plus fraîche. Par conséquent le temps de remplissage des grains ne serait pas réduit. En 2013, Sommer et al retiennent 18 sites situés en Asie centrale (Kazakhstan, Kirghizistan, Ouzbékistan et Tadjikistan), et montrent que pour 14 d'entre eux, la productivité serait plus importante de +12 % grâce à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Néanmoins, les fortes températures lors de la floraison pourraient affecter la stérilité du blé. Les rendements pourraient également augmenter en Amérique du nord. Tubiello et al (2002) ont recours à deux modélisations. L'une simule une légère hausse des rendements, tandis que pour l'autre ils diminueraient de 30 à 40 %, exceptés dans le cas de semis précoces. L'année suivante (2003), Izaurralde et al modélisent une hausse de la productivité de 36 % pour la fin du siècle en retenant la situation de 204 fermes représentatives de la céréaliculture des Etats-Unis. Les rendements pourraient légèrement augmenter dans les Prairies canadiennes (majoritairement du blé de printemps) grâce à la fertilisation au CO₂. Pour l'Europe, Harrison et Butterfield (1996) estiment que les rendements pourraient augmenter de 0,2 t/ha à l'horizon 2020 et de 0,36 t/ha pour les décennies suivantes (horizon 2064). La hausse de la productivité serait plus importante en Europe centrale qu'occidentale. Webber et al (2018) simulent une augmentation des rendements de +4 % sur l'ensemble de l'Europe à l'horizon 2069. Le blé répondrait aux sécheresses à l'exception de la Roumanie et de l'Espagne. Toutefois ce bilan n'empêcherait pas l'occurrence d'années défavorables, causées par des sécheresses trop intenses pour que la fertilisation au CO₂ puisse compenser. D'ailleurs sans prise en compte de ce facteur, les rendements diminueraient de -9 %. En France, le projet CLIMATOR (Brisson et Levrault., 2010) s'intéresse à 13 sites métropolitains. Les résultats sur le blé tendre sont présentés par Bancal et Gate (2010). Les rendements devraient augmenter de 9 à 24 q/ha sur la moitié des sites en futur proche à l'exception d'Avignon, Bordeaux, Dijon Clermont, Lusignan et Rennes où aucun changement significatif n'est constaté. En futur lointain le rendement est en hausse de 8 à 26 q/ha sauf à Lusignan, Clermont, Rennes et Avignon. Les stress préfloraisons n'augmentent pas grâce à l'avancement de la phénologie dans le calendrier en raison de l'élévation de la température. Le remplissage des grains devrait être davantage exposé aux jours de chaleur et aux sécheresses mais l'augmentation du CO₂ atmosphérique compense. La durée du cycle pourrait être raccourcie en moyenne de 10 à 20 jours et serait plus prononcée dans la partie nord. Par ailleurs les maladies (septoriose et rouille brune) diminueraient de 15 à 20 %.

Afin d'envisager l'adaptation et pour aiguiller la recherche variétale, certaines recherches simulent les rendements dans l'hypothèse d'un recours à des variétés tolérantes aux stress climatiques identifiés. En 2014, Semenov et al simulent une augmentation moyenne des rendements de +78 % à l'horizon 2050 en retenant 10 sites céréaliers d'Europe en recourant à des variétés au cycle plus long (pour contrer la réduction de la durée du remplissage des grains) et tolérantes au déficit

hydrique. Mais les auteurs précisent que la méiose et la floraison pourraient être exposées à des excès thermiques. L'année suivante, une étude (Stratonovitch et Semenov, 2015) présente toutefois pour 6 sites européens, que les potentiels de rendements pourraient augmenter en recourant à des cultivars thermotolérants avec une durée de remplissage allongée, contrairement aux variétés actuelles thermosensibles pour lesquelles les rendements seraient réduits. En 2019, Senapati et al (2019) retiennent 13 sites européens et montrent que le rendement, toujours pour l'horizon 2050, augmenterait de 13 % dans le cas de variétés tolérantes au manque d'eau. Le constat est d'ailleurs plus marqué au sud de l'Europe (+28 à +37 %) et en Europe centrale (+10 à +28 %) où les déficits hydriques sont plus intenses.

Au final, l'état de l'art montre que les rendements pourraient diminuer dans certaines régions du globe, comme l'Australie ou l'Inde. Pour les autres régions du globe, les résultats sont contradictoires, notamment en Europe et en Chine. Ce constat peut s'expliquer par le recours à des modèles de culture, des cultivars, des projections climatiques et des sites géographiques différents entre ces études. Des recherches exposent une réduction des rendements, alors que d'autres démontrent qu'ils pourraient augmenter. On constate également que la prise en compte de la fertilisation au CO₂ atmosphérique, en hausse, pourrait compenser les effets délétères du changement climatique sur le blé tendre, en améliorant le taux de photosynthèse et l'accumulation de la biomasse.

Toutefois, Kristensen et al (2001) rappellent que les températures élevées engendrent une réduction de la durée de croissance, soit une diminution du temps de fixation du carbone et donc une baisse de l'accumulation de biomasse. Dans ce cas l'augmentation du CO₂ atmosphérique ne s'associe pas systématiquement à une hausse des rendements. Ces effets opposés entre température et concentration en CO₂ atmosphérique sont également mis en avant par Wilcox et Mkowski (2014).

2.1.5.3. Evolution des conditions climatiques vécues par la plante

En complément des études menées avec les modèles de cultures pour lesquels des incertitudes existent et seraient supérieures à celles des modèles climatiques (Asseng et al., 2013), plusieurs chercheurs expriment la nécessité de développer, en parallèle, des méthodes alternatives basées sur l'évolutions des conditions climatiques pour la plante (plus de précisions sont disponibles dans le chapitre 3). En exposant les aléas auxquels la plante pourrait être confrontée à l'avenir, la filière dispose alors d'informations essentielles pour déterminer des mesures d'adaptation (sélection ou recherche de variétés répondant ou évitant les stress identifiés, pratiques agricoles, gestion du système agricole, etc.). Les données climatiques sont celles extraites des modèles numériques prédictifs dans le cadre de recherches prospectives. Les dates d'apparition des stades phénologiques peuvent être déterminées à l'aide d'un modèle de culture ou calculées indépendamment. Cette **approche appelée phénoclimatique ou écoclimatique**, a été développée dans plusieurs études, qui ne sont pas nécessairement centrées sur le blé tendre ou sur la période future, dont les références sont présentées dans le chapitre 3. Elle est mobilisée dans le cadre de la présente thèse. C'est pourquoi les résultats des recherches prospectives portant sur le blé tendre, présentées ci-dessous, sont détaillés.

Cette approche a été développée pour le blé par Trnka et al (2014) à l'échelle européenne. Ils étudient la réponse des systèmes de culture à l'apparition d'événements météorologiques indésirables pour 14 sites européens situés dans des paysages de plaines dans lesquelles le blé est cultivé ou pourrait être cultivé à l'avenir : Jyväskylä (Finlande), Uppsala (Suède), Tylstrup (Danemark), Warsaw (Pologne), Wageningen (Pays-Bas), Rothamsted (Royaume-Unis), Mannheim (Allemagne), Vienna (Autriche), Debrecen (Hongrie), Clermont-Ferrand (France), Montagnano (Italie), Madrid (Espagne), Athènes (Grèce), Seville (Espagne). Les données climatiques sont celles de 16 modèles globaux de l'ensemble CMIP5 (Taylor et al., 2012) pour le scénario RCP 8.5. Trois cultivars sont mobilisés avec deux niveaux de sensibilité à la photopériode en retenant des semis d'automne générés automatiquement dès lors que la température de l'air et que les capacités en eau du sol sont supérieures au tiers du réservoir maximum pendant au moins 5 jours. La simulation de la phénologie est calée sur trois moments clés du site (le semis, l'anthèse et la maturité) dont les dates sont estimées avec le logiciel Agriclim software (Trnka et al., 2011). Il s'agit du blé tendre d'hiver pour l'ensemble des sites, à l'exception et d'Athènes et de Séville, où le climat ne permet pas une vernalisation suffisante et nécessite le recours à du blé de printemps. La phénologie est calculée à l'aide des degrés jours issus des résultats d'Olesen et al (2011). Les sols sont considérés comme homogènes (un profil de sol unique) avec une capacité en eau de 270 mm pour ne comparer entre les sites que le signal climatique. D'ici 2060 les stades phénologiques de l'anthèse et de la maturité seraient avancés d'environ deux semaines par rapport à la période de référence 1981-2010 compte-tenu de l'augmentation de la température. Le rayonnement cumulé entre le semis et l'anthèse devrait légèrement augmenter pour les sites du nord et diminuer pour ceux les plus au sud à cause d'une réduction différente de la durée des périodes phénologiques et de leur avancement en hiver où les jours sont courts. La fin du cycle serait marquée pour l'ensemble des secteurs d'étude par une réduction du rayonnement en raison des mêmes causes, engendrant une baisse de l'accumulation de biomasse et donc des rendements. Le risque de gel au printemps pourrait être plus important (à l'exception d'un site en Italie) à cause de l'anticipation des stades. Dans le nord-ouest de l'Europe, l'engorgement des sols entre le semis et l'anthèse deviendrait plus récurrent. En Europe centrale et du sud les fortes pluies pourraient engendrer la verse du blé. Seulement moins d'un tiers des sites seraient concernés par des conditions exceptionnellement sèches, les fortes sécheresses concerneraient surtout les sites méditerranéens. Les fortes chaleurs survenant au cours de l'anthèse et du remplissage des grains augmenteraient. Le nord serait moins touché. Dans l'ensemble les événements indésirables seraient en hausse, même si leur occurrence dépend beaucoup de la date d'apparition de l'anthèse et de la maturité. En levant le critère de photopériode une partie de ces aléas pourrait être évitée. L'adaptation doit donc tenir compte de l'utilisation de variétés précoces évitant les stress de fin de cycle et de variétés à la durée de développement plus longue pour garantir assez de rayonnement (deux critères opposés). Ces résultats sont ensuite complétés par une seconde publication (Trnka et al., 2015) basée sur les scénarios RCP 4.5 et 8.5 selon les modèles globaux du projet CMIP5 ISS-E2-R-CC et HadGEM2-ES pour 376 sites européens confirmant les résultats. Les événements indésirables dans les principales régions productrices de blé doubleraient d'ici 2090. Par ailleurs, plusieurs études exposent la possibilité de nouvelles zones de productions du blé, comme par exemple au nord de l'Europe où le réchauffement permettra d'allonger la saison de croissance thermique (Olesen et Bindi 2002 ; Olesen et al., 2007 ; Peltonen-Sainio et al., 2009 ; Bindi et Olesen 2010 ; Moriondo et al., 2010). Cependant cette recherche expose que le déplacement des cultures de blé dans de nouvelles régions n'apparaît pas être une source d'adaptation viable car le risque de ces événements météorologiques indésirables pourrait y être

plus important. Les jours de fortes chaleurs et de sécheresses seraient trop nombreux et auraient des conséquences néfastes sur la céréale.

En 2015, Wang et *al* mobilisent ce type d'approche pour estimer l'évolution des conditions climatiques lors de la floraison du blé à l'est de l'Australie. 19 modèles climatiques globaux sont retenus avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 jusqu'à 2100, comparé à 1961-2000. La simulation de la phénologie de la plante tient compte des besoins en vernalisation et photopériode de la plante. D'ici la fin du siècle, la floraison du blé de printemps aurait lieu 2 et 18 jours plus tôt avec respectivement les RCP 4.5 et 8.5. Pour le blé d'hiver, elle serait retardée de 2 et 14 jours dans les régions chaudes du nord-ouest en raison d'une diminution des jours disponibles pour la vernalisation. Dans les zones plus fraîches, à l'est, elle apparaîtrait 6 et 7 jours plus vite puisque la plante peut satisfaire ses besoins en froid. Si la vulnérabilité au gel diminuait, la floraison serait davantage confrontée aux températures supérieures à 30°C et impactant la fertilité du blé. Aussi, face à la réduction de la durée du cycle, les auteurs soulignent l'intérêt de recourir à des cultivars tardifs de façon à ce que la plante puisse valoriser les ressources telles que le rayonnement, le CO₂ atmosphérique ou encore l'eau et les nutriments.

Ces approches prospectives sur le blé tendre ont également été développées en France. En 2008, Gate et *al* mobilisent les données du modèle climatique de Météo-France et du Cerfacs. Les principaux stades phénologiques sont simulés à l'aide d'une somme vernalophothermique. Les auteurs calculent l'occurrence des phénomènes météorologiques extrêmes durant les stades sensibles. Entre 2070 et 2100, le stade épi 1 cm serait avancé de 25 à 30 jours en année médiane avec le scénario A2. Il apparaîtrait vers le 10 février à l'ouest de l'hexagone, le 15 février en Ile-de-France et vers le 22 février dans l'est. Le même constat est effectué pour l'épiaison (-20 jours) qui serait constatée dès le 10 avril pour les régions du sud-est et fin avril/début mai dans le nord-ouest. Le risque d'échaudage thermique devrait se renforcer tout comme les sécheresses selon le scénario A2 pendant le remplissage des grains dès 2050. Cependant ces évolutions resteraient faibles le long de la bordure maritime du nord-ouest et seraient en revanche beaucoup plus prononcées dans le centre et le sud du pays. Toutefois, les variétés précoces pourraient éviter en partie ces aléas après 2070 grâce à un décalage des derniers stades (avancée de la phénologie). En 2012, Gouache et *al* se concentrent sur la simulation du nombre de jours d'échaudage thermique à partir du modèle de culture ARCWHEAT tenant compte d'une somme vernalophothermique⁵⁰ (Weir et al., 1984), et du modèle climatique régionale ARPEGE pour les scénarios A1B et A2. La période passée 1970-1999 est comparée au futur proche (2020-2049) et lointain (2070-2099) pour 10 sites : Dijon, Toulouse, Bordeaux, Rennes, Saint-Etienne, Versailles, Mons, Avignon, Lusignan et Mirecourt. La date de semis retenue est le 20 octobre. La phénologie pourrait s'avancer de 13 jours avec le premier scénario et de 19 jours avec le second. Cette anticipation des stades ne permettrait pas de contrer l'augmentation des jours échaudants d'ici la fin du siècle qui serait en moyenne de 5,6 jours.

Dans l'ensemble, l'élévation de la température entraîne une avancée de la phénologie. Cette anticipation des stades n'est pas assez importante pour éviter les fortes chaleurs pendant la floraison et le remplissage des grains. L'étude de Trnka et *al* (2014) précise que les conditions

⁵⁰ Le blé a besoin de cumuler un certain nombre de jours de vernalisation (comprenant une température moyenne entre 3 et 10 °C), d'une durée du jour suffisante et d'une certaine somme de température depuis le semis pour passer de l'état végétatif à reproducteur. Ces besoins sont propres à chaque variété.

exceptionnellement sèches concerneraient les sites méditerranéens, cependant Gate (2008) expose que le déficit hydrique pourrait augmenter dans les plaines françaises. Ces aléas intervenant à la fin du cycle peuvent être évités dans le cas de variétés précoces ou insensibles à la photopériode.

Finalement, cet état de l'art montre que des résultats de recherches permettent d'appréhender les conséquences possibles du changement climatique sur la culture du blé tendre pour les prochaines décennies. L'essentiel de ces travaux font appel à des simulations climatiques, couplées avec des modèles de cultures. Le champ de recherche est principalement investi par des modélisateurs, mêlant mathématiques et informatiques pour simuler les systèmes agricoles, et les écophysiolgistes. Cependant, ces approches ont des limites, en raison d'incertitudes associées aux modèles de cultures (structures et paramètres), plus importantes que pour les modèles climatiques (Asseng et al., 2013). Sans remettre en cause le recours à ces modèles de culture, des études complémentaires, davantage centrées autour de la modélisation des conditions climatiques vécues par la plante sont alors nécessaires, en complément, mais également pour mieux identifier les aléas. Ces éléments sont développés dans le chapitre 3. On ajoute également que plusieurs de ces recherches reposent sur les anciens scénarios SRES, souvent à partir de modèles globaux. Une mise à jour avec les nouveaux scénarios RCP à l'aide de données régionalisées apparaît pertinente.

Le changement climatique planétaire constitue une réalité. Il devrait se poursuivre dans les prochaines décennies. Dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) le réchauffement pourrait dépasser le seuil de +4°C. Ce constat est alarmant puisque d'après le GIEC, le dépassement du seuil de +2°C pourrait avoir des conséquences irréversibles. Actuellement, la poursuite des émissions de GES laisse supposer que l'humanité se trouve sur la trajectoire du scénario RCP 8.5. Des conséquences sont attendues sur : les rendements agricoles et la sécurité alimentaire, la volatilité des prix des productions agricoles, l'accès à l'eau, l'accroissement des inégalités, la santé, la biodiversité (effondrement), les migrations (réfugiés climatiques) et plus largement sur l'économie et la géopolitique mondiale en raison de l'augmentation des événements climatiques extrêmes (canicules, sécheresses, précipitations extrêmes, hausse du niveau des mers, incendies, tempêtes, maladies infectieuses liées à la libération de virus lors de la fonte du permafrost, ...). A ce titre, le changement climatique est considéré comme la plus grande menace pour la santé publique au XXI^e siècle (Costello et al., 2009). Certaines études appliquées au blé tendre exposent une possible réduction des rendements du blé tendre à l'échelle mondiale. Néanmoins, les résultats sont parfois contradictoires pour certaines régions du globe puisque des recherches montrent que les rendements pourraient augmenter, notamment en raison de la fertilisation au CO₂ atmosphérique qui compenserait la réduction de la durée du cycle, les jours de chaleur et le déficit hydrique de plante. Mais cet effet valorisant pourrait être limité par ces aléas. Compte-tenu des incertitudes inhérentes aux modèles de cultures, et plus importantes que pour les modèles climatiques, certains chercheurs conseillent de compléter ces études en mobilisant des approches fondées sur des indicateurs climatiques. Elles exposent que le changement climatique pourrait modifier la phénologie de la plante et l'exposition aux aléas.

2.2. Le changement climatique en Normandie

La Normandie fait partie de l'ensemble océanique du nord-ouest de la France. Le climat est tempéré, les jours de gel sont faibles comparativement à ce que l'on peut rencontrer à l'est de l'hexagone. Il en va de même pour les jours de chaleur. Pour mieux cerner la position de la Normandie dans les climats de France et pour connaître leurs évolutions, il est possible de se référer à l'annexe 3. Cette sous-partie propose de passer directement à la présentation du climat et du changement climatique en Normandie. Une présentation à l'échelle régionale est nécessaire pour expliciter les disparités régionales, et exposer dans le même temps la particularité de la Plaine de Caen. Cette sous-partie s'appuie sur plusieurs travaux portant sur le climat normand (Trzpit, 1970 dans le cadre de *l'Atlas de Normandie* ; thèse d'Escourrou, 1978 ; Cantat et *al.*, 2015 pour le *Profil environnemental de Basse-Normandie* de la DREAL ; Cantat et Beauvais, 2020 dans le cadre du *Profil environnemental de Normandie* de la DREAL⁵¹ ; Cantat et *al.*, 2021 dans le cadre du GIEC normand).

2.2.1. Le climat de Normandie

La Normandie, située au nord-ouest de la France, bénéficie d'un climat tempéré océanique, conséquence d'une position latitudinale entre les basses pressions subpolaires et les hautes pressions subtropicales. Elles induisent majoritairement des masses d'air en provenance de l'Atlantique. L'hiver, le décalage vers le sud de la dépression d'Islande et son creusement, engendrent souvent des types de temps humides, frais et venteux. Les étés sont généralement doux et moins perturbés grâce à la remontée vers le nord de l'anticyclone des Açores. L'océanité apportée par les flux d'ouest entraîne de faibles amplitudes thermiques d'une saison à l'autre, toutefois plus prononcées lorsque l'on entre dans les terres, ainsi que des précipitations régulières toute l'année (Cantat, 2015 ; Cantat et Beauvais, 2020, Cantat et *al.*, 2021). Ce climat tempéré n'est toutefois pas sans excès. Les extrêmes du climat peuvent être observés en Normandie : vagues de chaleur (1959, 1976, 1989, 2003, 2019, ...) et de froid (1956, 1979, 1985, 2012), tempêtes (1987 et 1999), sécheresses (1976, 1990, 2011) et les inondations par débordement de cours d'eau (1995) ou de remontée de nappe (2001). Le temps qu'il fait est souvent changeant et ce, même au pas de temps quotidien (Frémont, 2015). Cette variabilité s'observe également à l'échelle interannuelle, notamment pour les précipitations dont les cumuls peuvent varier du simple au double d'une année à l'autre (Cantat, 2015).

A l'échelle régionale, le climat n'est pas homogène et des disparités sont perceptibles (Trzpit, 1970 ; Cantat, 2015 ; Cantat et Beauvais, 2020). On distingue trois grands types de climats (**Figure 40**) : maritime, contrasté des collines et d'abri des plateaux. Ils sont fonction des facteurs géographiques locaux : exposition aux flux d'ouest humides, distance à la mer et topographie.

Le Cotentin et le sud-ouest du département de la Manche forment l'ensemble le plus océanique, du fait de l'exposition aux vents majoritairement de sud-ouest et de sa position géographique ouverte sur la mer de la Manche. Les cumuls pluviométriques sont importants (800 à plus de 1000 mm/an). Les températures sont fraîches l'hiver et douces l'été. A l'année, cette péninsule offre

⁵¹ Les cartographies prospectives présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans ce *Profil Environnemental de Normandie* de la DREAL en 2020.

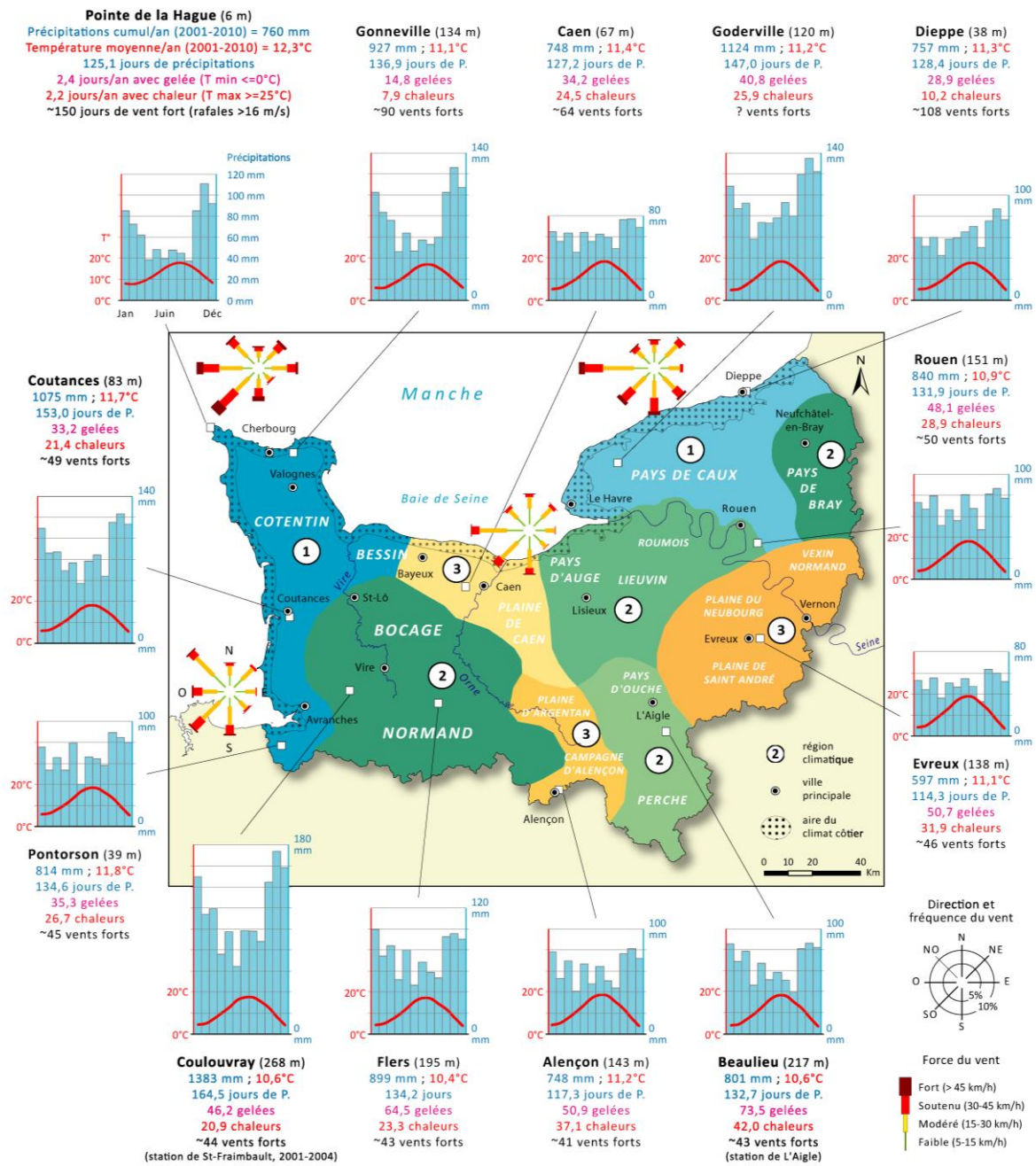
les températures les plus douces ($\approx 12\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les gelées ($T_{\text{mini}} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) et les jours de chaleur sont rares (≈ 2 jours à la Hague) en raison de l'inertie thermique de l'océan qui met plus de temps que le continent à se refroidir ou se réchauffer. Les conditions restent toutefois assez contrastées en quelques kilomètres, entre la frange littorale (très rares gelées et jours de chaleur) et les premiers reliefs du centre du département (30 gelées et 20 jours d'été). Ce climat maritime s'observe également au nord-est de la région, sur les plateaux du Pays de Caux dont la pointe s'avance vers l'ouest, en direction de la Baie de Seine.

Le Bocage Normand est très arrosé avec des cumuls pluviométriques supérieurs à 1100 mm (et localement 1400 mm à Coulouvray) en raison des reliefs qui favorisent l'ascendance orographique des masses d'air sur ces espaces exposés aux flux d'ouest. Les températures sont fraîches en raison de l'altitude ($T_m \approx 10^{\circ}\text{C}$) et les gelées en hiver ne sont pas rares (jusqu'à 65 jours). Toutefois, ces caractéristiques ne sont pas uniformes sur l'ensemble de cette zone, avec des différences entre les fonds de vallées et les hauteurs. On retrouve également ces traits de caractères sur les reliefs allant du Pays d'Auge jusqu'au Perche mais elles y sont moins prononcées en raison de l'éloignement à la mer. D'ailleurs, le Pays d'Ouche et le Perche, en position plus continentale, sont marqués par des précipitations un peu plus faibles (≈ 800 mm) et des amplitudes thermiques plus prononcées. Il en va de même pour le Pays de Bray à l'est de la Seine Maritime.

Sous le vent des collines normandes, la plaine agricole s'étendant de Caen à Alençon connaît une pluviométrie beaucoup plus faible, autour de 700 mm/an. Les contrastes thermiques restent modérés au nord de cet ensemble, tandis que l'éloignement à la mer les renforce dans l'Orne. Ainsi on observe une trentaine de jours de gelées à Caen tandis qu'Alençon en dénombre une cinquantaine. Il en va de même pour les jours de chaleur ($T_{\text{maxi}} \geq 25^{\circ}\text{C}$), d'une vingtaine à une trentaine. Ce constat s'effectue également pour les plaines de l'Eure (d'Evreux et du Vexin), encore moins arrosées (localement seulement 600 mm/an), compte tenu de leur position d'abri derrière les collines du Pays d'Auge et d'Ouche et moins éventé grâce à leurs forêts auxquelles s'ajoutent celles du Lieuvin. Les jours de gel (≈ 50 jours) et de chaleur (≈ 30 jours) y sont plus nombreux qu'à Caen en raison de la dégradation du climat océanique à mesure que l'on se dirige vers l'est de la région.

Dans l'ensemble, le nord-ouest de la région connaît des hivers doux et des étés frais. A l'est les gelées et les jours de chaleur ne sont pas rares puisqu'ils peuvent être respectivement supérieurs à 70 et 40 jours. Les précipitations sont plus importantes sur le Cotentin et les reliefs tandis que les zones abritées connaissent des conditions beaucoup plus sèches.

Figure 40 : Les principaux ensembles climatiques de Normandie (Cantat *in* DREAL, 2020)



Les principaux ensembles climatiques normands

Familles de climats : (1) maritime ; (2) contrasté des collines ; (3) d'abri des plateaux ; côtier (variante plus éventée et moins arrosée).

Document de synthèse conçu à partir de cartes de températures et de précipitations réalisées d'après les données Drias en points de grille CNRM Météo-France (maille de 8 km) et inspiré des cartes de Trzpit de l'Atlas de Normandie (1965) et de la thèse d'Escourrou (1978).

Les 13 diagrammes ombrothermiques sont dessinés à partir de données Météo-France sur la période 2001-2010.

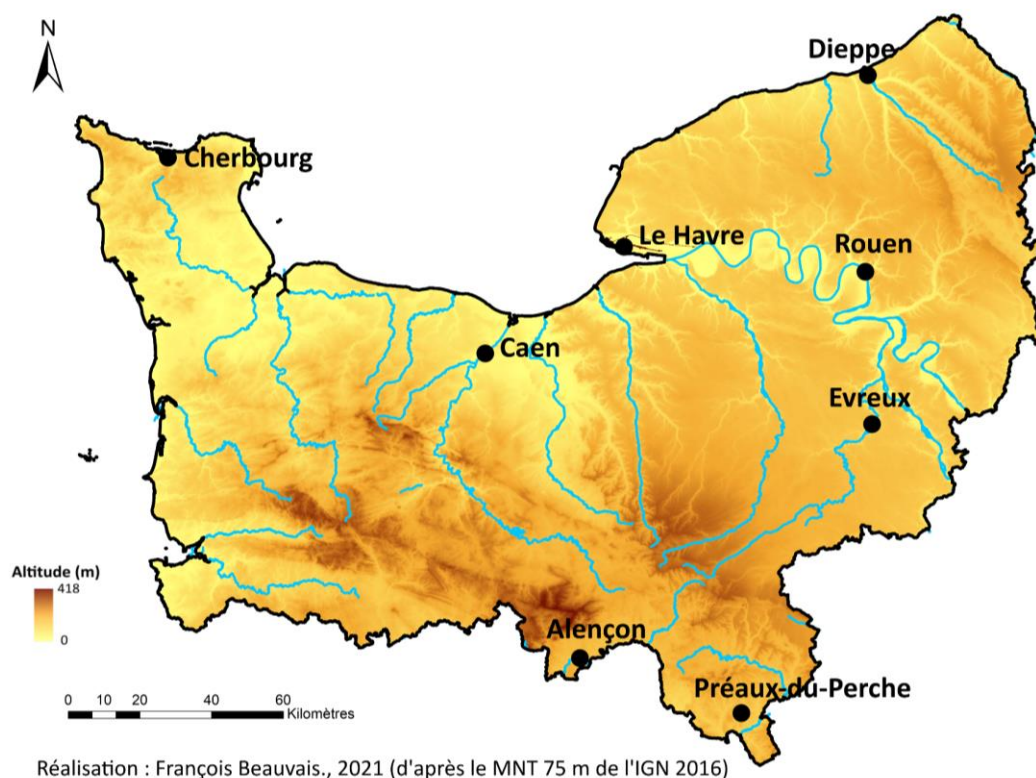
Les 4 roses des vents littorales sont dessinées à partir des données du modèle Aladin de Météo-France sur la période 1999-2009.

Réalisation : Olivier Cantat, GEOPHEN, LETG Caen, UMR 6554 CNRS, Université de Caen Normandie, 2018.

2.2.2. Le changement climatique observé en Normandie

Le réchauffement est constaté sur l'ensemble du territoire normand. En témoigne l'évolution de la température de l'air pour 8 stations (**Figure 41**) ayant comme période commune 1970-2020 (Cantat, 2021).

Figure 41 : Localisation des 8 stations normandes ayant pour période commune 1970-2020



L'augmentation de la température moyenne est comprise entre $+1,3^{\circ}\text{C}$ et $+2,2^{\circ}\text{C}$ (**Tableau 12 ; Figure 42 ; Figure 43**). En considérant l'écart inter décennal des stations, le réchauffement est plus prononcé pour les températures maximales ($+1,7^{\circ}\text{C}$) que sur les minimales ($+1,4^{\circ}\text{C}$). C'est à partir de la fin des années 1980 et du début des années 1990 que l'élévation des températures se renforce avec un écart à la moyenne (1970-2020) presque constamment positif. D'ailleurs, une rupture (test de Pettit au seuil $\alpha = 0,05$) est constatée dans les séries temporelles de ces stations : en 1987 pour Caen, Evreux, Préaux-du-Perche ; en 1988 pour La Hève⁵² ; en 1993 pour Rouen, Alençon, Cherbourg (Gonneville) et en 1996 pour Dieppe (**Figure 42**). Les années les plus chaudes se concentrent après 2010. En effet, sur les 10 années les plus chaudes, 7 sont comprises après cette date. Le record de la période est établi en 2020 avec $12,5^{\circ}\text{C}$ de moyenne sur les 8 postes, soit $+1,6^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne 1970-2020.

Sur les 8 stations, aucune tendance statistiquement significative (test de Mann-Kendal au seuil $\alpha = 0,05$) n'est constatée pour les précipitations totales annuelles. La variabilité interannuelle du cumul pluviométrique est importante mais semble se réduire depuis une quinzaine d'années. Elle passe ainsi d'une plage oscillante entre 500 et 1000 mm à 650-850 mm (**Figure 44**).

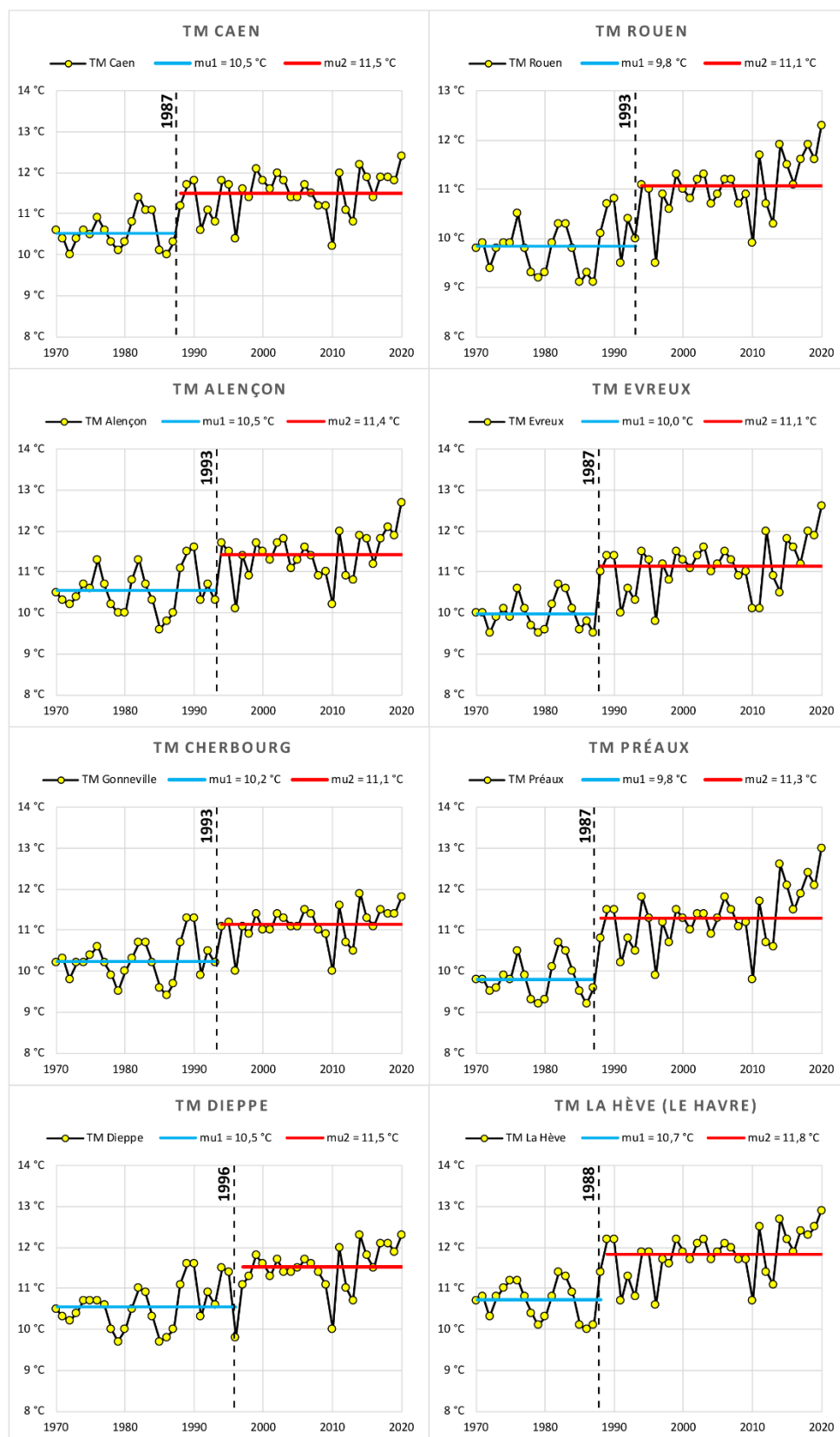
⁵² La station de La Hève est voisine de la ville du Havre.

Tableau 12 : Evolution de la température de l'air sur 50 ans (de 1970 à 2020), calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 8 stations météorologiques régionales

	Caen (67 m)	Rouen (151 m)	Alençon (143 m)	Evreux (138 m)	Cherbourg (134 m)	Préaux (133 m)	Dieppe (38 m)	La Hève (100 m)	Région
moyenne 1970-2020	11,2°C	10,5°C	11,0°C	10,7°C	10,7°C	10,8°C	11,0°C	11,4°C	10,9°C
tendance linéaire	+1,2°C	+2,2°C	+1,5°C	+1,9°C	+1,5°C	+2,1°C	+1,7°C	+1,9°C	+1,8°C
écart interdécennal	+1,3°C	+1,8°C	+1,3°C	+1,6°C	+1,2°C	+2,2°C	+1,5°C	+1,5°C	+1,6°C
valeur décennale									
décennie 1 : 1971-1980	10,4°C	9,7°C	10,4°C	9,9°C	10,1°C	9,7°C	10,3°C	10,7°C	10,2°C
décennie 2 : 1981-1990	11,0°C	10,0°C	10,7°C	10,4°C	10,4°C	10,3°C	10,7°C	11,0°C	10,6°C
décennie 3 : 1991-2000	11,3°C	10,6°C	11,0°C	10,8°C	10,7°C	10,9°C	11,0°C	11,5°C	11,0°C
décennie 4 : 2001-2010	11,4°C	10,9°C	11,2°C	11,1°C	11,1°C	11,1°C	11,3°C	11,8°C	11,2°C
décennie 5 : 2011-2020	11,7°C	11,5°C	11,7°C	11,5°C	11,3°C	11,9°C	11,8°C	12,2°C	11,7°C

O.Cantat, 2021

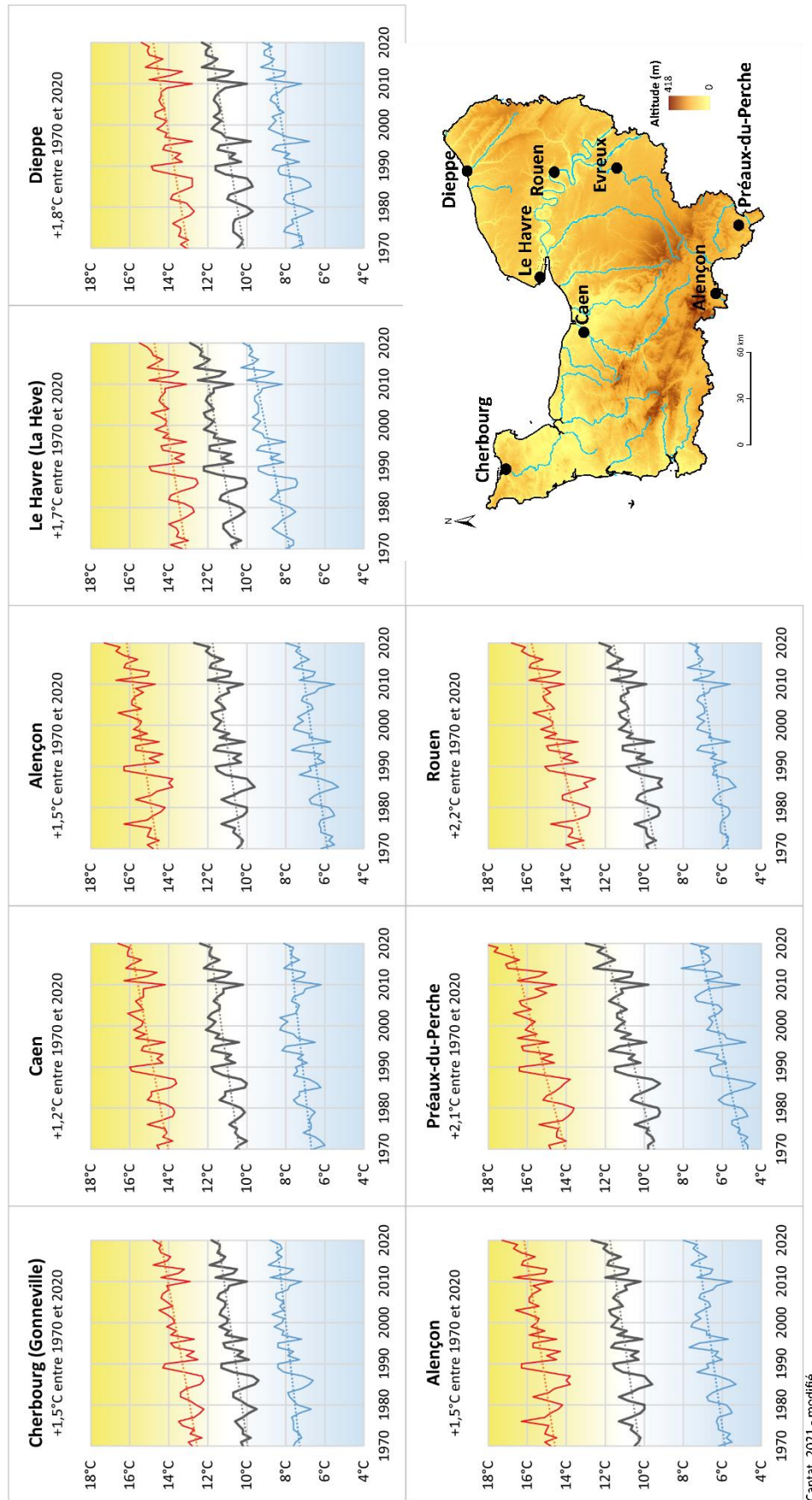
Figure 42 : Détermination des dates de rupture pour les 8 stations normandes à partir du test de Pettitt sur la période 1970-2020



Réalisation : François Beauvais., 2021.

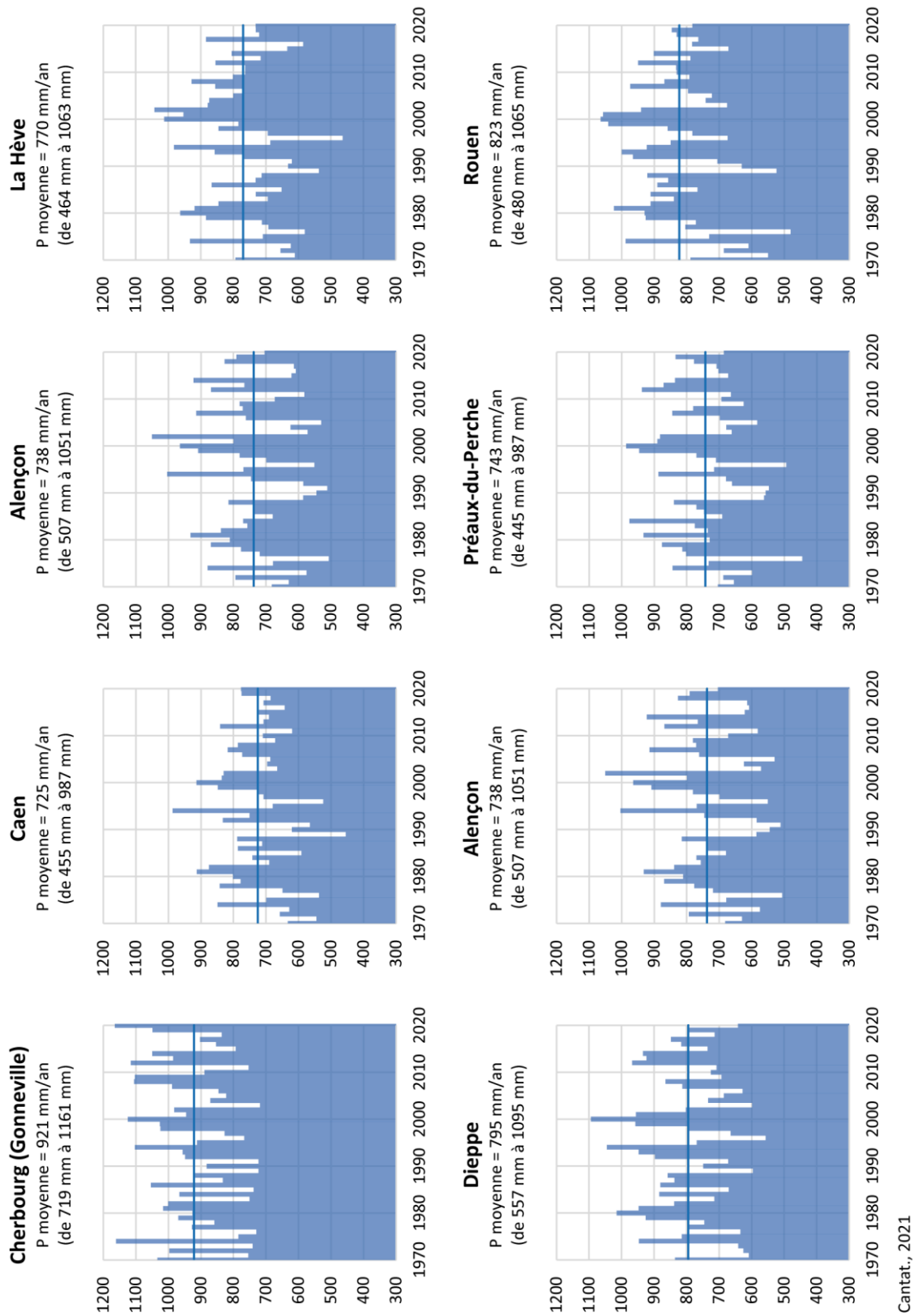
Avec : TM = température moyenne ; mu1 = température moyenne de la période pré-rupture ; mu2 = température moyenne de la période post-rupture.

Figure 43 : Evolution des températures minimales, maximales et moyennes pour 8 stations normandes sur la période 2070-2020



Cantat, 2021 - modifié

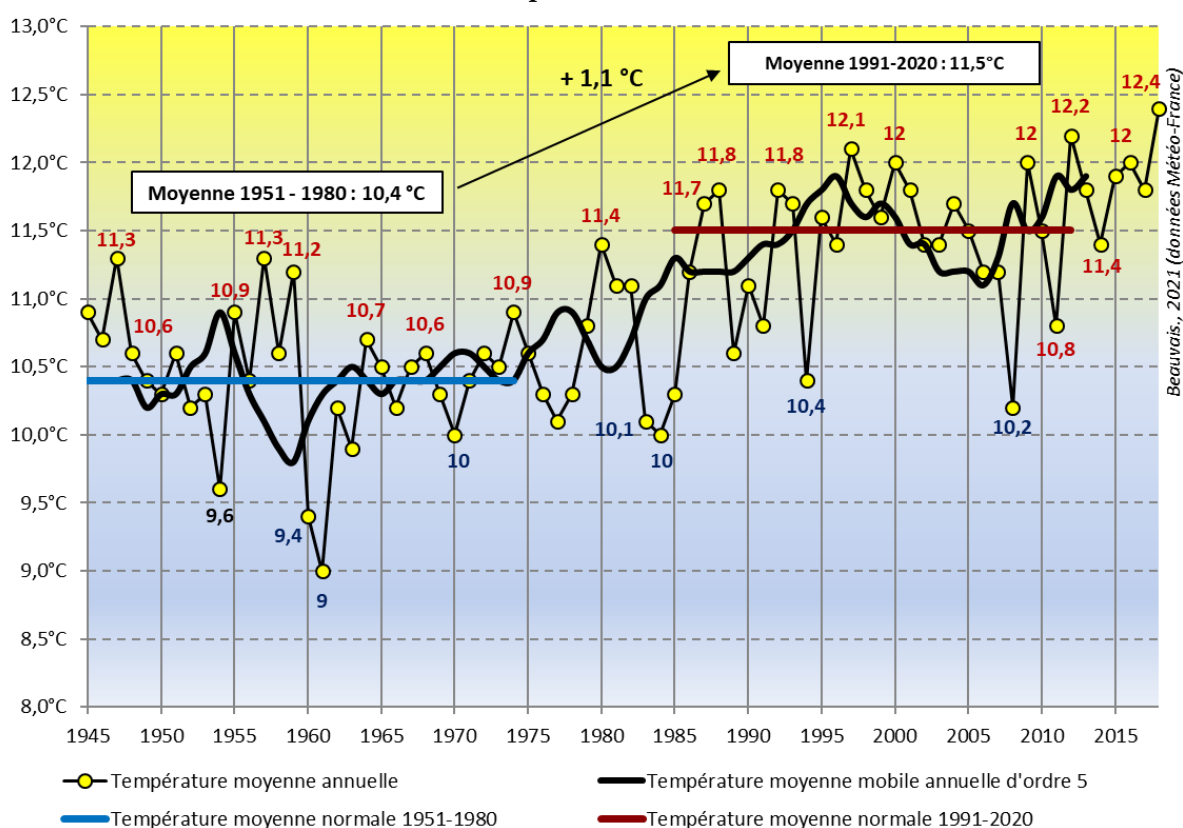
Figure 44 : Evolution du cumul pluviométrique pour 8 stations normandes sur la période 2070-2020 (le trait central correspond à la moyenne de la période)



Pour préciser les évolutions climatiques, prenons la station Météo-France de Caen-Carpiquet. Elle dispose d'une ancienneté suffisante pour comparer les paramètres climatiques entre les Normales climatiques 1951-1980 et 1991-2020. Sa position géographique est intéressante puisque située entre les espaces océaniques de l'ouest et "continentalisés" du sud-est, mais également parce qu'il s'agit de la station de référence pour la Plaine de Caen, espace d'étude choisie pour cette thèse.

La température a augmenté de +1,1°C entre les deux Normales climatiques 1951-1980 et 1991-2020, passant ainsi de 10,4 à 11,5°C. (Figure 45) L'élévation de la température est telle, que la moyenne de la seconde Normale est supérieure à l'année la plus chaude de la première (11,3°C). Des années froides comme celles de 1956, 1962 et 1963 (entre 9 et 9,6°C) ne sont plus observées, le minimum de la période 1991-2020 étant de 10,2°C. Depuis les années 1990, la température moyenne annuelle a dépassé à 6 reprises le seuil de 12°C. Si le réchauffement a légèrement fléchi à la fin des années 2000, la température ré-augmente dans la décennie suivante et se clôture par une année record en 2020 (12,4°C). Précisons ici que le réchauffement de la minimale et de la maximale est équivalent à celui de la température moyenne (+1,1°C).

Figure 45 : Evolution de la température moyenne annuelle à Caen-Carpiquet sur la période 1950-2020

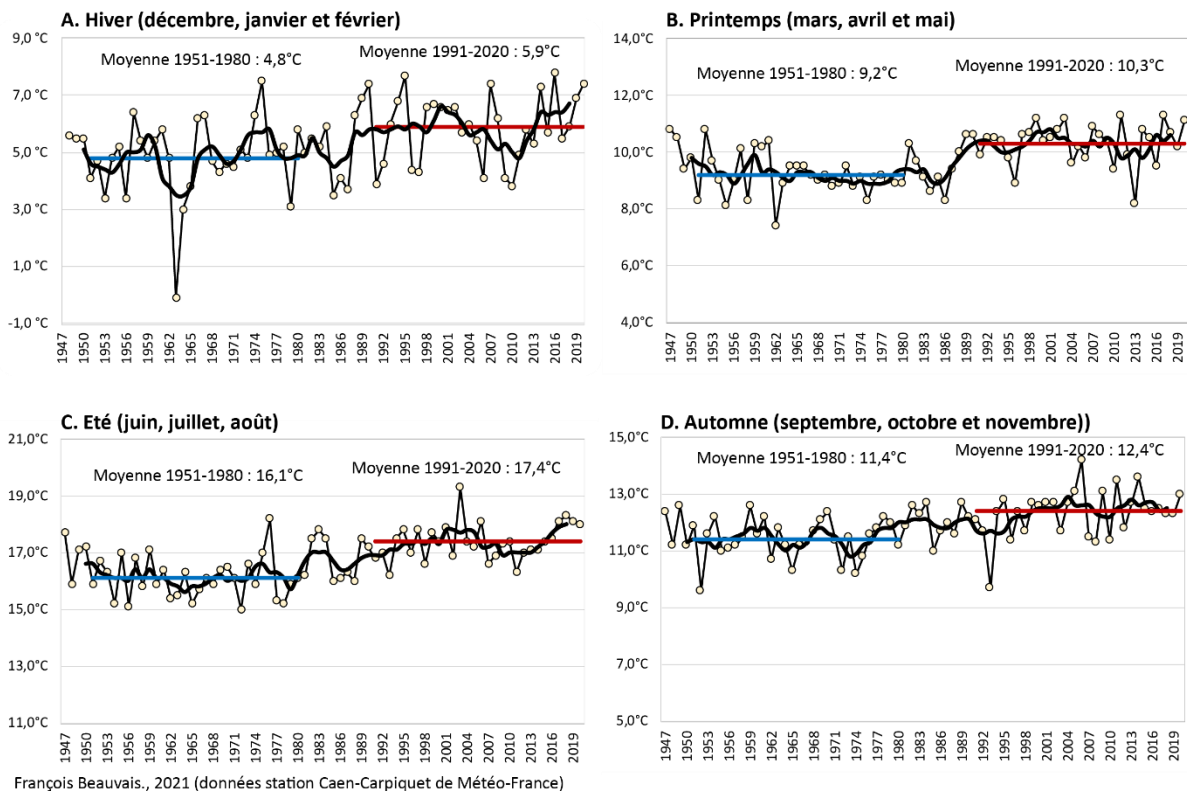


C'est en été que le réchauffement est le plus important avec +1,3°C tandis qu'il est de +1,1 sur les trois autres saisons (Figure 46).

L'hiver le plus rude remonte à 1963 avec une température moyenne exceptionnelle de -0,1°C (- 3,1°C pour la minimale). Hormis cet épisode extrême, les hivers les plus froids se situent entre 3 et 4°C. Les plus doux, entre 6 et 7°C, s'observent principalement depuis la fin des années 1980.

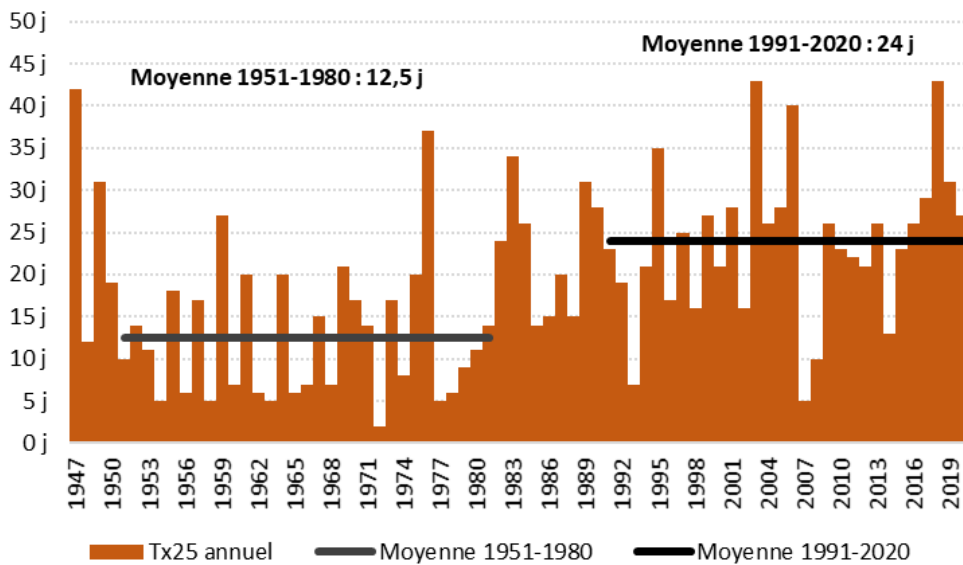
Désormais la température dépasse régulièrement ces seuils. Trois hivers relativement froids ont tout de même eu lieu au début du XXI^e siècle, autour de 4°C : 2006, 2009 et 2010. La température printanière a d'abord eu tendance à diminuer jusqu'aux années 1980, pour ensuite nettement augmenter la décennie suivante. Mais il faut souligner ici que le début de la série de données en 1947 s'effectue sur une décennie aux étés exceptionnellement chauds et secs pour l'époque sur l'ensemble du pays (Sanson et Pardé, 1950). L'année 2011 enregistre le printemps le plus chaud avec 11,3°C. Le seuil de 11°C a été franchi à 5 reprises depuis 1999. Un printemps frais est malgré tout enregistré en 2013 (8,2°C), en raison notamment d'un hiver tardif du 11 au 15 mars sur le nord-ouest de la France, avec des records de froid (jusqu'à -10°C localement) et un épisode de neige exceptionnel (20 à 40 cm). C'est le deuxième printemps le plus froid derrière celui de 1955 (8,1°C). Deux étés exceptionnellement chauds sont constatés avant les années 1980 : 1947 (17,7°C) et 1976 (18,2°C). Sur l'ensemble de la chronique celui de 2003 est le plus chaud (19,3°C) à cause notamment de la canicule des 15 premiers jours d'août. Hormis quelques étés plus frais en 2017, 2008 et 2011 (entre 16 et 17°C), la période estivale est de plus en plus douce, en témoigne la température moyenne de 17,4°C sur la Normale 1991-2020 contre 16,1°C pour celle de 1951-1980. La température des quatre derniers étés est supérieure ou égale à 18°C. Ces 15 dernières années, la moitié des automnes ont une température moyenne supérieure à 13°C. Le record est établi en 2006 avec 14,2°C, devant 2014 (13,6°C) et 2011 (13,5°C).

Figure 46 : Evolution de la température moyenne à Caen-Carpique pour les 4 saisons sur la période 1947-2020



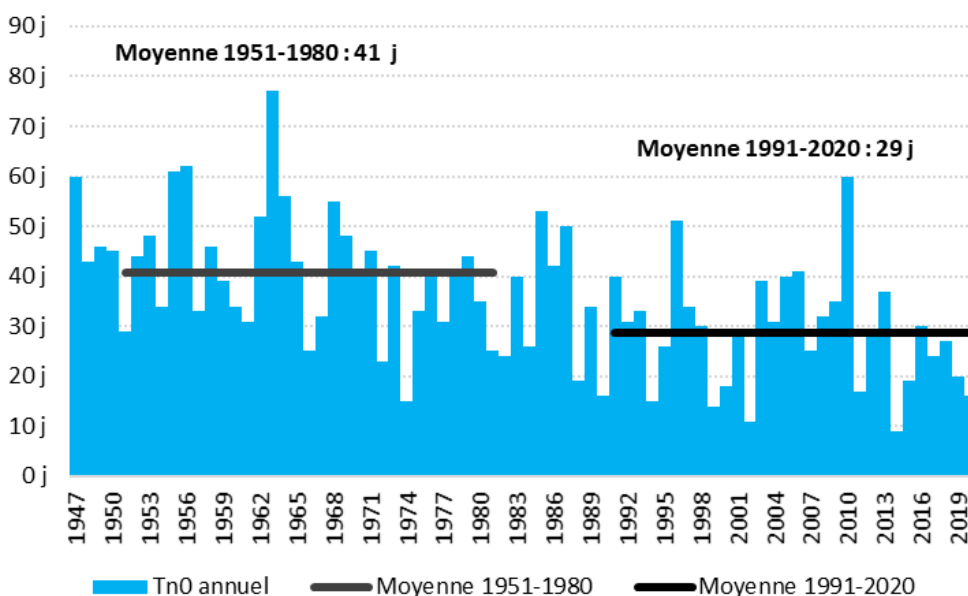
Parallèlement, les jours de chaleur ont quant à eux augmenté (David et al., 2020) de 11,5 jours, passant de 12,5 à 24 (**Figure 47**). Le nombre de gelées a diminué de 12 jours, passant de 41 à 29. L'occurrence du froid à -5°C passe de 1/3 années à 1/6 années (**Figure 48**).

Figure 47 : Evolution du nombre de jours de chaleur (T maxi $\geq 25^{\circ}\text{C}$) à Caen-Carpiquet de 1947 à 2020



François Beauvais., 2021 (données Météo-France)

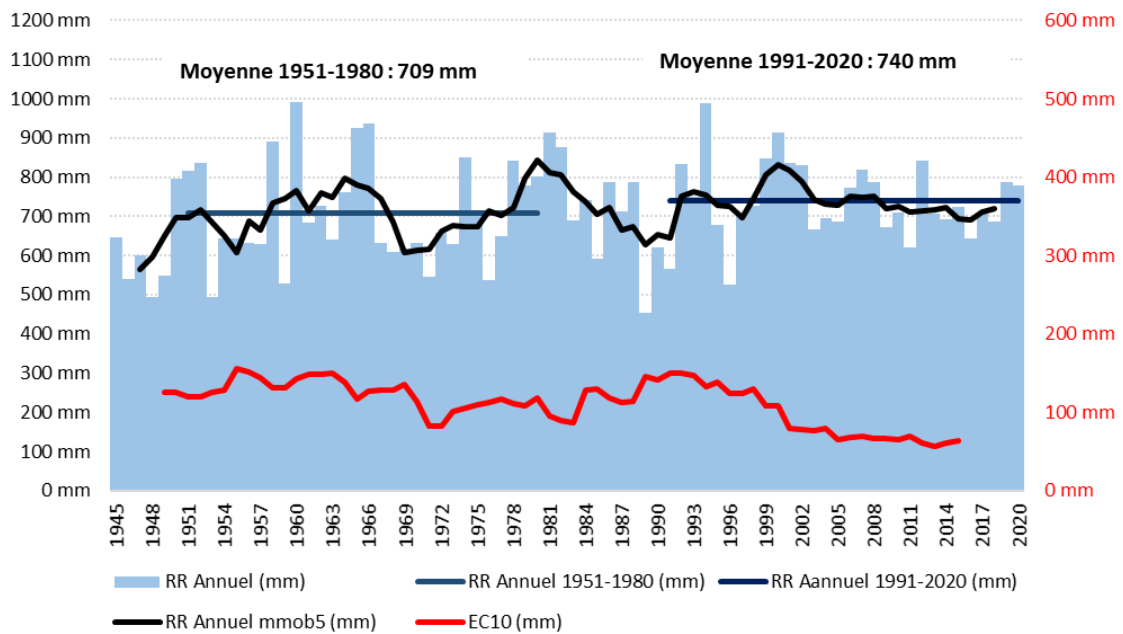
Figure 48 : Evolution du nombre de jours de gel à Caen-Carpiquet de 1947 à 2020



François Beauvais., 2021 (données Météo-France)

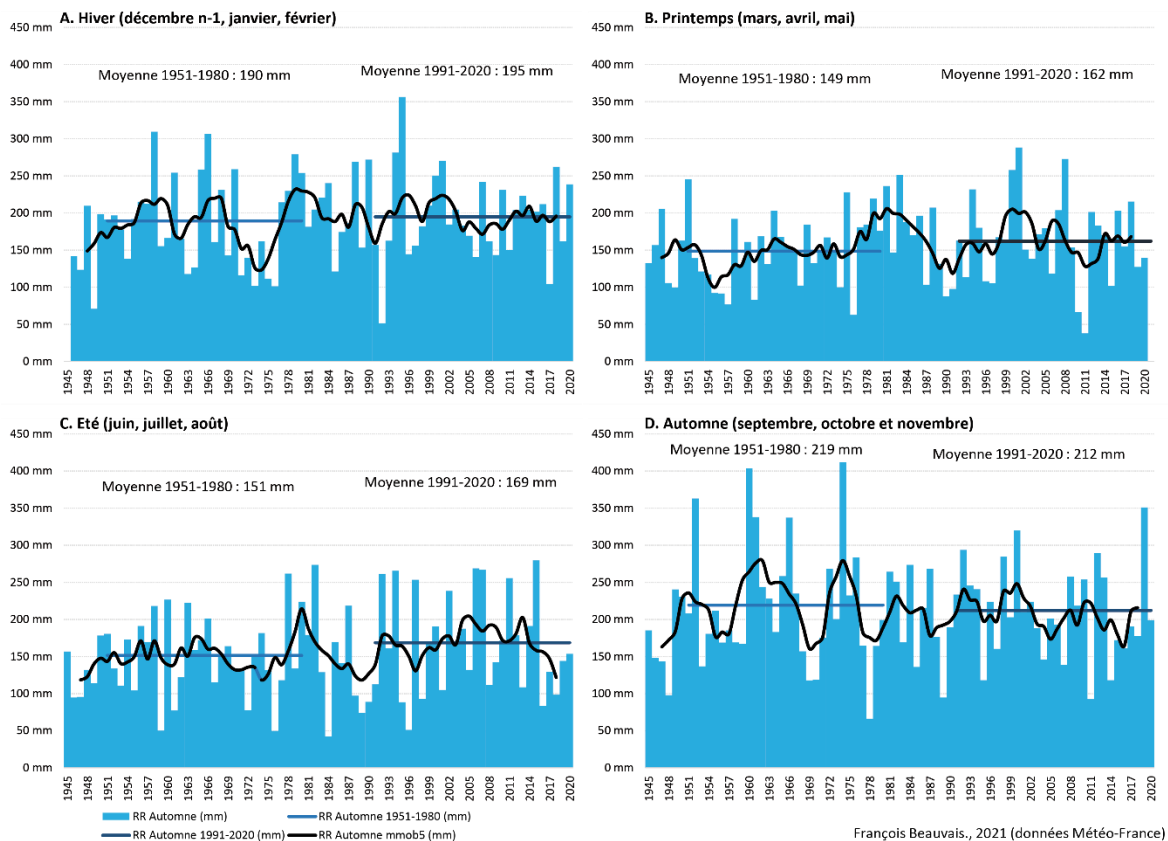
Concernant le cumul pluviométrique, une légère augmentation est constatée (+4 %) puisqu'il passe de 709 à 740 mm entre les deux Normales climatiques (Figure 49). Cette hausse n'est pas statistiquement représentative à cause de la très forte variabilité interannuelle. A noter que la variabilité de la pluviométrie, habituelle sous climat océanique tempéré, semble moins prononcée depuis le début du 21^e siècle (écart-type glissant moyen décennal de l'ordre de 100 à 150 mm sur la période 1951-2000 et de 60 à 80 mm sur la période 2001-2020), avec une réduction des années très peu arrosées. La dernière année inférieure à 600 mm remonte à 1996.

Figure 49 : Evolution du cumul pluviométrique annuel à Caen-Carpiquet de 1945 à 2020



Il n'y a également pas de tendance à l'échelle saisonnière (Figure 50). Cependant, en décomposant au pas de temps mensuel, le test de Mann-Kendal au seuil $\alpha = 0,05$, révèle respectivement une diminution et une hausse significative pour les mois de septembre (-18 %) et d'octobre (+11 %).

Figure 50 : Evolution du cumul pluviométrique à Caen-Carpiquet pour les 4 saisons sur la période 1947-2020

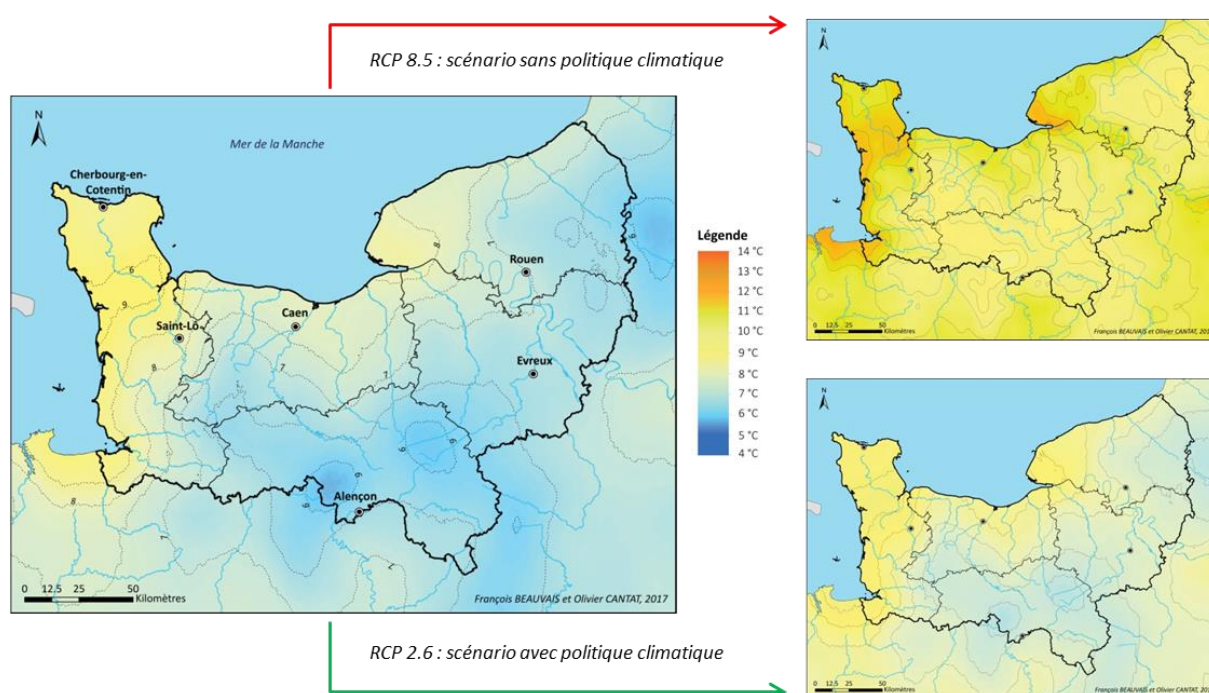


François Beauvais., 2021 (données Météo-France)

2.2.3. Evolutions à l'horizon 2100

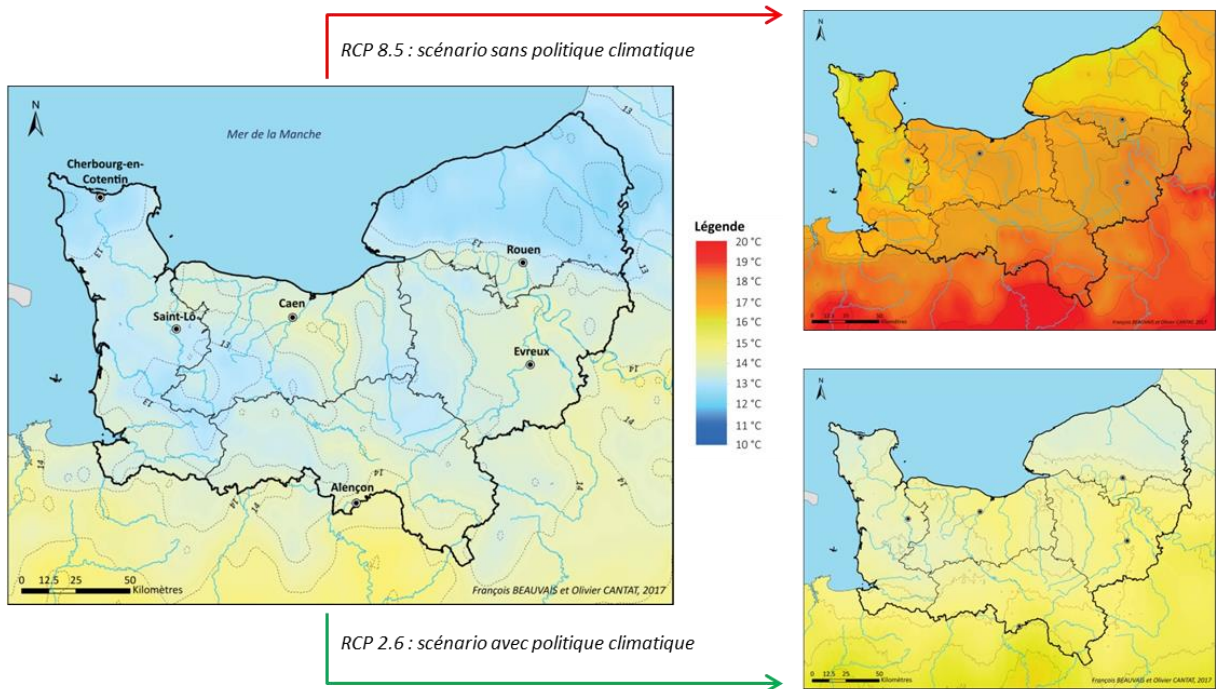
Dans le cas d'une réduction des émissions de GES (scénario RCP 2.6), la température moyenne⁵³ de la période 2071-2100 serait contenue à +0,9 °C par rapport à la période de référence 1976-2005, passant de 10,2 à 11,2 °C. En revanche, dans l'hypothèse d'une poursuite des émissions de GES, la température moyenne pourrait augmenter de +3,5 °C. Elle serait alors de 13,7 °C, température actuellement relevée dans le sud de la France. La hausse concerne toutes les saisons. Avec le scénario pessimiste elle serait un peu moins marquée au printemps (+2,7 °C) et en hiver (+3,1 °C) qu'en été (+4,3 °C) et en automne (+4 °C). L'augmentation est plus importante pour les maximales (+3,9 °C ; **Figure 51**) que pour les minimales (+3 °C ; **Figure 52**). Le réchauffement est plus prononcé à l'intérieur des terres que sur le littoral. Dans le sud-est de la région, les maximales moyennes au mois d'août seraient supérieures à 30 °C, soit 6 °C de plus que la Normale actuelle. Elles seraient inférieures à 22 °C au nord du Cotentin ce qui correspond à +4 °C. Sur l'ensemble de l'année, elles seraient de l'ordre de 13 °C au nord-ouest de la région et de plus de 14 °C dans les zones abritées et au sud-est. La température augmenterait sur l'ensemble du XXI^e siècle, mais c'est à partir de 2060 que l'augmentation deviendrait très prononcée et où la trajectoire du scénario RCP 8.5 se dégage de celles des scénarios RCP 2.6 et 4.5 comme en témoigne l'évolution de la température simulée pour le site de Caen (**Figure 53**).

Figure 51 : Comparaison de la température minimale annuelle en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)



⁵³ Les valeurs régionales correspondent à la moyenne des 462 points de la grille SAFRAN sur le territoire normand, calculées sur Arcmap. Les cartes présentées dans cette sous-partie sont réalisées sur ce logiciel en procédant à une interpolation de points.

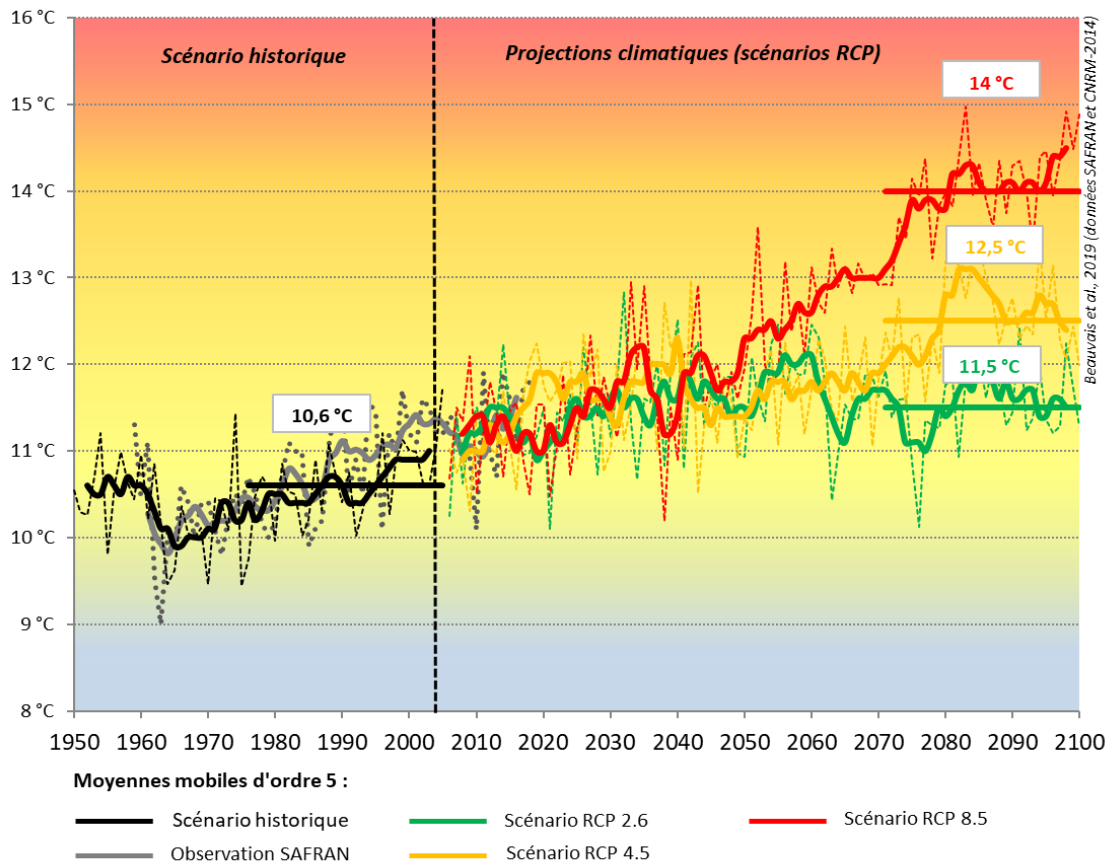
Figure 52 : Comparaison de la température maximale annuelle en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)



Source : «Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL», simulations CNRM-2014.

Réalisation : François BEAUVAIS, Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, 2017.

Figure 53 : Evolution de la température à Caen de 1950 à 2100 : projection à partir des scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2100



Avec le scénario RCP 2.6, les gelées diminueraient de 9 jours, passant de 35 à 26 jours (**Figure 54**). La moyenne régionale des jours de chaleur serait de 22 jours (+ 9 jours), contre 13 jours en période de référence. Dans le cas du scénario pessimiste, la Normandie ne compterait plus que 11 jours de gel, qui pourraient presque même disparaître pour la partie la plus océanique de la région. A l'intérieur des terres, dans le Pays d'Ouche et le Perche ces jours de froid seraient divisé par deux, passant d'une soixantaine à une trentaine d'occurrences annuelles. Il en va de même pour les jours de très grand froid qui disparaîtraient et de grand froid qui deviendraient très rares (Cantat, 2006). Le cumul de chutes de neige diminuerait quant à lui de 75 à 90 % selon les secteurs (Cantat, 2021). Sans maîtrise des GES, les jours d'été augmenteraient de 40 jours, passant de 13 à 54 jours (**Figure 55**). Au sud-est de la région, le seuil des 80 jours pourrait être atteint, ce qui correspond quasiment au cumul actuel observé dans les régions méditerranéennes françaises. Les vagues de chaleur seraient plus fréquentes et plus intenses. Les deux ensembles les plus maritimes de la région verraient ces jours d'été moins nombreux. Dans le Cotentin ils pourraient être inférieurs à 30 jours, et même sous le seuil de 10 jours dans le secteur hyperocéanique de la Hague. Les jours de fortes chaleurs (à partir de 30°C) sont actuellement quasi-inexistants dans le Cotentin. A la fin du siècle ils resteraient relativement épargnés avec seulement quelques occurrences. Ce n'est en revanche pas le cas des zones les plus continentales telles que le Perche ou la plaine de Saint-André qui pourraient voir cet aléa survenir fréquemment en été pour atteindre 40 jours annuels (contre 6 jours en période de référence). La température maximale pourrait même dépasser 40°C environ deux fois par an (contre une occurrence tous les 5 à 10 ans dans le reste de la région et aucune dans le nord de la Manche). Les types de temps caniculaires, durant lesquelles les températures minimales et maximales supérieures ou égales à 22°C et 33°C, augmenteraient alors drastiquement. S'ils font figure d'exception en période de référence, la moyenne annuelle de jours de canicules pourrait atteindre 4 jours à Caen, 11 jours à Rouen et 16 jours dans le Perche.

Figure 54 : Comparaison du nombre de jours de gel annuel ($T_{\text{mini}} \leq 0^{\circ}\text{C}$) en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)

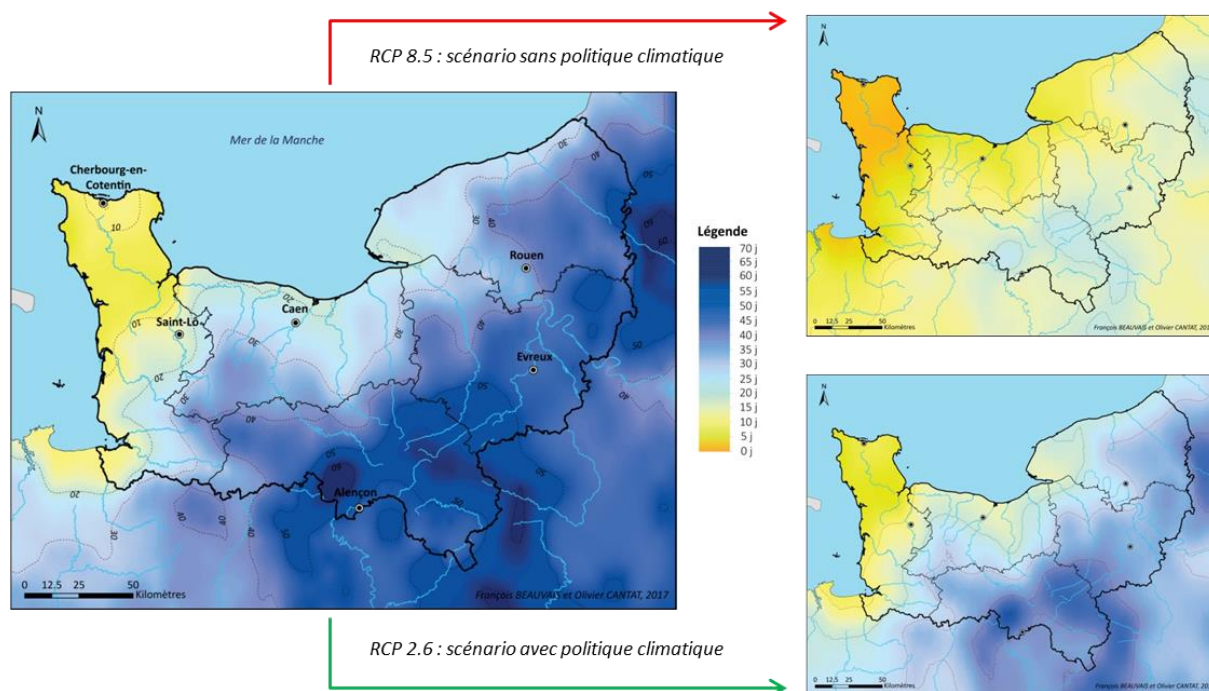
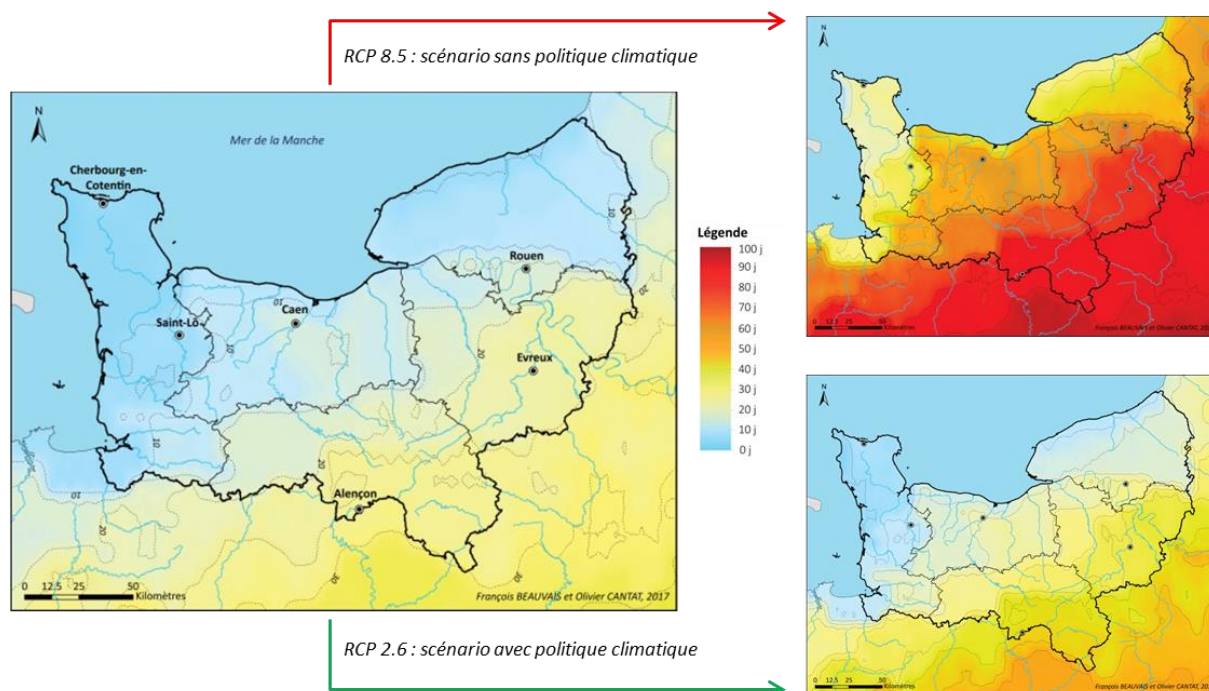
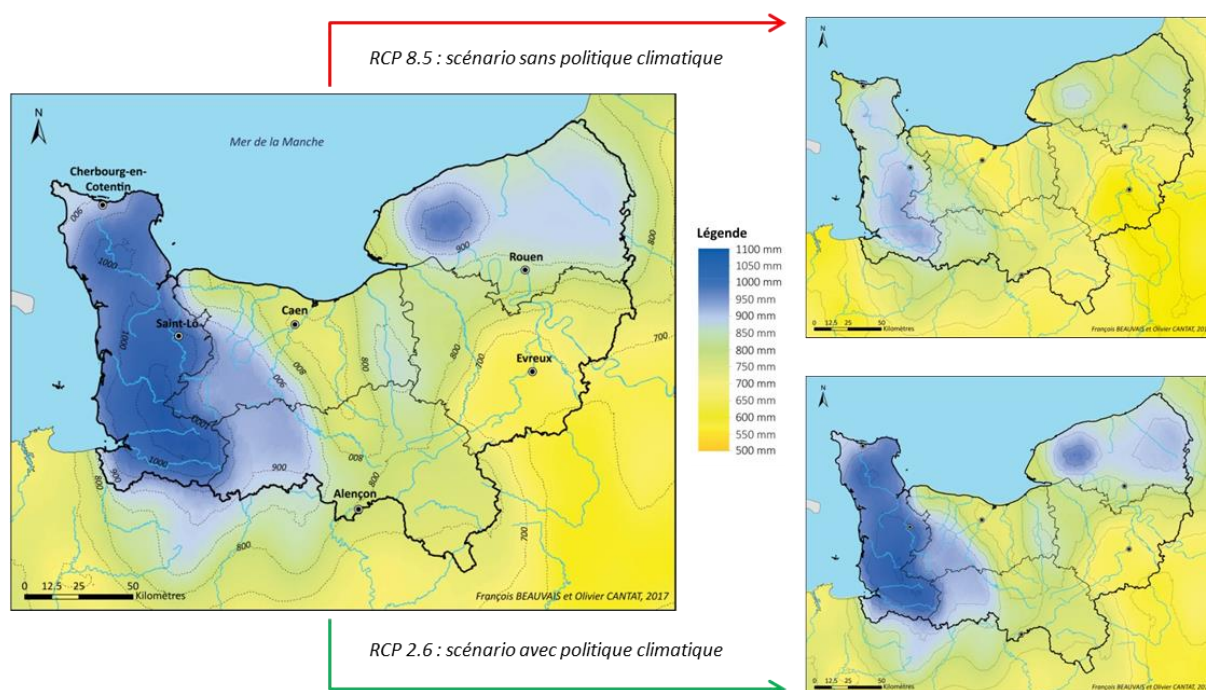


Figure 55 : Comparaison du nombre de jours de chaleur annuel ($T_{\text{maxi}} > 25^{\circ}\text{C}$) en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)



Le respect de politiques climatiques à l'échelle internationale n'engendrerait pas de modification du cumul pluviométrique en Normandie (**Figure 56**). Dans le cas contraire, les précipitations totales annuelles pourraient diminuer de 84 mm (-10 %), passant de 859 à 775 mm. La région perdrait 21 jours de pluie (de 139 à 118 jours ; **Figure 57**). Cette réduction n'est pas uniforme sur l'ensemble du territoire et pourrait être plus prononcée à l'ouest, de la Baie du Mont-Saint-Michel au Centre Manche (-15 %). Dans les plaines agricoles abritées de l'Eure et du Calvados, les précipitations annuelles pourraient respectivement être réduites à 570 et 650 mm (contre 650 et 720 en période de référence).

Figure 56 : Comparaison du cumul annuel de précipitations en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)



Source : «Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL», simulations CNRM-2014.

Réalisation : François BEAUVAIS, Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, 2017.

A l'échelle infra-annuelle, en découpant l'année en deux grandes périodes, morte saison (octobre - mars ; **Figure 58**) et saison végétale (avril - septembre ; **Figure 59**), on constate peu de changement pour la première tandis qu'une réduction du cumul pluviométrique est observée pour la seconde. Néanmoins en considérant les saisons, les précipitations hivernales augmenteraient de 13 % et même jusqu'à plus de 20 % dans la moitié sud. Les autres saisons seraient en revanche marquées par une diminution assez nette des pluies : -10 % au printemps, -30 % en été et -20 % en automne. Les sécheresses météorologiques devraient être plus prononcées (**Figure 60**). Actuellement d'une vingtaine de jours successifs sans pluie, elles pourraient approcher le seuil de 30 jours, voire près de 35 jours dans les plaines céréalières. Conséquence de l'augmentation de la température et de la réduction des précipitations, les conditions bioclimatiques se dégraderaient. Ces régions subhumides deviendraient déficientes dans l'échelle du profil bioclimatique d'Hougaard. Le Bocage, humide deviendrait quant à lui subhumide.

Figure 57 : Comparaison du nombre de jours de précipitations significatives ($P \geq 1 \text{ mm/jour}$) en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)

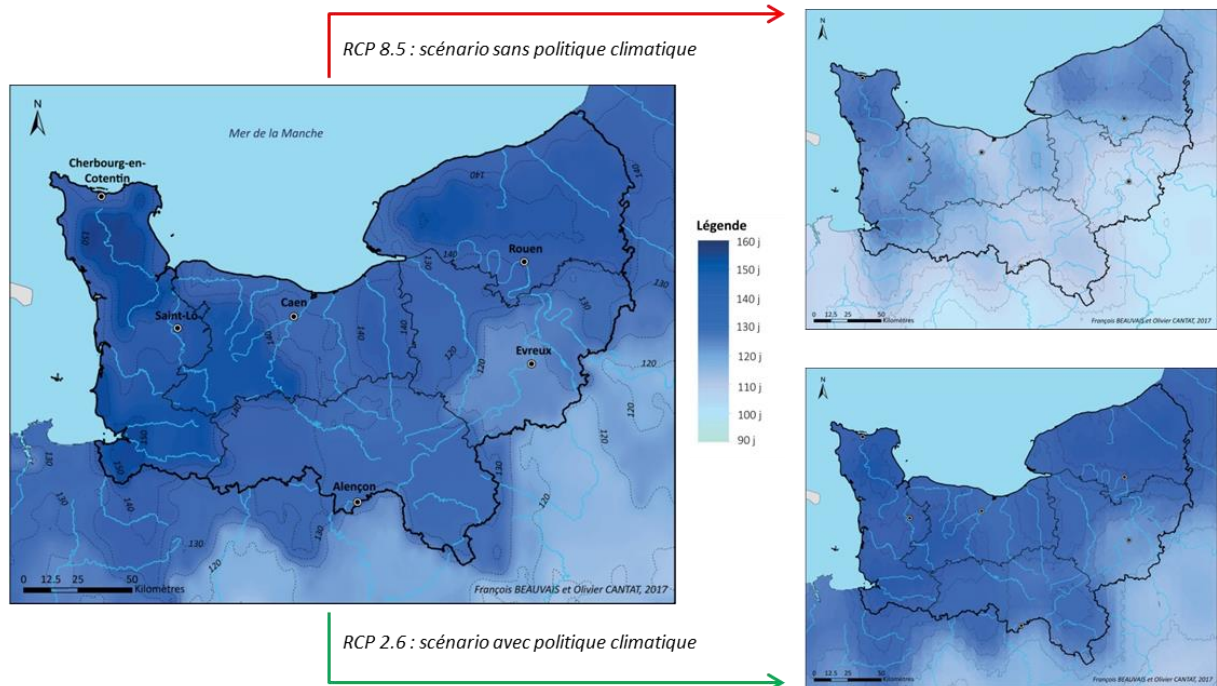


Figure 58 : Comparaison du cumul de précipitations entre octobre et mars (« morte saison ») en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)

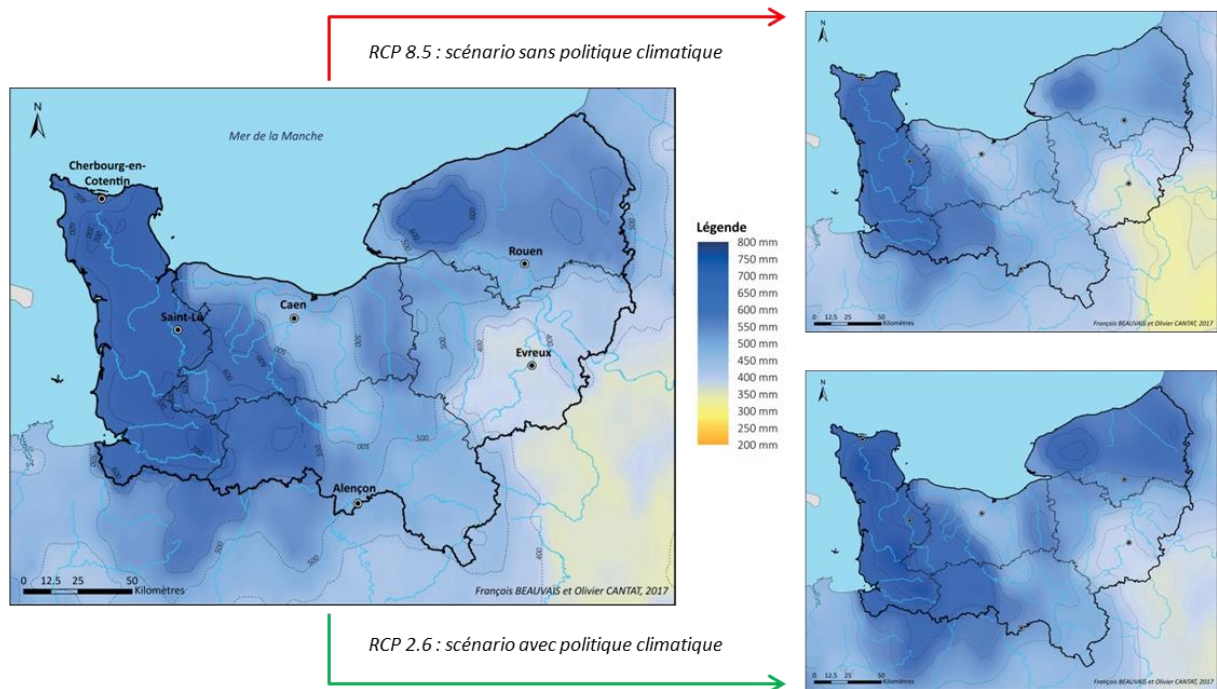
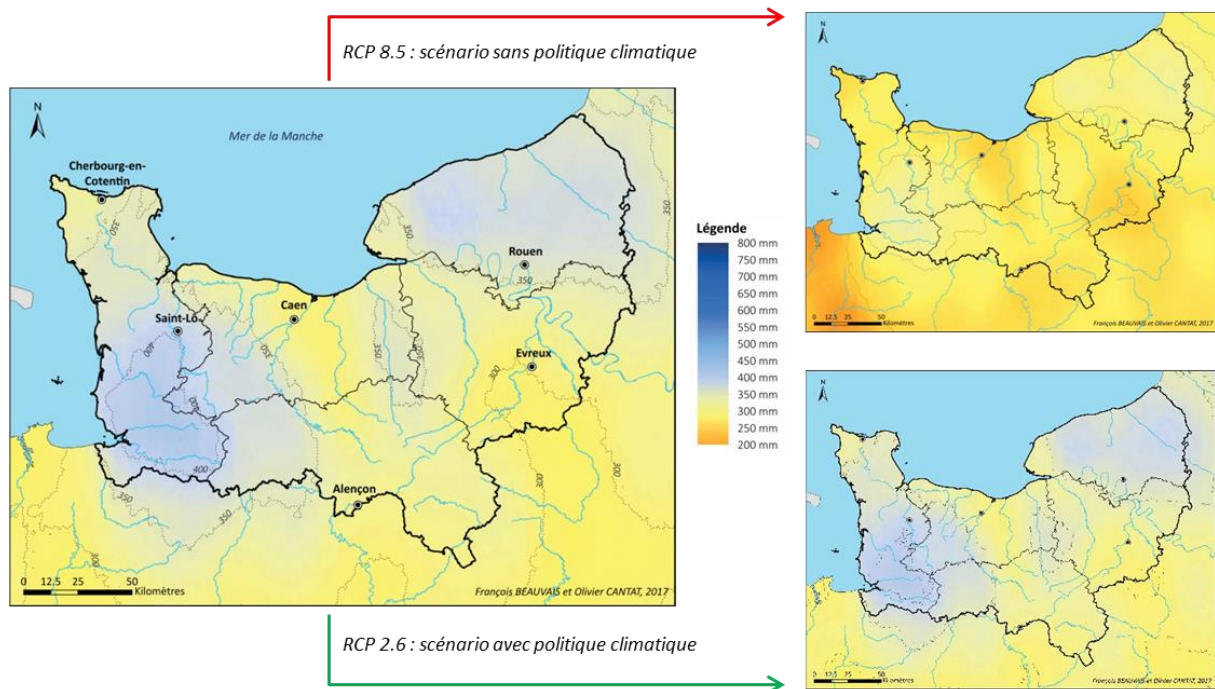


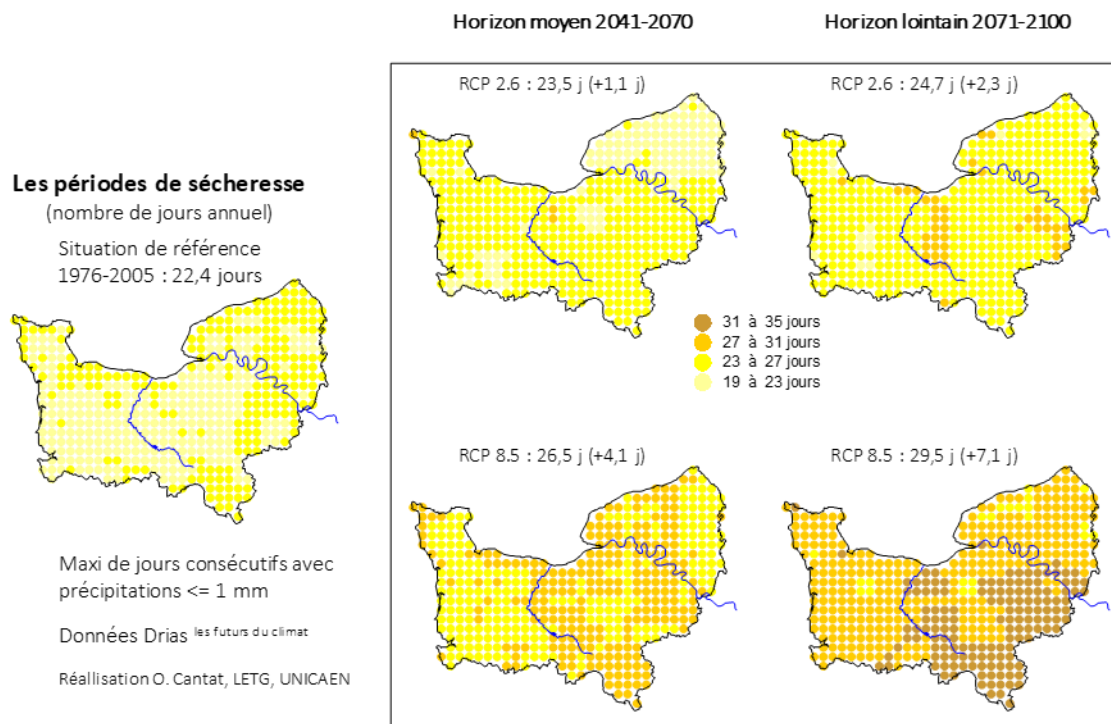
Figure 59 : Comparaison du cumul de précipitations entre avril et septembre (« saison végétale ») en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat *in* DREAL, 2020)



Source : «Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL», simulations CNRM-2014.

Réalisation : François BEAUVAIS, Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, 2017.

Figure 60 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin) (Cantat et al., 2021)



A l'échelle régionale, les précipitations intenses (supérieures ou égales à 20 mm) n'augmenteraient pas de manière très significative. Etant de 4 jours en périodes de référence, elles passeraient à 4,3 et 4,8 jours avec les scénarios RCP 2.6 et 8.5.

L'ensoleillement n'est pas un paramètre en sortie des simulations CNRM-2014. Néanmoins, les données de rayonnement montrent une augmentation de ce dernier. Actuellement d'un peu plus de 110 W/m²/an, il augmenterait d'environ 9 et 12 % pour les deux scénarios.

La Normandie, située au nord-ouest de la France, bénéficie d'un climat tempéré océanique avec des disparités. Les « Pays climatiques » les plus océaniques sont situés au nord-ouest de la région, tandis que les plus continentalisés se situent au sud-est. La Plaine de Caen, espace d'étude retenu pour cette thèse est caractérisé par un climat océanique dégradé. La température moyenne est de 11,5 °C avec un cumul pluviométrique annuel de 740 mm (Normale climatique 1991-2020). Cette entité céréalière comptabilise 24 jours de chaleur et 29 gelées annuelles.

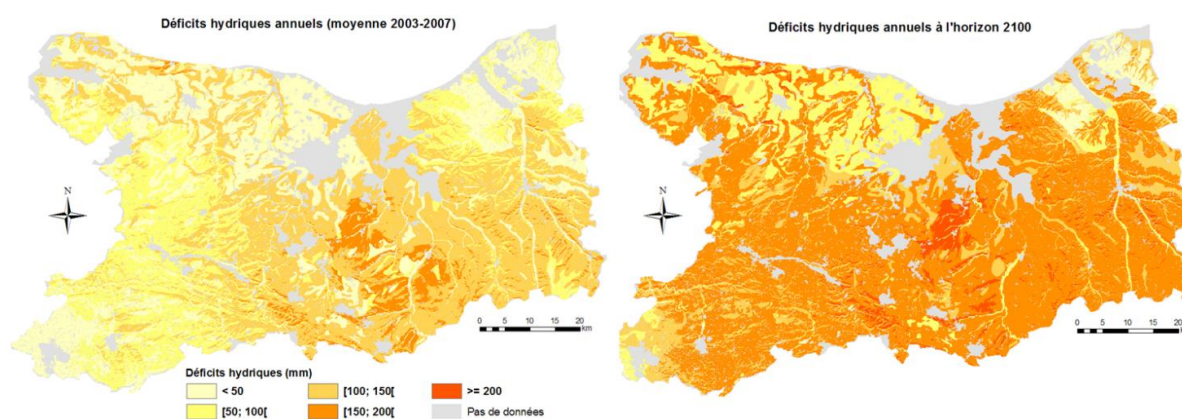
Le réchauffement climatique est constaté sur l'ensemble de la Normandie comme en attestent les relevés des 8 stations retenues pour ce contexte. A Caen la température moyenne annuelle a augmenté de +1,1 °C entre les Normales climatiques 1951-1980 et 1991-2020. Cette tendance est constatée pour chaque saison de l'année. Les jours de chaleurs sont plus nombreux (+11, 5 jours) tandis que les gelées diminuent (-12 jours). En revanche, il n'y a pas d'évolution significative du cumul pluviométrique.

Cette trajectoire devrait se poursuivre dans les prochaines décennies pour les températures. Dans l'hypothèse du scénario le plus pessimiste, la température moyenne annuelle à Caen pourrait atteindre 14 °C d'ici la fin du siècle. Le nombre de jours de chaleur serait supérieur à 50 tandis qu'il n'y aurait plus qu'une dizaine de gelées annuelles. Les précipitations, quant à elles, diminueraient. Cette tendance serait plus marquée en été alors qu'une légère hausse pourrait être constatée en hiver.

2.4. Constat d'un besoin de recherche sur les conséquences du changement climatique pour l'agriculture normande

En 2009 et 2010, Cantat et al présentent une méthode de spatialisation des bilans hydriques à échelle fine pour le département du Calvados. Pour le calcul de la réserve utile (disponible), le modèle intègre les données pédologiques (7514 sondages). Le rayonnement global est calculé en tenant compte de la déclivité et de l'exposition des versants, de la hauteur solaire et de la durée du jour pour calculer le rayonnement solaire. Cette donnée est ensuite intégrée dans la formule de Turc pour déterminer l'évapotranspiration. Le Gouée et al (2010) présentent ensuite l'évolution du déficit hydrique à l'horizon 2100 à partir des données du modèle climatique ARPEGE selon le scénario A1B (Figure 61). Les résultats exposent une forte augmentation des surfaces touchées par une sécheresse des sols de forte intensité (70% de la SAU déclarée). Des conséquences sont alors attendues sur les rendements des cultures et des prairies. Cependant les auteurs précisent l'inégale exposition à ces risques, plus importants pour les petits sols au sud de la plaine de Caen et dans le Bocage, tandis que les sols épais du nord de Caen se verraient faiblement impactés. Dans le cadre de l'ouvrage « *Changements climatiques dans le Grand-Ouest : évaluation, impacts et perceptions* » associé au programme CLIMASTER, ces aspects sont abordés (Lamy et al., 2012) en précisant notamment que l'intensité des sécheresses jusqu'en 2050 resterait faible au regard de ce qui est attendu pour la seconde moitié du 21^e siècle. Deux mémoires de recherche (Beauvais, 2016 et 2017) s'intéressent au changement climatique en Plaine de Caen et en Normandie à partir des données du modèle climatique régional ALADIN-Climat pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Les hivers plus doux laissent supposer un déficit de vernalisation, un maintien de la pression maladie et des mauvaises herbes. L'augmentation de la température pourrait modifier les cycles végétatifs et les jours de chaleur en hausse pourraient engendrer l'échaudage des grains. Les déficits hydriques devraient être plus prononcés, surtout l'été ce qui pourrait être préjudiciable pour l'agriculture sur les sols minces.

Figure 61 : sécheresse des sols : période actuelle et horizon 2100 pour le scénario A1B (d'après Le Gouée et al., 2010)



L'ensemble de ces travaux expose l'évolution du contexte biopédoclimatique et climatique. Cependant, aucune étude spécifique (simulation de la phénologie et aléas au cours du cycle) portant sur les conséquences du changement climatique sur le blé tendre n'est relevée, ni même sur une autre culture. Les seules publications et communications relevant de ce sujet sont celles associées à ce travail de thèse présenté dans les chapitres qui suivent (Beauvais et al., 2019a ; Beauvais et al., 2019b ; Beauvais et al., 2019c ; Beauvais et al., 2019d ; Beauvais et al., 2020a ; Beauvais et al., 2020b).

L'état de l'art expose donc l'absence d'études scientifiques en agroclimatologie dans la région Normandie. D'ailleurs, d'ordre plus général, cette recherche constitue la première thèse de climatologie sur le changement climatique en Normandie. La dernière thèse de climatologie remonte à 1993, présentée par Frédéric Huard, sur les méthodes de spatialisation des paramètres climatiques en fonction du relief (méthode AURELHY) pour identifier les potentialités agroclimatiques de productions fourragères dans l'ex-région bas-normande. Mais à cette époque le changement climatique n'était pas encore l'objet d'étude majeur de la discipline, et quand bien même il aurait été traité, une étude sur les céréales aurait été pertinente et une mise à jour se serait imposée.

Pourtant une demande locale de connaissances sur ces questions est perceptible à l'échelle régionale puisque l'adaptation n'est pas encore concrètement envisagée. Pour pouvoir la planifier, les organismes agricoles ont besoin de connaissances, de savoir à quoi s'attendre en matière d'évolutions climatiques et des conséquences associées sur les cultures pour aider à la décision. Lors de la construction de ce projet de recherche, nous avons consulté la Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie le 9 janvier 2017. Emilie Chéron, responsable du service "Environnement et Territoire" précise que les questions que soulèvent ce projet de recherche et les objectifs associés s'inscrivent dans ceux de la Chambre d'Agriculture qui n'a "*localement pas d'expert pour le climat*". Ce service a également consulté les techniciens agricoles des plaines céréalières donnant des retours intéressés pour la dimension prospective en soulignant un besoin de connaissance non pas seulement sur les évolutions moyennes, mais également sur la variabilité du climat. Par ailleurs, au cours de ces quatre années de thèse, les résultats ont été présentés à différentes structures de Normandie (Région Normandie, Communauté Urbaine de Caen la Mer, Chambres d'Agricultures, EPCI, syndicats agricole, Banque), demandeuses de connaissances sur les conséquences du changement climatique en Normandie. Une partie de ces communications ont été réalisées dans le cadre du GIEC Normand, créé en 2019, dont le but est de faire la synthèse des travaux scientifiques locaux existants et de traduire les prévisions du GIEC international à l'échelle du territoire normand. La création de ce GIEC local montre d'ailleurs que le changement climatique est désormais au centre des problématiques auxquelles la région Normandie s'intéresse. Un volet "sols, agronomie et agriculture" présente un état de l'art qui se fonde essentiellement sur les observations des chambres d'Agriculture et le projet LIFE AGRIADAPT qui n'est pas réalisé spécifiquement à l'échelle régionale et qui reste standardisé⁵⁴, ce qui démontre une fois de plus le besoin de recherches scientifiques sur ce sujet (Brunel-Muguet et Diomard., 2021).

Le changement climatique est observé en Normandie et devrait se renforcer dans les prochaines décennies. Plusieurs impacts sont redoutés sur : la santé (canicules), la biodiversité (disparition d'espèces, nouvelles espèces) ; les submersions marines (hausse du niveau marin) ; les ressources en eau (déficit, progression du biseau salé), inondations (pluies intenses et ruissellement) et glissements de terrains (vigilance sur ceux du Pays d'Auge et du Perche si hausse des pluies

⁵⁴ Le programme LIFE AGRIADAPT se base sur un modèle climatique d'une résolution de 25 km (Modèle ETHZ-CLM-HadCM3Q0) pour l'ancien scénario SRES A1B. La période historique ne dispose pas de profondeur temporelle importante (de 1987 à 2017) et les indicateurs pour les cultures ne sont pas calculés en tenant compte des phases de développement de la plante.

hivernales), la fragilisation du système économique (volatilité des prix, coût de l'adaptation, assurances, ...). L'agriculture apparaît vulnérable, tant du côté de l'élevage (stress pour l'animal, modification des dates de fauches et de mises à l'herbe, perte de rendement des prairies) que des cultures (modification des cycles végétatifs, échaudage thermique, déficit hydrique, parasites, maladies, ...). Pour anticiper les conséquences du changement climatique sur l'agriculture, il convient de vérifier ces hypothèses à partir d'études d'impacts prospectives en bioclimatologie. Ce type de travaux n'est pas révélé dans l'état de l'art, ce qui aboutit au constat d'un besoin de recherche.

Conclusion du chapitre 2

Le changement climatique constitue une réalité, tant à l'échelle globale qu'à l'échelle locale. Il est lié aux activités humaines qui participent à un effet de serre additif. Ce processus fait consensus et plusieurs marqueurs attestent de sa véracité (augmentation de la température, fonte des glaces, hausse du niveau des mers, etc.). En Normandie, il est déjà observé puisque la température moyenne a augmenté de +1,1 °C entre 1951 et 2020. Les jours de chaleurs sont plus nombreux et les gelées se raréfient. En revanche, aucune tendance significative n'est constatée pour les précipitations.

Il est possible d'établir des projections climatiques pour le futur à l'aide de la modélisation prédictive du climat. Elle fait appel à des modèles globaux dont la maille est de l'ordre de 150 km de côté. Mais pour s'approcher au plus près des conditions climatiques à l'échelle d'un territoire, il existe des méthodes de descentes d'échelle, avec des modèles régionaux dont la résolution est d'environ 10 km. Les simulations sont produites pour plusieurs scénarios RCP. Il s'agit de quatre profils d'évolution des concentrations de GES avec leur forçage radiatif (modification du bilan radiatif planétaire) au sommet de la troposphère. Le scénario optimiste (RCP 2.6) correspond au respect des accords de Paris sur le climat (2015), soit à une réduction des émissions de GES et un réchauffement climatique contenu à +2 °C. Le plus pessimiste (RCP 8.5) représente quant à lui la poursuite de la logique de croissance économique actuelle et de la trajectoire des émissions de GES associée.

Les données issues de la modélisation prédictive du climat laissent présager une poursuite de l'augmentation de la température en Normandie, de +3,5 °C à l'horizon 2100 par rapport à la période de référence 1976-2005 pour le scénario pessimiste. Le nombre de jours de chaleur augmenterait d'environ 40 jours (de 13 à 54 jours) tandis qu'il y aurait 24 jours de gelées en moins (de 35 à 11 jours). Le cumul pluviométrique augmenterait de +13 % en hiver mais diminuerait de -10, -20 et -30 % respectivement au printemps, en été et en automne.

Ces projections climatiques semblent alarmantes pour la céréaliculture régionale et présagent une augmentation des stress thermiques et hydriques. Aucune recherche en agroclimatologie, appliquée à la céréaliculture n'a été menée sur ces questions en Normandie. L'état de l'art expose un besoin de recherches pour répondre à ces enjeux.

Chapitre 3

Méthodologie et données pour la recherche

Introduction

Les deux premiers chapitres exposent les enjeux gravitant à différentes échelles autour de la céréaliculture et du changement climatique. Le constat est alarmant et des études appliquées à cette thématique sont nécessaires pour envisager l'adaptation de la filière agricole.

Les climatologues-géographes sont peu présents au sein des recherches scientifiques menées sur ce sujet. Pourtant leurs approches conceptuelles (systémique, temporelle, spatiale) et méthodologiques (traitements de données climatiques, systèmes d'information géographique, instrumentations, enquêtes, ...) sont, au même titre que les autres disciplines, pertinentes pour répondre aux problématiques de l'agriculture dans un contexte de changement climatique.

Ce chapitre présente les concepts et la posture épistémologique retenus pour cette thèse de doctorat. Le protocole de recherche est présenté, retenant des approches agroclimatiques et phénoclimatiques, une enquête de terrain auprès de la filière céréalière ainsi que des relevés pédologiques et météorologiques *in situ*.

Figure 62 : Pluviomètre et enregistreur de température dans une parcelle de blé tendre à Anguerny



3.1. Concepts et posture épistémologique retenus pour étudier les conséquences du changement climatique sur l'agriculture

Avant de présenter la méthode et les données mobilisées dans le cadre de cette recherche, nous proposons de définir le concept de l'agrosystème et la posture épistémologique empruntée pour cette thèse. Cette théorisation permet d'exposer la conception que le chercheur se fait de la réalité et de comprendre le cheminement intellectuel de la thèse, les outils et les méthodes mobilisées ainsi que l'interprétation des résultats. En effet, même si l'on cherche à objectiver au maximum les recherches, une part de subjectivité du chercheur dans l'interprétation de son travail est inévitable. Livrer sa conception du réel est alors une forme d'honnêteté avant de présenter les résultats de recherche qui peuvent être influencés par sa perception et sa représentation du système étudié mais également du courant de pensées auquel il est rattaché.

3.1.1. Les définitions du concept d'agrosystème pour l'étude des espaces agricoles

L'agrosystème est vu ici comme un sous-système du géosystème⁵⁵ et correspond à une structure agricole considérée sous l'angle de son fonctionnement (Amat, 2008). Ce concept est régulièrement cité dans les publications scientifiques mais rarement défini et explicité, que ce soit chez les géographes ou les agronomes. En effectuant une recherche par mot clé sur Google Scholar, on constate rapidement que ce terme est employé dans les titres et le corps de texte des articles scientifiques, mais le lecteur ne sait pas concrètement ce que l'auteur entend par ce terme. De façon à ne pas le remobiliser comme un "mot valise" nous proposons de revenir sur les définitions trouvées dans la littérature et de proposer une conceptualisation de l'agrosystème que l'on considère dans ce travail de thèse.

3.1.1.1 Les définitions de l'agrosystème d'après la littérature scientifique

L'agrosystème est un écosystème qui a été modifié par l'agriculture, une activité humaine qui regroupe des travaux de productions végétales et animales. En géographie physique et environnementale française, Claude et George Bertrand (2002) ont proposé une définition de ce concept. L'agrosystème est rattaché à l'espace rural défini de la façon suivante :

« L'espace rural, c'est le milieu naturel aménagé pour la production agricole au sens large, animale ou végétale, par des groupes humains qui fondent sur lui la totalité, ou une partie, de leur vie économique et sociale. Il s'oppose à l'espace urbain, c'est-à-dire aux surfaces presque entièrement bâties et à fortes densités de population qui sont organisées pour remplir des fonctions « urbaines » : commerciales, administratives, artisanales et industrielles, intellectuelles et politiques ».

⁵⁵ Le géosystème est un système spatial considérant un ensemble d'éléments en interaction entre nature et sociétés. D'après Beroutchachvili et Bertrand (1978), le géosystème est constitué : du géome, c'est-à-dire des composants abiotiques (lithiomasse, aéromasse, hydromasse) ; du biome, soit les composants biotiques (biomasse : phytomasse et zoomasse) et des composantes anthropiques.

Pour ces auteurs, la structure apparente de l'agrosystème est le paysage. Les éléments indissociables qui le composent et leurs interactions constituent l'agrosystème. C'est pourquoi l'espace rural s'étudie par une approche globale. C'est à la fois une réalité écologique et une création humaine.

L'équilibre naturel est détruit et remplacé par des équilibres secondaires instables qui sont liés au type et au rythme de mise en valeur agricole. En effet, c'est par l'intermédiaire de la photosynthèse et de l'assimilation chlorophyllienne que la biocénose peut se développer. L'écosystème est régulé par la chaîne trophique. Lorsqu'un élément du maillon est détruit, alors l'équilibre du système est remis en cause. L'agriculture constitue donc une rupture dans l'écosystème naturel qui est "tronqué" en raison d'un détournement de la production naturelle à des fins extérieures à celui-ci. L'écosystème est modifié par l'homme qui tire du milieu pour produire des denrées alimentaires. L'équilibre secondaire instable (l'agrosystème) repose sur des prélèvements dans le système agricole (récoltes), s'accompagnent ensuite d'apports en matière vivante ou morte (fumure et engrais) de manière à rétablir son équilibre, indispensable à son bon fonctionnement. Le système de culture est central dans l'étude de l'agrosystème car il le structure. Lorsque l'agriculture évolue, l'écosystème s'en trouve modifié ce qui amène Claude et George Bertrand à dire qu'une *"mutation agricole devient une mutation écologique"*. Lorsque l'agriculture abandonne un espace, celui-ci ne peut redevenir naturel, sa modification est irréversible. Certes l'écosystème évoluera, mais sera différent de la période antérieure à sa mise en valeur. Trois sous-ensembles composent l'agrosystème. Le 1er est le « *potentiel abiotique* » relatif aux composants inertes à savoir le substrat géologique, la couverture pédologique, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Le 2^e concerne l'exploitation biologique, soit « *l'ensemble des communautés vivantes, végétales et animales* ». Le 3^e quant à lui fait référence à « *l'utilisation anthropique qui est liée à un certain type socio-économique d'exploitation de l'espace et qui interfère avec les deux sous-ensembles précédents* ».

S'intéresser à l'agrosystème revient alors à étudier le fonctionnement de l'espace agricole dans ses dimensions écologiques et anthropiques, passées et actuelles. La prise en compte de sa dimension temporelle permet de mettre en évidence les mutations qui ont lieu dans le rapport qu'entretiennent les sociétés rurales avec leur environnement (agricole). Ces mutations caractérisées par le passage d'un modèle d'*agrosystème* à un autre, permet de déceler les « *révolutions agricoles* » (C. Bertrand et G. Bertrand, 2002).

L'agrosystème de Claude et George Bertrand repose en grande partie sur l'écosystème modifié par l'homme. En effectuant une recherche dans les revues internationales on constate que l'agrosystème est un concept largement mobilisé par les recherches portant sur l'agriculture et notamment en agronomie. On constate que la conceptualisation de Claude et George Bertrand est proche de celle de Spedding (1988) qui ajoute toutefois le lien avec les animaux. On apporte au sol des fertilisants et de l'irrigation. La plante profite des éléments nutritifs, de l'eau et de la radiation solaire. Les cultures apportent des productions, qui servent en partie à la nourriture des animaux, dont les déjections constituent ensuite des apports pour le sol. Dans ces dimensions écologiques, l'agrosystème est parfois considéré seulement à l'échelle des interactions entre les éléments qui caractérisent la physiologie de la plante et le sol. On peut ainsi présenter la définition de l'agrosystème de Bethlenfalvay et Schüepp (1994) qui comprend :

« les racines des plantes, la microflore du sol, la faune du sol et la matrice géochimique abiotique du sol. Les pousses végétales, en tant que source d'énergie, font également partie intégrante du »

« système. Fidèle au rôle des plantes en tant que pourvoyeuses d'aliments et de fibres, fonctions d'importance sociétale fondamentale, l'agrosystème a été traditionnellement utilisé, traité et évalué d'un point de vue phytocentrique et édaphique en agriculture. Nous reconnaissons maintenant l'importance du sol non seulement en tant que " base de ressources " agricole (Stewart et al., 1991), mais en tant que système complexe, vivant et fragile qui doit être protégé (Reganolds et al., 1990) et géré pour lui-même (Pierre et Lai, 1991) pour garantir sa stabilité et sa productivité à long terme » (Traduction de la version originale).

Toutefois, l'agrosystème, également nommé agroécosystème dans certaines publications, peut aussi être abordé à une échelle plus large en intégrant les interactions entre des éléments qui ne relèvent pas uniquement que du fonctionnement écosystémique du milieu ou des relations entre la plante et le sol. Olmstead (1970) considère que les constituants du système sont l'organisation spatiale des sociétés, les productions végétales et animales, la gestion des ressources et du travail. Illbery (1985) va également dans ce sens en définissant l'agroécosystème comme suit :

« une unité fonctionnelle, produisant des produits agricoles et fournissant des services ruraux, qui comprend un ensemble d'éléments liés à l'agriculture et des interactions entre ces éléments. Par exemple, les terres agricoles, la main-d'œuvre, le capital et la gestion peuvent être identifiés comme les éléments d'entrée d'un agroécosystème au niveau de l'exploitation » (traduction de la version originale).

Smithers et Smit (1994) propose de caractériser chaque composant et d'étudier ensuite leurs relations. L'agrosystème est composé de trois dimensions, environnementale, économique et humaine, qui se matérialisent à différentes échelles. En 2001, Xu et Mage font une revue de littérature sur l'évaluation de la santé des agrosystèmes dans le cadre de la montée des recherches sur les services écosystémiques. De nombreuses études globales précisent que la santé des agroécosystèmes doit être examiné en s'intéressant aux conditions biophysiques, économiques et humaines du système. L'évaluation doit tenir compte de la structure, de la fonction, de l'organisation et de la dynamique du système, sans oublier sa stabilité et sa résilience qui sont rattachées à ses dimensions temporelles

Enfin, l'ensemble de ces éléments peuvent être abordés à différentes échelles. Ainsi, Conway (1985) exprime les dimensions spatiales des agroécosystèmes. Ils peuvent être définis de l'échelle de la parcelle jusqu'à l'échelle du globe. Ils s'imbriquent et sont en relation. Ainsi l'agroécosystème d'une parcelle ou d'une exploitation, est un sous-système de l'agroécosystème régional, lui-même sous-système de l'agroécosystème national ou mondial.

3.1.1.2. Définition de l'agrosystème proposé dans le cadre de la thèse

Dans le cadre de ce travail de thèse nous reprenons le concept d'agrosystème. Cependant on propose une lecture quelque peu différente de l'approche de Claude et de George Bertrand dont la systémique repose en grande partie sur l'écosystème. Les dimensions de l'agroécosystème et ses déclinaisons à différentes échelles spatiales présentées dans les études précédentes sont remobilisées, tout en tenant compte des éléments de contexte présentés dans les chapitres 1 et 2.

Pour rester dans la logique du géosystème qui se distingue du modèle écosystémique, on considère d'une part l'agrosystème sous l'angle de son fonctionnement physique en globalité. On rajoute le préfixe "bio" à physique, soit le terme *biophysique* de façon à intégrer la biosphère. L'atmosphère détermine les conditions météorologiques et climatique pour les productions agricoles. La lithosphère est le support de ces productions, il s'agit de la couverture pédologique mais également du substrat rocheux, qui d'ailleurs s'il est perméable contient un aquifère. L'hydrosphère fait référence aux cycles hydrologiques et de l'eau. En somme on considère bien ici que la plante, pour se développer, a besoin d'eau, d'énergie, de nutriments et d'un substrat sur lequel elle s'enracine.

Les sociétés humaines exploitent le milieu [initialement] naturel [qui devient tronqué] à des fins de productions agricoles. L'interaction entre les éléments associés à l'exploitation du milieu par l'homme avec les éléments biophysiques aboutit à un agrosystème. Sur un espace l'agrosystème se matérialise dans le modelé paysager. Cet espace est un territoire puisqu'il est approprié par les sociétés humaines et ce sont elles par l'intermédiaire du système de culture, fourrager ou d'élevage qui organisent cet agrosystème. Sur un espace, plusieurs agrosystèmes peuvent se succéder au cours du temps en fonction de l'évolution de l'agriculture, ce qui peut notamment être constaté lors des études diachroniques de l'espace agricole. Par conséquent, pour comprendre l'agrosystème, il convient d'approfondir ses dimensions sociétales et organisationnelles. Il s'agit des politiques agricoles, de l'économie, de l'aménagement du territoire, des perceptions et représentations de l'agriculteur, des choix de l'individu, de la façon dont les différents acteurs interagissent et s'influencent, ...

Finalement, cette conceptualisation de l'agro[eco]système revient à fusionner l'agrosystème (présenté surtout sous l'angle d'un écosystème artificialisé) et le sociosystème définis par Chapuis et Mille (2001) dans l'ouvrage *Systèmes et espaces agricoles dans le monde*.

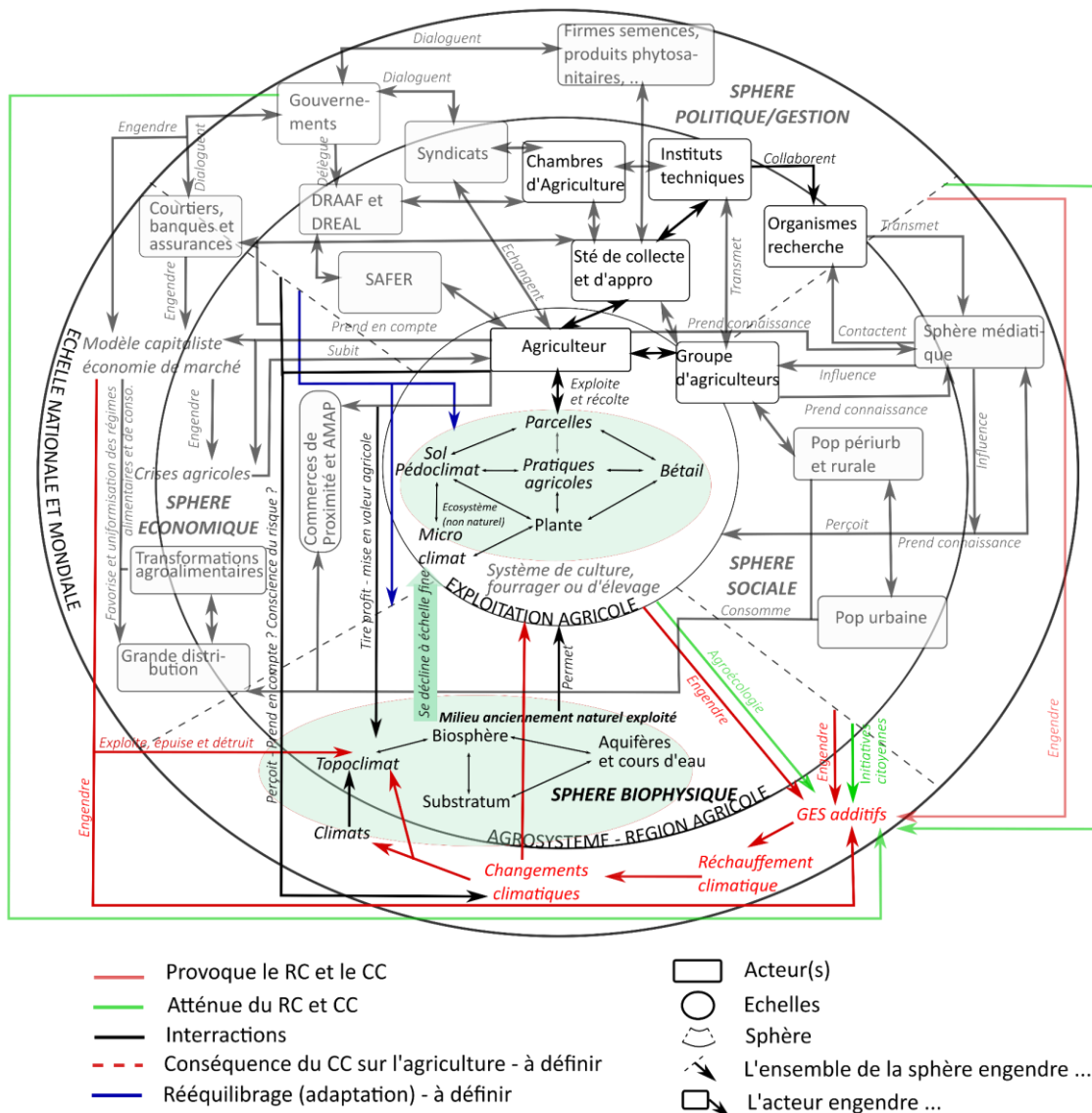
L'ensemble des interactions sont présentées dans le modèle conceptuel de l'agrosystème (**Figure 63**). De façon holistique on considère quatre sphères dont les éléments interagissent : la sphère biophysique, la sphère sociale, la sphère politique et de gestion (administrative) ainsi que la sphère économique. Elles se matérialisent à différentes échelles ce qui revient à considérer plusieurs niveaux d'agrosystèmes (de l'agrosystème mondial à l'exploitation agricole) rattachés à différentes unités spatiales et faisant référence à une agriculture relativement homogène. Il existe différents éléments de forçage qui, dans le cadre d'une hiérarchisation des facteurs n'ont pas tous la même incidence. Ainsi une restructuration des Chambres d'Agriculture et du conseil agricole engendre probablement des modifications de la gestion de l'agrosystème, mais on peut imaginer qu'elles seront moins profondes qu'une crise économique ou qu'un changement climatique nécessitant de revoir l'assolement, les pratiques agricoles et les débouchés.

Cette recherche traite des possibles déséquilibres que le changement climatique peut occasionner sur l'agrosystème céréalière de la Plaine de Caen, ce qui ouvre des perspectives sur son adaptation pour être résilient et imaginer l'agrosystème de demain. Et cela, tout en gardant à l'esprit que d'autres facteurs peuvent intervenir et modifier tout autant cet équilibre instable (politiques agricoles, économie, ...). Finalement, ce travail s'attache à l'étude d'un élément de forçage en considérant que les autres facteurs ne sont pas limitants.

Ce travail qui s'intéresse donc aux évolutions des conditions climatiques pour le végétal, et donc de son potentiel bioclimatique. Il s'inscrit donc également dans la continuité de la notion de « *potentiel climatique* » de Lamarre et Pagney (1999).

Malheureusement, pour réussir à étudier l'agrosystème dans tout son ensemble, plusieurs années de recherches seraient nécessaires, tout comme des collaborations avec des collègues aux compétences variées (agronomes, écophysiologistes, géographes, sociologues, économistes). Il serait alors prétentieux pour le géographe-climatologue de pouvoir à lui seul dresser l'étude d'un tel système complexe. Les éléments de l'agrosystème, étudiés dans cette thèse, relèvent des interactions qui se produisent au sein du potentiel de production (climat, plante, sol), relatif au milieu biophysique, lui-même en interaction avec les exploitants agricoles et les organismes de conseil (adaptation au climat, au sol, choix des variétés et des pratiques agricoles, maintien des débouchés, ... - sphère de gestion). Ces composants sont analysés dans le cadre du changement climatique, élément de forçage de l'agrosystème. Les dimensions économiques, politiques et sociales (à l'exception de l'enquête auprès des exploitants agricoles) ne sont donc pas étudiés. Toutefois, ce modèle conceptuel permet de tenir compte de ces éléments, considérer qu'ils peuvent jouer un rôle et modifier l'équilibre des agrosystèmes à plusieurs échelles. Ils ont notamment été présentés dans le chapitre 1 exposant les enjeux du blé à plusieurs niveaux scalaires.

Figure 63 : Modèle conceptuel de l'agrosystème sur lequel repose le projet de recherche



L'organigramme recense l'ensemble des éléments en interaction et considérés comme faisant partie intégrante de l'agrosystème. Les éléments représentés en opacité ne sont toutefois pas étudiés car ils dépassent les compétences du climatologue - géographe.

Réalisation : François Beauvais, 2017 - modifié en 2021

Pour comprendre la complexité du fonctionnement de l'espace agricole et les conséquences d'un élément de forçage (le changement climatique) sur ce dernier, une vision systémique, spatiale et temporelle s'impose. Cette vision, qui constitue l'angle d'approche du sujet d'étude ainsi que l'entrée principale pour l'aborder, est classique en géographie. Elle rend cette science légitime pour traiter la problématique du projet de recherche portant sur la relation climat/agriculture tout en restant dans des approches pluridisciplinaires. Ces éléments se retrouvent dans le concept de l'agrosystème.

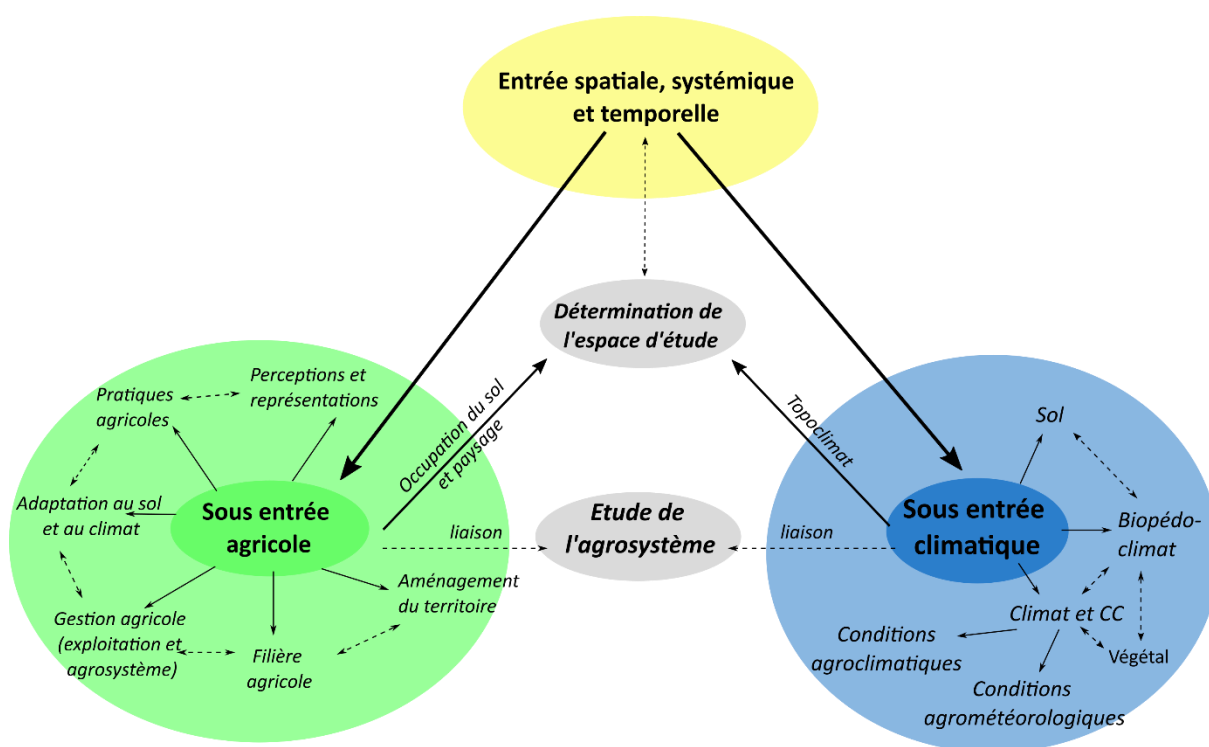
3.1.2. Entrées spatiales, systémique et temporelles déclinées en sous-entrées agricoles et climatiques

On considère ici que le géographe a une lecture spatiale, systémique et temporelle de l'espace (Figure 64). C'est-à-dire qu'en analysant un espace, il mobilise ces trois processus dans la lecture

du paysage. C'est l'entrée principale pour comprendre le sujet. Deux sous entrées interagissent, elles sont agricoles et climatiques, ce qui justifie la détermination de l'espace d'étude et la façon dont il est étudié.

La lecture de l'espace par le paysage, les cartes et la connaissance du terrain permet de dégager les grandes régions agricoles. On considère alors que l'espace est organisé par les sociétés et qu'elles se donnent à voir dans le paysage au travers de leurs activités et de la façon dont cet espace est aménagé (ce qui nous amène à le considérer comme un territoire). C'est par l'espace que l'on détermine que la Plaine de Caen est une région agricole céréalière puisque l'on constate les champs ouverts et qu'il s'agit d'une des zones où les densités de blé tendre y sont les plus importantes. C'est aussi en spatialisant les informations du milieu biophysique que l'on remarque le climat en présence (en fonction de sa position à la mer, de son exposition ou du relief), les types de sols, la topographie qui sont autant d'éléments qui agissent sur l'agriculture. Pour expliquer les processus le géographe use de la démarche systémique que l'on vient de présenter dans la sous-partie précédente. Derrière un espace on suppose les interactions entre plusieurs éléments, en l'occurrence entre le milieu naturel et les sociétés (géosystème) et plus particulièrement avec l'agriculture (l'agrosystème). Dans notre étude, nous avons le climat et un biopédoclimat, qui relié à l'agriculture (conditions pour la plante et les pratiques agricoles), nous amène aux notions de conditions agroclimatiques et agrométéorologiques. Et nous considérons également un espace agricole aménagé qui a pour support le milieu biophysique (le sol, la plante et l'atmosphère) et jouant un rôle sur les pratiques agricoles, les productions, la façon dont cet espace est aménagé et géré ou encore représenté, en considérant que d'autres éléments tels que les politiques agricoles, l'économie ou les interactions sociales sont également des facteurs explicatifs. Par ailleurs, l'approche multiscalaire et la systémique permettent également de mieux comprendre les enjeux qui caractérisent un espace. C'est le cas dans notre étude avec le blé et ses enjeux à différentes échelles, avec la Plaine de Caen directement connectée aux enjeux agricoles nationaux et mondiaux. Aussi, le changement climatique est un processus global qui se décline à différentes échelles. L'approche temporelle (diachronique) permet de lire l'évolution de l'espace et des sociétés. Elle est d'ailleurs centrale dans l'étude des changements climatiques, avec les évolutions mais également la variabilité interannuelle. C'est de cette façon que l'on peut constater l'évolution des aléas climatiques et les possibles changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol. Enfin lorsque les aspects temporels sont étudiés au futur, soit une démarche prospective, le géographe projette alors le devenir de cet espace et des sociétés qui l'occupent, notamment pour mieux appréhender les changements (et c'est que nous faisons dans cette recherche avec les projections climatiques).

Figure 64 : Entrées choisies pour l'étude de l'agrosystème et la détermination des terrains d'étude



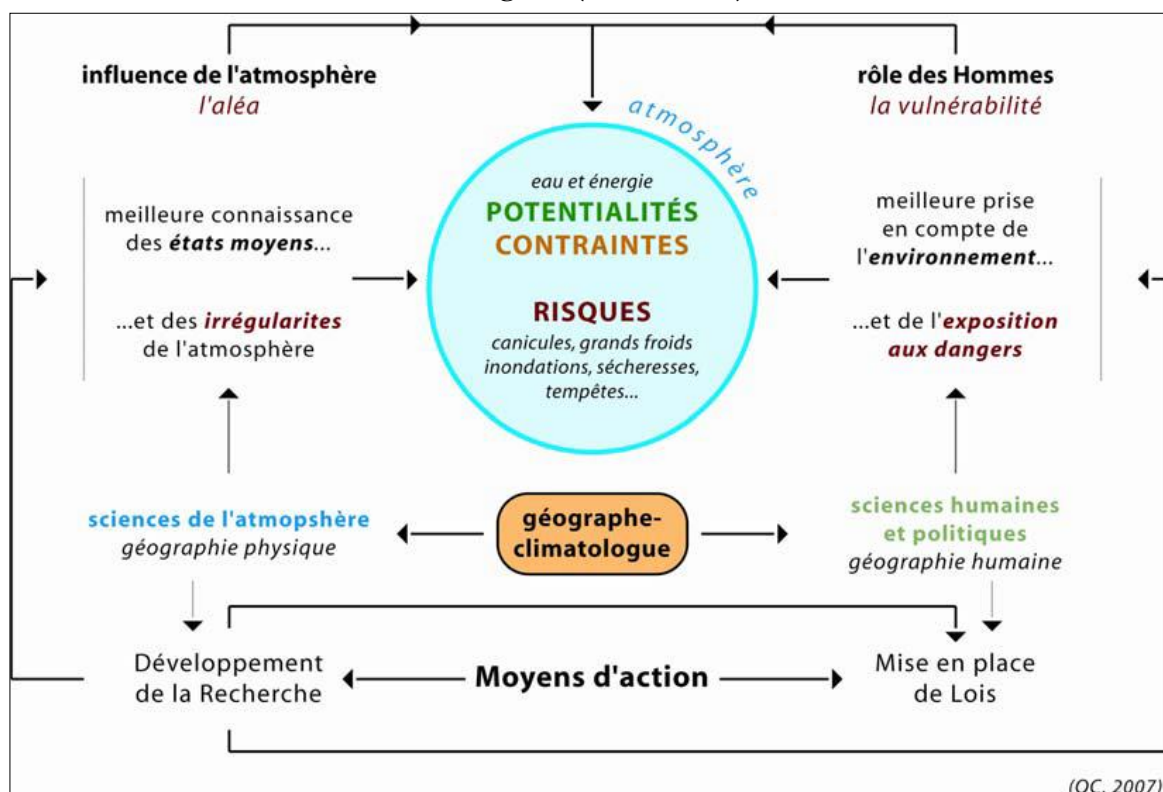
BEAUVAIS François, 2017

Cette thèse de climatologie s'inscrit dans la géographie appliquée au changement climatique (Lamarre, 2013). Publié récemment, l'ouvrage *Les impacts spatiaux du changement climatique* de Mercier (2021) démontre l'intérêt des recherches des géographes sur les changements climatiques, en raison notamment des approches systémiques et multiscalaires pour caractériser les impacts. Cela concerne la géographie dans son ensemble, qu'il en soit de la géomorphologie, la biogéographie, l'hydrologie ou de la géographie humaine et sociale puisque c'est l'ensemble de nos sociétés qui sont concernées par les changements climatiques et que les processus sont spatiaux. L'approche du géographe-climatologue est intéressante car il s'intéresse « à l'espace occupé et aménagé par l'homme, et bien évidemment les contraintes atmosphériques et climatiques jouent un rôle important dans l'aménagement » (Beltrando, 2000). De fait, l'étude des conséquences du changement climatique sur les sociétés, les territoires et les milieux entrent pleinement dans le champ de compétence des géographes-climatologues, sous la forme notamment d'études d'impacts à différentes échelles spatiales et temporelles, mobilisant des outils spécifiques à la discipline (instrumentations de terrain, système d'information géographiques, enquêtes de terrain, télédétection, etc.). On ajoutera d'ailleurs, que les modèles climatiques, même s'ils sont robustes, sont enclins à des incertitudes. Le géographe-climatologue ne se situe pas seulement en aval de la modélisation en tant qu'utilisateur de la donnée puisqu'il a « également besoin de produire ses propres données sur le terrain pour valider ses expériences » (Bonnardot et al., 2020).

Finalement, nous retenons pour ce travail de thèse l'approche épistémologique proposée par Cantat (2006), appliquée dans le cadre du changement climatique (**Figure 65**) :

« L'apport du géographe-climatologue peut dès lors s'envisager par un positionnement à l'interface des sciences de l'atmosphère et des sciences humaines, dans le croisement d'outils et de méthodes propres au domaine scientifique et de préoccupations pleinement ancrées dans les problèmes de société actuels et à venir, ce qui valorise l'interdisciplinarité » (Cantat, 2006 ;).

Figure 65 : « Organigramme des relations climat/sociétés. Les apports du géographe climatologue » (Cantat, 2006)



Par ailleurs, au sein de la climatologie des géographes, qui s'intéresse à divers domaines (îlot de chaleur urbain, agriculture, énergie, santé, tourisme, types de temps et de circulations, etc.), cette thèse est appliquée à la céréaliculture et au changement climatique. Par conséquent, au sein de la discipline, elle mobilise également des approches de géographie agricole. Mais elle s'ouvre également vers l'agronomie et l'écophysiologie puisque ces travaux traitent des relations climat/plante. Il s'agit donc ici d'une thèse en agro-climatologie, bien que le terme de bioclimatologie puisse également être retenu.

Enfin, cette recherche se structure autour du concept de l'agrosystème pour comprendre la complexité des espaces agricoles. Le sujet est abordé sous un angle géographique, c'est-à-dire par une entrée spatiale, temporelle et systémique. Analysant les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre, il s'agit là d'une recherche en agro-climatologie dans le cadre de la géographie appliquée au changement climatique.

3.2. Simulations bioclimatiques

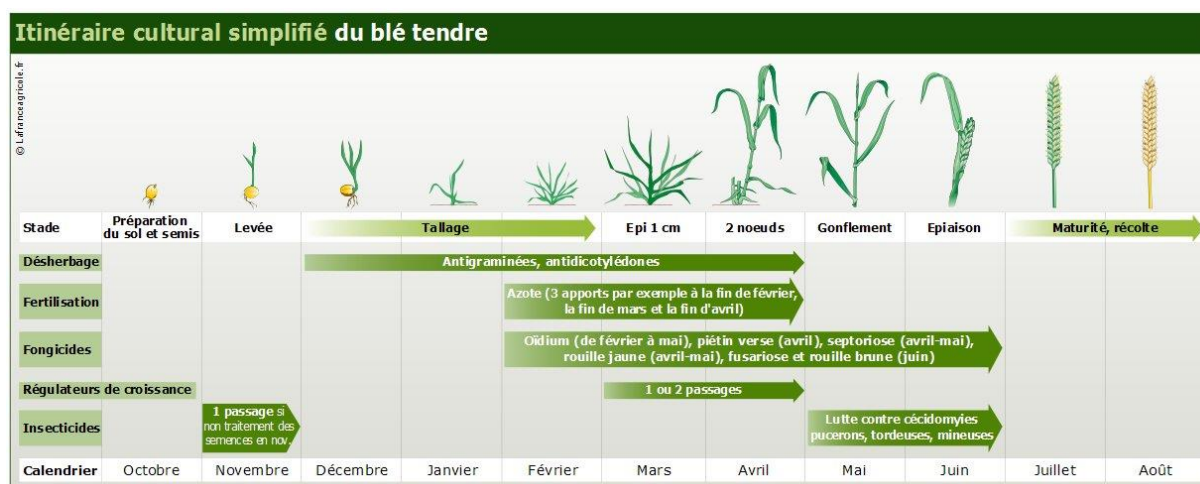
Etudier les conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréaliéris nécessitent une simulation des conditions climatiques vécues par la plante. Il s'agit d'une part de simuler sa phénologie et, par le jeu d'itérations, de vérifier l'occurrence de dépassement de seuils associés aux paramètres climatiques dont on sait qu'ils engendrent des impacts sur la plante. C'est à partir des résultats issus de cette modélisation bioclimatique que l'on peut ensuite estimer la vulnérabilité de l'agrosystème aux évolutions climatiques et envisager des stratégies d'adaptation.

3.2.1. Le cycle du blé tendre d'hiver et aléas climatiques impactant le rendement

En France, le blé tendre est semé en automne (**Figure 66**). Les semis les plus précoces débutent fin septembre/début octobre tandis que les plus tardifs s'effectuent en décembre. L'exploitant agricole détermine sa date de semis en fonction de plusieurs éléments (voir partie 2) : la variété, le précédent cultural, l'organisation des travaux agricoles et la stratégie d'évitement des stress climatiques. La germination a lieu deux à trois jours après le semis. La plantule présente dans la graine, perce le tégument de cette dernière. Le blé entre dans sa vie active. Les premières feuilles, imbriquées les unes dans les autres, apparaissent après 40 à 50 jours. Dès la fin du mois de décembre (dans le cas des premiers semis) des tiges émergent des gaines foliaires. C'est le tallage herbacé qui dure tout l'hiver. La montaison débute au début du printemps (mars et avril). Le stade épi 1 cm en constitue le principal repère. Le sommet de l'épi dans le maître brin (talle la plus développée) se situe 1 cm au-dessus du plateau de tallage (point d'insertion entre les racines et la talle). Environ deux semaines plus tard, deux nœuds sont visibles à la base de la tige principale, ce qui matérialise la montaison de l'épi (l'épi est entre 6 et 12 cm de la base du plateau de tallage) et l'élongation de cette tige. La dernière feuille apparaît à la fin du mois de mai et précède la méiose pollinique (division cellulaire). L'épiaison apparaît quelques jours plus tard et clôturera la montaison (l'épi sort de la gaine foliaire). Les glumelles de fleurs s'ouvrent au mois de juin et les sacs polliniques sortent hors de la fleur. C'est la floraison. On notera que le blé est une espèce autogame, c'est-à-dire qui s'autoféconde, où le pollen et l'ovule sont issus de la même fleur. Les enveloppes des grains se constituent puis leur remplissage débute. Au début, le contenu est principalement laiteux (liquide), puis pâteux. La maturité physiologique intervient lorsque le grain ne peut pas être coupé sans un scalpel. Ensuite, si ce grain se casse lorsque l'on tente de le couper, alors il est récoltable, à condition que son taux d'humidité ne dépasse pas 16 % (sans quoi la récolte n'est pas acceptée à la collecte). Elle s'effectue selon les régions et les variétés aux mois de juillet et août. En Normandie elles ont eu lieu ces dernières décennies lors de la première quinzaine du mois d'août mais tentent depuis quelques années à être avancées à la fin du mois de juillet en raison du changement climatique.

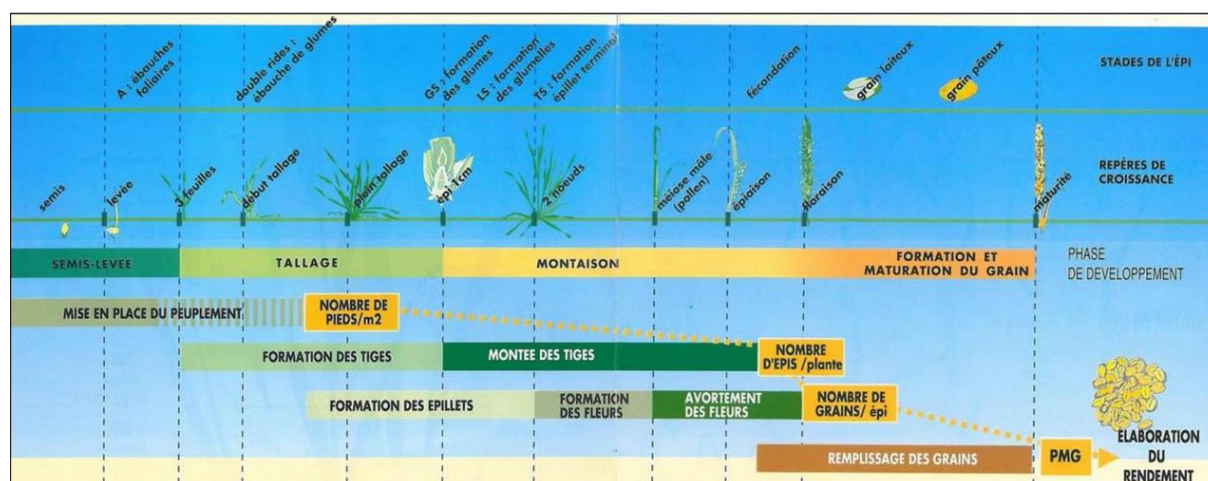
Au cours du cycle plusieurs passages peuvent être effectués en agriculture conventionnelle (qui concerne la majorité des exploitations françaises) dans la parcelle pour le désherbage, la fertilisation (azote, potasse et phosphore), les fongicides, les régulateurs de croissance et les insecticides.

Figure 66 : Les principaux stades phénologiques du blé tendre et son itinéraire technique (d'après La France Agricole)



Plusieurs évènements d'origine météo-climatique peuvent constituer des facteurs limitants au rendement (Gate, 1995). Jusqu'au développement des premières feuilles, ils engendrent une diminution du nombre de pieds/m². Au cours du tallage et de la montaison c'est le nombre de d'épis/plante puis le nombre de grains/épis qui limitent le rendement. Enfin pendant le remplissage des grains c'est le Poids de Mille Grains (PMG) qui est affecté (Figure 67).

Figure 67 : Schéma d'élaboration du rendement du blé tendre d'hiver en fonction des stades phénologiques (d'après Arvalis)



Ainsi, les aléas suivants, recensés dans l'ouvrage de Gate (1995 et 1996) peuvent perturber les composantes d'élaboration du rendement du semis à la récolte :

- **Gelées et basses températures**

Les températures inférieures ou égales à -5°C peuvent détruire le coléoptile et engendrer les disparitions de plantes pendant la phase semis – levée. Au cours du tallage les températures proches de 0°C permettent un durcissement au froid (capacité à résister ensuite aux fortes gelées) pendant

la vernalisation. Si le blé est endurci il peut résister jusqu'à -20°C . Dans le cas contraire des nécroses foliaires peuvent apparaître dès -10°C , les feuilles se déshydratent et se dessèchent. Les lésions des feuilles engendrent une mise à plat des plantes et peuvent favoriser l'action d'agents pathogènes. Le gel d'épis peut survenir au début de la montaison à partir de -4°C . Les gelées (0°C) pendant la floraison peuvent engendrer des problèmes de stérilité. Enfin, la méiose qui intervient à la fin du mois de mai ne doit pas rencontrer de basses températures (inférieures ou égales à 4°C) car elles peuvent provoquer un déficit de fécondation. Le froid perturbe la germination des grains de pollen et la croissance du tube pollinique (Gate, 1995 ; Deswarte, 2013)⁵⁶. Les conséquences du gel et des basses températures sur le blé tendre dans la parcelle sont imagées par la **Figure 68**.

⁵⁶ Terre-net Média, « Stress climatiques : les processus en jeu à la méiose et à la floraison », Deswarte J-C, le 13 mai 2013.

<https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/stress-climatiques-les-processus-en-jeu-a-la-meiose-et-a-la-floraison-217-89719.html#:~:text=L'actu%20d'Arvalis%2D,m%3%A9iose%20et%20%3%A0%20la%20floraison&text=Tout%20stress%20physiologique%20%3%A0,%3%A9pis%20se%20met%20en%20place.>

Figure 68 : Symptômes sur blé tendre des impacts du gel hivernal et des basses températures à la méiose

Gel hivernal

Dessèchement des feuilles



Plantes gelées



Feuilles brûlées



Rougisement des feuilles



Feuilles rouges



Feuille pincée



D'après le site internet d'Arvalis (fiches accidents)

Basses température à la méiose

Épillets blancs

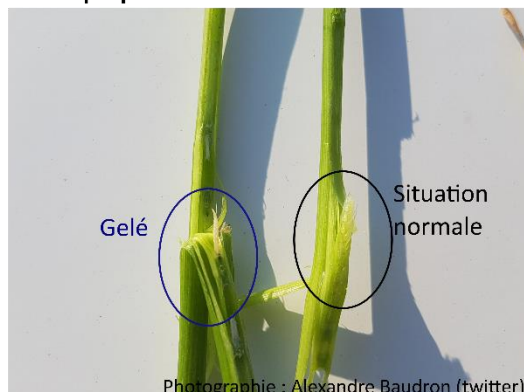


Comparaison épis stériles et fertiles



Gel montaison

Gel d'épis pendant la montaison



Gel d'épis pendant l'épiaison, la méiose et entre l'épiaison -floraison



Photographie : Alexandre Baudron (twitter)

Photographies : Arvalis (fiches accidents), CRA Bretagne et A.Baudron (étudiant ESA Angers)

- **Fortes températures et températures élevées**

D'après Tashiro et Wardlaw (1990), auteur d'expérimentations en conditions contrôlées sur trois jours consécutifs au début de la méiose, cette phase est sensible aux excès thermiques. A partir de 30°C, le nombre de grains par épis chute de 50 % et respectivement de 90 et 100 % à 35 et 40°C. Le seuil de 30°C explique également un taux de stérilité de 50 % lorsqu'il est franchi deux à trois jours avant l'anthèse. Les températures supérieures à 25°C (échaudage thermique) pendant la croissance de l'épi, soit de la méiose à la floraison peuvent conduire à l'avortement de fleurs et donc à une baisse du nombre de grains par épis. Pendant le remplissage des grains ces températures élevées pénalisent le PMG car le remplissage des grains s'interrompt (**Figure 69**). Au-delà de 28°C il peut même ne pas reprendre.

En hiver, les températures douces peuvent perturber la vernalisation du blé. Lors du tallage, le blé a besoin d'être exposé à de basses températures (entre 3 et 10°C⁵⁷) pour être vernalisé (Gate, 1995). La vernalisation lui confère l'aptitude à fleurir au printemps. Par ailleurs, le besoin en froid doit également être satisfait pour que la plante puisse entamer sa montaison (Thakur et al., 2010). Les variétés de type « très hivers » nécessitent environ 60 jours tandis que celles les plus « alternatives » n'ont besoin que de 15 jours. Par ailleurs, dans le cas de températures élevées, la durée des périodes phénologiques est réduite. La durée d'accumulation de biomasse est alors réduite (Fisher et Maurer, 1976 ; Holzkamper *et al.*, 2015). Lorsque la durée du remplissage est réduite, les rendements du blé baissent (Lv et al., 2013).

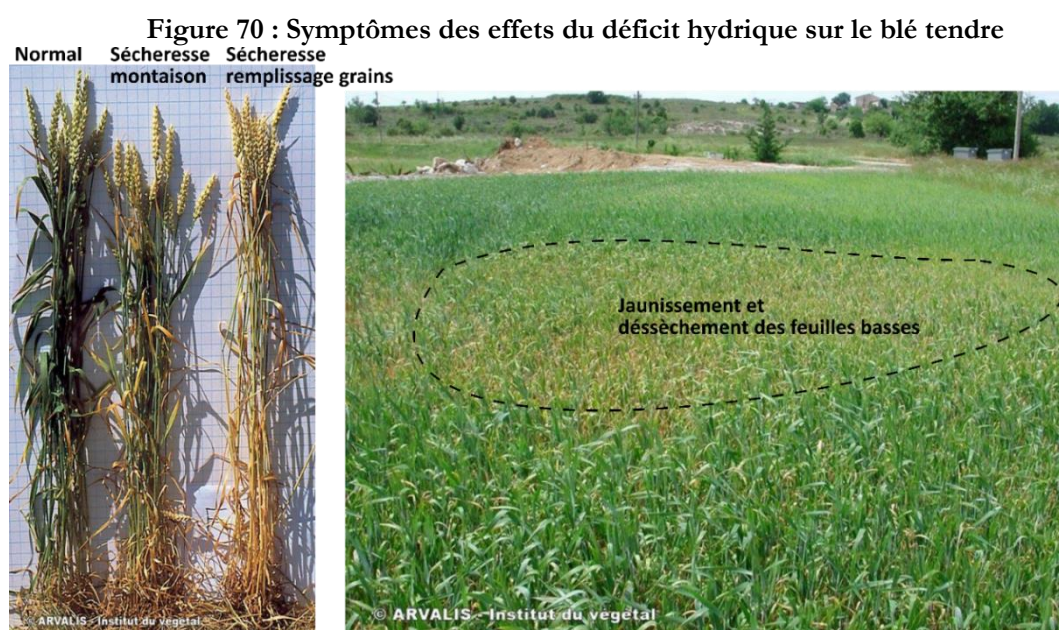
Figure 69 : Grains restreints en raison de l'échaudage thermique



⁵⁷ La vernalisation est ralentie en dehors de ses bornes et stoppée en dessous de -4°C et au-dessus de 17°C.

- **Manque d'eau**

Face au manque d'eau (**Figure 70**), la plante accroît sa pression osmotique. Elle cherche à augmenter sa force de succion pour absorber l'eau tout en régulant sa transpiration et referme ses stomates (baisse de la pression de turgescence). La photosynthèse est donc perturbée d'autant plus que l'indice foliaire diminue (en raison de la chute de la pression de turgescence limitant la croissance cellulaire). C'est également le cas de l'assimilation du CO₂ (perturbant de nouveau la photosynthèse). En augmentant sa force de succion le végétal détourne l'assimilation de nutriments destinés aux organes en croissance. Par ailleurs, compte-tenu du déficit de transpiration, la température des tissus des feuilles s'élève lors de l'exposition au soleil et réduit ainsi la durée des stades phénologiques (Gate, 1995 ; Deswarte, 2014⁵⁸). Les pertes de rendement augmentent de 1,5 à 2 q/ha à chaque fois que le déficit hydrique s'accroît de 10 mm (Gate, 1995) mais tout en considérant que le potentiel de rendement est affecté à partir de 40 mm cumulés entre le stade épi 1 cm et la maturité physiologique (Arvalis, 2017). Comme il est précisé dans l'ouvrage d'Arvalis (2017), un déficit hydrique cumulé de 50 mm et 100 mm pendant la montaison engendre respectivement des pertes allant de 7 à 10 q/ha et de 15 à 20 q/ha. S'il atteint 140 mm, le rendement est amputé de l'ordre de 30 q/ha⁵⁹. Outre le déficit hydrique, les conditions biopédoclimatiques peuvent être abordées avec le confort hydrique qui correspond au rapport ETR/ETM. C'est un indicateur de satisfaction en eau variant de 0 (stress hydrique exacerbé) à 1 (conditions optimales). L'ETR étant l'Evapotranspiration réelle et l'ETM l'évapotranspiration maximale de la plante. Si le confort hydrique est de 0,8 du semis à la floraison, l'anticipation de la floraison est de 3 jours. S'il est plus prononcé (0,5) elle est alors avancée de 8 jours. En revanche dans le cas d'un stress hydrique très prononcé, c'est l'inverse qui se produit puisque le développement sera prolongé. La vulnérabilité au déficit hydrique concerne tous les stades de développement. A titre d'exemple, un confort hydrique de 0,8 du stade épi 1 cm au stade 3 nœuds provoque une réduction du nombre d'épis/m² de l'ordre de 20 %. S'il est de 0,6 lors des 15 jours qui précèdent l'épiaison les pertes de



⁵⁸ Deswarte J-C, le 07 mai 2014, « Comprendre les mécanismes physiologiques mis en jeu chez une plante souffrant de la sécheresse », Arvalis. <https://www.arvalis-infos.fr/comprendre-les-mecanismes-physiologiques-mis-en-jeu-chez-une-plante-souffrant-de-la-secheresse-@/view-12517-arvarticle.html>

⁵⁹ D'après Arvalis-L'Institut du végétal la perte de rendement est de 2,5 à 3 q/ha pour 10 mm de déficit hydrique.

rendements peuvent être de 20 %. Lors du remplissage des grains les pertes peuvent être de 20 à 25 q dans le cas d'un rapport ETR/ETM de 0,55. L'effet est encore plus préjudiciable lorsque surviennent en même temps des jours d'échaudage thermique (Gate, 1995). Les symptômes du déficit hydrique se caractérisent par des blés raccourcis en taille et un jaunissement et dessèchement des feuilles.

Les effets conjugués de l'interaction température x déficit en eau sur le PMG (Poids de Mille Grains) peuvent être déterminés à l'aide de la régression linéaire multiple présentée dans l'ouvrage de Gate (1995). Elle est issue d'essais pluriannuels effectués dans le nord de la France pour la variété Arminda, en contexte de sols profonds et sans autres stress :

$$Y = 0,7560 X1 + 0,0474 X2 + 0,284$$

Avec :

Y = perte de poids de 1000 grains (g)

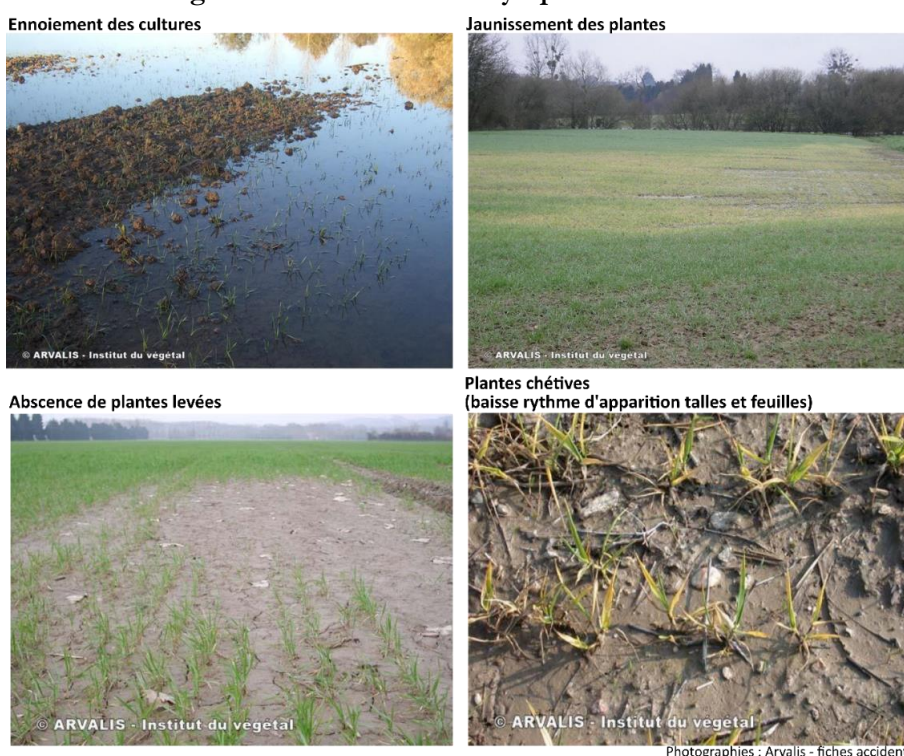
X1 = nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25 °C entre l'épiaison et la maturité physiologique

X2 = déficit hydrique cumulé entre l'épiaison et la maturité physiologique

- Les excès d'eau

Les excès d'eau à la surface du sol (**Figure 71**) engendrent une asphyxie (Bousquet, 1992) étant donné que l'eau remplace l'oxygène du sol. Ils perturbent également l'assimilation des minéraux (potassium pendant le tallage et azote durant la montaison) et sont préjudiciables du semis jusqu'à la fin de la montaison. Le développement du système racinaire est réduit. Il est rattrapable si l'excès d'eau a lieu pendant le tallage, mais c'est irréversible lorsqu'il survient pendant l'élongation de la tige. Par ailleurs, une mauvaise implantation du système racinaire entre la levée et le stade épi 1 cm peut aussi engendrer une verse de la tige alors moins bien maintenue (Gate, 1995).

Figure 71 : Excès d'eau et symptômes sur le blé tendre



- ***Le déficit de rayonnement solaire***

Le rayonnement est utile pour que la plante puisse réaliser sa photosynthèse. Le blé est une plante de type C3, peu exigeante en rayonnement comparativement à une plante de type C4 comme le maïs. En pleine croissance, l'assimilation du CO₂ par une feuille de blé sature à partir de 0,7 à 0,8 cal/cm²/min tandis que pour le maïs ce palier est 50 % plus élevé (Gate, 1995). A titre de comparaison, la quantité solaire à la limite supérieure de l'atmosphère est de 2 cal/cm²/min. Cependant, un déficit de rayonnement peut tout de même s'avérer pénalisant, notamment lors de certaines phases sensibles. Pendant la montaison, principalement de la mi-montaison à la floraison, un manque de rayonnement affecte la croissance de l'épi et peut réduire le nombre de grains/m². Il peut également engendrer une suralimentation azotée et donc une verse physiologique (Gate, 1995). Aussi, lorsque la température est élevée la durée du stade est plus courte, le rayonnement doit alors augmenter pour satisfaire les besoins de la plante. L'interaction rayonnement et température peut être appréciée à partir du quotient photothermique (rapport du rayonnement moyen sur la température moyenne de la période en cal/cm/°CJ ; Nix, 1976). Les besoins se situent principalement lors des 30 jours précédents la floraison (Fischer, 1985). Un défaut de rayonnement après la floraison reste toutefois également pénalisant pour le remplissage des grains (Arvalis, 2017). Un faible rayonnement pendant la période proche de la méiose, moment de détermination du nombre de fleurs fertiles, engendre une stérilité de fleurs et la croissance des épillets des zones apicales et basales de l'épi (Gate, 1995).

- ***Fortes pluies et vent violent***

La génétique et certaines techniques culturales peuvent prédisposer le blé tendre à la verse, favorisée par des conditions climatiques telles que les fortes pluies (orages) et le vent fort au cours du remplissage des grains (**Figure 72**).

Figure 72 : Verse du blé tendre (illustration Arvalis - L'Institut du Végétal)



- **Germination sur pieds**

Si de fortes températures surviennent à partir du stade grain laiteux-pâteux (phase d'expression) et qu'elles sont suivies par de basses températures (inférieures à 10 degrés) et une forte l'humidité (phase d'induction), alors les grains peuvent germer dans l'épi (Gate, 1995 ; **Figure 73**).

Figure 73 : Grain de blé tendre germé



Enfin, les maladies (piétin-verse, septoriose, fusariose de l'épi, rouille jaune, oïdium, etc.) et les ravageurs (puceron, taupins, aiguillonier des céréales, etc.) affectent également les composantes d'élaboration du rendement. Plusieurs facteurs agronomiques sont favorables à leur apparition (type de sol, travail du sol, dates et densité de semis, précédents culturaux et rotations, gestion de la fertilisation, choix variétal ...), au même titre que les conditions climatiques. Toutefois, cette thématique n'est pas intégrée au projet de thèse.

3.2.2. Présentation des approches agroclimatiques et phénoclimatiques

Les climatologues-géographes s'intéressant à l'agriculture, s'attachent à l'étude de potentiels agroclimatiques ou bioclimatiques (en les intégrant plus largement dans des problématiques sociétales et d'aménagement du territoire). C'est dans ce but que cette thèse mobilise des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques.

3.2.2.1. Les indicateurs agroclimatiques

Les simulations issues des modèles de culture ont un intérêt essentiel car elles permettent d'estimer des potentiels de rendements. Cependant, des recherches complémentaires dérivées des données météorologiques doivent être menées en parallèle puisque le climat influence le développement et la croissance de la plante et il convient donc de s'y intéresser en profondeur. Elles s'intéressent aux conditions vécues par la plante en mobilisant des indicateurs climatiques pour lesquels l'évolution ou le dépassement de seuil renvoie à des pertes de production. Plusieurs études agronomiques ont donc mobilisé des indicateurs agroclimatiques permettant d'après Caubel et al (2015) d'évaluer

pour un espace géographique la productivité, l'environnement et la gestion des cultures (Ramankutty et *al.*, 2002 ; Bootsma et *al.*, 2005 ; Patra et Sahu, 2007 ; Matthews et *al.*, 2008 ; Gate et *al.*, 2008 ; Dubrovsky et *al.*, 2009 ; Confalonieri et *al.*, 2010 ; Mkhabela et *al.*, 2010 ; Gouache et *al.*, 2012 ; Trnka et *al.*, 2011 et 2014) ou encore l'aptitude du territoire à l'agriculture (Hood et *al.*, 2006 ; Brown et *al.*, 2008 ; Tuan et *al.*, 2011 ; Holzkämper et *al.*, 2013).

Ces indicateurs sont étudiés sur les moments de l'année auxquels les phases sensibles aux aléas identifiés se déroulent (**Tableau 13**). Par exemple, les températures maximales supérieures à 25 °C affectent la formation et le remplissage des grains, soit à partir de la méiose pollinique. Ce stade apparaît au cours du mois de mai tandis que la maturité du blé intervient à la fin du mois de juillet. Par conséquent, l'indicateur Tx25 rattaché à l'échaudage thermique est considéré du 1^{er} mai au 31 juillet. Pour certains indicateurs une marge est retenue. C'est le cas par exemple des températures minimales inférieures à -4 °C, pouvant entraîner le gel d'épis en début de montaison. La montaison débutait au début du mois d'avril il y a quelques décennies. Néanmoins, l'élévation de la température a eu tendance à avancer ce stade au cours du milieu du mois de mars depuis une dizaine d'années. Dans le cas de cultivars précoces semés trop tôt, le stade épi 1 cm est parfois arrivé de façon très précoce dès le mois de février. Par conséquent l'indicateur Tn-4 est étudié du 1^{er} février au 31 avril.

Tableau 13 : Indicateurs agroclimatiques retenus et conséquences associées

Types d'impacts	Indicateurs étudiés	Période du calendrier considérée	Période phénologique correspondante (échelle BBCH)	Conséquences	Sources
Gelées et basses températures	Tn -5	01/12 - 31/01	Levée (0-10)	Disparition de plante	Gate, 1995
	Tn - 20	01/12 - 31/03	Début tallage à fin tallage (21-30)	Nécroses foliaires	Gate, 1995
	Tn -10		Début tallage à fin tallage (21-30)	Nécroses foliaires	Gate, 1995
	Tn -4	01/02 - 31/04	Epi 1 cm à 2 nœuds (30-32)	Gel d'épis	Gate, 1995
	Tn 4	01/05 - 31/05	Méiose (39)	Déficit de fécondation	Gate, 1995 ; Thakur et al., 2010
Fortes températures	Tx 25	01/05 - 31/07	Méiose à maturité (39-89)	Avortement de fleurs (méiose - floraison) Impact sur le remplissage des grains (dés épiaison) Photosynthèse affectée	Gate, 1995 Gate, 1995 Acevedo, 2002
	Tx 30	01/05 - 31/06	Méiose (39) et Floraison (65)	Déficit de fécondation	Saini et al., 1982 ; Tashiro et al., 1990
Manque d'eau	Déficit hydrique ; RUD	01/04 - 31/05	Totalité du cycle (0-92)	Réduction de l'activité synthétique et de l'assimilation du CO2	Gate, 1995
		01/06 - 31/07		Impact sur le remplissage des grains	Gate, 1995
Déficit de rayonnement	RG	01/04 - 31/05	Méiose J-6 à J+6 (39)	Déficit de fécondation	Gate, 1995
		01/06 - 31/07	Montaison : épi 1 cm - Floraison (30-65)	Impact sur la croissance	Fisher, 1985 ; Gate, 1995
			Floraison - Maturité (65-92)	Impact sur le remplissage des grains	Arvalis, 2017
Déficit de vernalisation	Déficit de T [3°C-10°C]	01/12 - 31/03	Tallage (21-30)	Déficit de floraison	Gate, 1995
				La montaison ne débute pas si le besoin en vernalisation n'est pas obtenu	Mosad et al., 1995
Fortes pluies	RR20	01/06 - 31/07	Floraison - Maturité (65-92)	Verse	Gate, 1995
Excès d'eau	Surplus hydrologiques	01/10 - 31/12	Semis - Floraison (0-65)	Asphyxie, mauvaise assimilation des minéraux	Bousquet, 1983 ; Gate, 1995
	Surplus hydrologiques ; RR ; RR1 ; Nb jours secs	01/12 - 31/03	Conditions pédoclimatiques pour les semis	Accès à la parcelle et semis après réessuyage des sols	Enquête
Somme de température base 0 °C	Durée en jours	01/11 - 31/07	Tout au long du cycle (0-92)	Réduction de l'accumulation de biomasse	Fisher et Maurer, 1976 ; Holzkämper et al., 2015

3.2.2.2. Les indicateurs phénoclimatiques

Les indicateurs agroclimatiques sont la plupart du temps utilisés en considérant des dates invariantes du calendrier. Cependant, certaines études ont montré l'intérêt de greffer ces indicateurs à la phénologie du végétal pour gagner en précision. Il est ainsi possible de tenir compte de la variabilité interannuelle du climat et de ses effets sur le cycle de la plante, notamment pour certaines périodes phénologiques sensibles (Gate, 1995 ; Gate et al., 2008 ; Gate et al., 2010 ; Mkhabela et al., 2010 ; Holzkämper et al., 2011 ; Gouache et al., 2012 ; Holzkämper et al., 2013 ; Trnka et al., 2014 ; Caubel et al., 2015 ; Caubel et al., 2017 ; Beauvais et al., 2019a ; Beauvais et al., 2019b ;

Beauvais et *al.*, 2020a ; Beauvais et *al.*, 2020b). Ils sont nommés indicateurs phénoclimatiques (Gate, 1995 ; Gate, 2008 ; Gate et *al.*, 2010) ou écoclimatiques (Caubel, 2015) :

« Des indicateurs « phénoclimatiques », c'est-à-dire des variables climatiques calculées sur des phases pertinentes du cycle et pour lesquelles des fonctions d'impact sont connues (Gate, 1995) » (Gate et al., 2010).

« Notre méthode est basée sur l'agrégation d'indicateurs écoclimatiques initialement développée par Holzkämper et al., (2013). Les indicateurs écoclimatiques sont des indicateurs agroclimatiques qui sont calculés à l'échelle du cycle de culture pour des périodes phénologiques pertinentes définies au préalable. Ils permettent de caractériser les effets du climat sur les processus écophysologiques des cultures (ex: croissance des cultures) Holzkämper et al., (2013), ou sur les jours disponibles pour mener des pratiques culturales (ex: récolte). Ces indicateurs peuvent fournir des informations sur la réponse des cultures au climat à travers des seuils écophysologiques ou agronomiques » (Caubel et al., 2015 ; traduction).

Ainsi, à titre d'exemple, l'indicateur agroclimatique de l'échaudage thermique considère l'occurrence de températures maximales supérieures ou égales à 25°C durant les mois de juin et de juillet, correspondant à la période de remplissage des grains. Cependant, dans la réalité le remplissage des grains ne débute pas de façon régulière le 1^{er} juin pour se terminer le 31 juillet. La durée de cette période phénologique varie selon les dates de semis, les variétés et les régions. Aussi, d'une année à une autre, les stades caractérisant le développement du végétal n'arrivent pas strictement à la même date, notamment en raison de la température. Les périodes de sensibilité à un aléa ne sont donc pas toujours identiques selon les années. Lorsque la température est plus élevée que la normale, les stades sont avancés. A contrario si elle est inférieure, alors le développement de la plante est retardé. Dans le cas du changement climatique, une avancée de la phénologie est constatée. Par conséquent, le recours aux indicateurs agroclimatiques engendre un biais dans le calcul de l'occurrence des aléas puisque les stades n'apparaissent plus à la même période.

Les indicateurs phénoclimatique ou écoclimatiques permettent donc de caractériser l'effet du climat sur les processus écophysologiques de la plante (Holzkämper et *al.*, 2013 ; Caubel, et *al.*, 2015). Les conséquences associées à leur évolution ou au dépassement de seuils peuvent engendrer des pertes de production parfois importantes au cours du cycle. Les indicateurs retenus sont relatifs aux aléas présentés dans la sous partie précédente. Les conséquences associées à leur évolution ou au dépassement de seuils peuvent donc engendrer des pertes de production parfois importantes au cours du cycle (**Tableau 14**).

Par ailleurs, cette approche permet également de tenir compte de la modification des dates des pratiques culturales (récoltes, apports de fertilisants à des stades précis, ...).

Tableau 14 : Synthèse des indicateurs phénoclimatiques étudiés associés à des pertes de productions

Types d'impacts	Indicateurs étudiés	Période phénologique échelle BBCH	Conséquences	Sources
Gelées et basses températures	Tn -5	Levée (0-10)	Disparition de plante	Gate, 1995
	Tn - 20	Début tallage à fin tallage (21-30)	Nécroses foliaires	Gate, 1995
	Tn -10	Début tallage à fin tallage (21-30)	Nécroses foliaires	Gate, 1995
	Tn -4	Epi 1 cm à 2 nœuds (30-32)	Gel d'épis	Gate, 1995
	Tn 4	Méiose J-6 à J+6 (39)	Déficit de fécondation	Gate, 1995 ; Thakur et al., 2010
Fortes températures	Tx 25	Méiose à maturité (39-89)	Avortement de fleurs (méiose - floraison)	Gate, 1995
	Tx 30	Méiose J-6 à J+6 (39); Floraison J-3 à J-1 (65)	Impact sur le remplissage des grains (dés épiaison) Photosynthèse affectée Déficit de fécondation	Gate, 1995 Acevedo, 2002 Saini et al., 1982 ; Tashiro et al., 1990
Manque d'eau	Déficit hydrique et confort hydrique	Totalité du cycle (0-92)	Réduction de l'activité synthétique et de l'assimilation du CO2	Gate, 1995
			Impact sur le remplissage des grains	Gate, 1995
Déficit de rayonnement	RG200	Méiose J-6 à J+6 (39)	Déficit de fécondation	Gate, 1995
	QPT et RG	Montaison : épi 1 cm - Floraison (30-65)	Impact sur la croissance	Fisher, 1985 ; Gate, 1995
		Floraison - Maturité (65-92)	Impact sur le remplissage des grains	Arvalis, 2017
Déficit de vernalisation	Déficit de T [3°C-10°C]	Tallage (21-30)	Déficit de floraison	Gate, 1995
			La montaison ne débute pas si le besoin en vernalisation n'est pas obtenu	Mosad et al., 1995
Fortes pluies	RR20	Floraison - Maturité (65-92)	Verse	Gate, 1995
Excès d'eau	Surplus hydrologique	Semis - Floraison (0-65)	Asphyxie, mauvaise assimilation des minéraux	Bousquet, 1983 ; Gate, 1995
Réduction de la durée du cycle	Durée en jours	Tout au long du cycle (0-92)	Réduction de l'accumulation de biomasse	Fisher et Maurer, 1976 ; Holzkamper et al., 2015
		Floraison - Maturité (65-92)	Impact sur le remplissage des grains	Semenov et al., 2014

Contrairement aux indicateurs agroclimatiques, le recours aux indicateurs phénoclimatiques nécessite de simuler la phénologie de la plante. Celle-ci est calculée à partir du concept de degré-jour depuis la date de semis. Cette méthode est couramment utilisée en agronomie pour estimer les dates d'apparition des stades phénologiques et leur durée (Bonhomme, 2000). La somme de température pour le blé s'effectue en base 0°C, écrêtée à 28°C. Cela signifie que les températures négatives comptent pour nulles et celles supérieures à 28°C sont considérées à hauteur de ce seuil (Durand, 1969). Le changement de période phénologique s'effectue lorsque la durée thermique nécessaire à l'apparition de la nouvelle phase du cycle est atteinte. Les besoins en chaleur sont variables selon les variétés comme en témoignent les degrés-jours présentés par Gate (1995 ; **Tableau 15**). Ils sont moins importants pour les variétés précoces que pour les tardives (**Tableau 16**). Ces gammes de valeurs correspondent également à celles présentées par et Arvalis (2003 et 2017).

Tableau 15 : Sommes de températures relatives à la phénologie du blé tendre en France

Stade phénologique	Echelle BBCH (Witzenberger et al., 1989 ; Lancashire et al., 1991)	Somme de température (Gate, 1995)
Levée	0	150°CJ depuis le semis
Début tallage	10	300°CJ depuis le semis
Plein tallage	21	550 à 650°CJ depuis le semis
Epi 1 cm	30	650 à 1250°CJ selon les variétés, les dates de semis et le besoin en vernalisation
1-2 nœuds	32	250°CJ depuis le stade épi 1 cm
Méiose pollinique	-	300°C (semis tardifs) à 400/450°CJ (semis très précoce) selon les variétés depuis le stade ébauche de glumelles ou 80 à 220°CJ avant l'épiaison
Epiaison	55	1200 à 1900°CJ depuis le semis pour le stade épiaison selon les variétés, les dates de semis et le besoin en vernalisation
Floraison	65	145°CJ depuis l'épiaison
Grain laiteux	73	430°CJ après l'épiaison
Grain pâteux	83	720 à 750°CJ après l'épiaison
Maturité	89	750 à 800°CJ après l'épiaison

Des notes de précocité des variétés sont renseignées par les semenciers et permettent à l'exploitant de les choisir en fonction des dates de semis et de l'évitement de certains stress climatiques. Par exemple, dans une région au risque de gel en fin d'hiver, il conviendra de choisir une variété tardive (note d'épiaison de 0 à 2). Pour éviter l'échaudage thermique et le déficit hydrique, l'agriculteur peut s'informer sur la note de précocité à l'épiaison et retenir par exemple une variété dont la note est supérieure à 6.

Tableau 16 : Notes de précocité attribuées aux variétés de blé tendre à la montaison et à l'épiaison (d'après Arvalis-L'Institut du Végétal)

Précocité à montaison		Précocité à épiaison		
Note	Légende	Note	Légende	Ecart moyen (jours) par rapport à une variété 1/2 précoce
0	Très tardif	4.5	Très tardif	10
1	Tardif	5	Tardif	+7.5
2	1/2 Tardif	5.5	1/2 Tardif	5
3	1/2 Précoce	6	1/2 Tardif à 1/2 Précoce	+2.5
4	Précoce	6.5	1/2 Précoce	0
5	Très précoce	7	Précoce	-2.5
6	Ultra précoce	7.5	Très précoce	-5
		8	Ultra précoce	-7.5

Outre le cumul de température le blé nécessite au préalable une exposition au froid (températures entre 3 et 10°C) pour débiter sa montaison et acquérir sa capacité à fleurir au printemps. D'après Arvalis⁶⁰ ce processus intervient au cours du tallage mais LG Semences⁶¹ indique qu'il débute dès le stade 1 feuille. En lien avec l'approche experte du technicien de la Coopérative de Creully, nous considérons la vernalisation dès la levée (qui précède de quelques jours la première feuille). Le besoin en vernalisation de la variété s'exprime par sa note d'alternativité allant de 1 à 8 (Tableau 17). Les plus hivernales ont besoin de 60 jours (note de 1) tandis que les variétés de printemps nécessitent seulement 10 jours. En France, les besoins sont généralement satisfaits même dans le cas de semis tardifs allant jusqu'au mois de novembre. En revanche, au-delà, une variété alternative sera nécessaire.

Tableau 17 : Note d'alternativité des variétés de blé tendre et exigence en vernalisation associée (d'après LG Semences)

Note	Alternativité	Durée de vernalisation
1	Très hiver	60 j
2	Hiver	50 j
3	Hiver à 1/2 hiver	45 j
4	1/2 hiver	40 j
5	1/2 hiver à 1/2 alternatif	32 j
6	1/2 alternatif	25 j
7	alternatif	15 j
8	alternatif à printemps	10 j

Certaines variétés de blé nécessitent des jours longs pour que la montaison de l'épi s'initie. Les journées courtes freinent le développement de la plante photosensible. D'après AgrosParisTech

⁶⁰ <https://www.arvalis-infos.fr/la-vernalisation-un-passage-oblige-pour-fleurir-@/view-17789-arvarticle.html>

⁶¹ <https://www.lgseeds.fr/fr/gel-epis-cereales#:~:text=La%20vernalisation%20se%20fait%20pendant,ou%20exc%C3%A8dent%2017%C2%B0C.>

(2003) la photopériode pour le stade épi 1 cm est de 11 heures (ce qui correspond au début du mois de mars à la latitude de Caen $\approx 49^\circ$ N). Cet élément est confirmé par un conseiller agricole de la Chambre d'Agriculture lors de la réunion du GNAC de la Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie le 24 septembre 2018, précisant que dans la région, le blé ne peut démarrer sa montaison avant la sortie de l'hiver météorologique. Oury et al (2013) précisent également que le blé a besoin de jours longs en sortie d'hiver pour permettre la transition de l'état végétatif vers l'état reproducteur de l'apex de la plante. Toutefois, certains exploitants agricoles et conseillers constatent que le stade épi 1 cm peut arriver dès le mois de février dans le cas de variétés précoces. Cet élément est confirmé dans les travaux d'Arvalis l'Institut du Végétal⁶², précisant que les cultivars dont la note de précocité épiaison supérieure à 6,5 sont insensibles à la photopériode.

L'apparition des stades phénologiques dans le calendrier sont donc fonction des conditions météorologiques, de la date de semis et des propriétés intrinsèques des variétés. Elles répondent d'abord à un besoin en température ainsi qu'à deux autres facteurs : les exigences en vernalisation et en photopériode, qui s'expriment notamment pour la montaison. Autrement dit, si le besoin en température est satisfait, mais que les jours sont courts ou que le blé n'a pas été assez exposé aux basses températures, alors la plante reste au repos jusqu'à temps que ces critères soient satisfaits, sans quoi elle restera à l'état végétatif.

Les exigences en température, vernalisation et photopériode sont donc nécessaires pour modéliser la phénologie de la plante. Cependant ces informations sous forme de notes de précocité ne sont pas traduites en °CJ ou en durée du jour et ne sont pas disponibles sur les sites et publications des catalogues variétaux⁶³.

Pour réaliser les simulations bioclimatiques, plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour retrouver les sommes de température :

- Utiliser les sommes de température énoncées par Gate (1995) pour créer des idéotypes virtuels ;
- Retenir les stades phénologiques présentées par Arvalis (2003 et 2017) pour la partie nord de la France, puis calculer les sommes de température depuis le semis à partir des données de la station météo de référence pour le site d'étude ;
- Retenir les dates des stades relevées dans les BSV (Bulletin Santé Végétaux) ou sur les rapports Céré'Obs de FranceAgrimer pour la Normandie, puis calculer les sommes de température depuis le semis à partir des données de la station météo de référence pour le site d'étude ;
- Demander aux conseillers et agriculteurs de la Plaine de Caen d'estimer les dates des principaux stades sur une période de référence, puis calculer ensuite les sommes de température depuis le semis à partir des données de la station météo de référence pour le site d'étude ;
- Suivre la phénologie d'une parcelle de blé du semis à la récolte en relevant les dates de réalisation des stades, puis en calculant les sommes de températures à partir des données enregistrées *in situ* par une station météorologique expérimentale.

⁶²<https://www.arvalis-infos.fr/la-precocite-varietale-sous-le-joug-de-mecanismes-complexes-@/view-17996-arvarticle.html>

⁶³ Arvalis-l'Institut du Végétal a été contacté dans le but d'une collaboration mais aucune réponse n'a été obtenue.

La dernière solution est la plus précise et c'est celle que nous avons retenue dans le cadre de cette recherche. Les simulations s'appuient donc sur les relevés au champ durant le cycle 2018-2019 (voir partie 3.4). Les sommes de températures calculées (**Tableau 18**) correspondent aux ordres de grandeurs donnés dans la bibliographie (Gate, 1995, 2003 ; Arvalis, 2017). Il s'agit d'un mélange des variétés Boregar, Lyrik, Chevignon et Libravo constitué par Eric Lemarinier, exploitant agricole à Anguerny. Les mélanges variétaux représentent 13,6 % des surfaces de blé tendre en Normandie et arrivent en tête de l'enquête sur la répartition des variétés 2019 (**Tableau 19**). Le semis ayant eu lieu le 15 novembre, cette date est retenue pour les simulations. Ce mélange variétal requiert 45 jours de vernalisation compte tenu de la note d'alternativité (3 pour Boregar, Lyrik et Chevignon ; 2 pour Libravo) et sa note de précocité de 6 la considère comme photosensible (**Tableau 20**).

Tableau 18 : Sommes de températures relatives aux stades phénologiques relevés au champ à Anguerny pour le mélange variétal semé le 15 novembre 2018

Stade phénologique	Echelle BBCH (Witzenberger et al., 1989 ; Lancashire et al., 1991)	Date d'observation	Somme de température
Levée	0	04/12/2018	150
Début tallage	10	23/12/2018	300
Epi 1 cm	30	29/03/2019	990
2 nœuds	32	15/04/2019	1124
Méiose pollinique	-	15/05/2019	1450
Epiaison	55	22/05/2019	1537
Floraison	65	01/06/2019	1684
Stade laiteux	73	24/06/2019	2030
Stade pâteux	83	02/07/2019	2180
Maturité physiologique	89	20/07/2019	2500
Maturité Récolte	92	02/08/2019	2770

Tableau 19 : Les 10 premières variétés de blé tendre semées en Normandie en 2019 (Données France-AgriMer)

Variété	Surface estimée par variété (ha)	Part de la surface en %	Précocité montaison	Précocité épiaison	Alternativité
MELANGE VARIETES BLE TENDRE	58306	13,6	Nr	Nr	Nr
CHEVIGNON	52297	12,2	2	6	3
BOREGAR	33286	7,76	1	6	3
CHEVRON	25971	6,06	3	6	2
RGT SACRAMENTO	24605	5,74	3	6,5	4
RUBISKO	19061	4,45	3	6,5	3
FRUCTIDOR	18141	4,23	3	6	2
LG ABSALON	14629	3,41	3	6,5	3
CREEK	13343	3,11	4	6	6
COMPLICE	12482	2,91	2	7	3

**Tableau 20 : Caractéristiques des variétés expérimentées
(D'après les fiches variétés d'Arvalis-L'Institut du Végétal)**

Caractéristiques variétales	Boregar	Lyrik	Chevignon	Libravo
Représentant	RAGT	Agri obtention	Saaten Union	RAGT
Année d'inscription	2008	2012	2017	2016
Alternativité	3 (hiver à ½ hiver)	3 (hiver à ½ hiver)	3 (hiver à ½ hiver)	2 (hiver)
Précocité montaison	1 (tardif)	2 (assez-tardif)	2 (assez-tardif)	1 (tardif)
Précocité épiaison	6 (1/2 tardif à 1/2 préc.)	6 (1/2 tardif à 1/2 préc.)	6 (1/2 tardif à 1/2 préc.)	5 (tardif)

3.2.3. Le bilan hydrique

Certains indicateurs ne dépendent pas uniquement de la composante atmosphérique. Pour déterminer le déficit hydrique, le confort hydrique ou encore les excès d'eau en surface dans la parcelle, le rôle du sol doit être pris en considération. C'est pourquoi cette modélisation s'appuie sur un bilan hydrique.

3.2.3.1. Capacité de rétention en eau des sols : quelques définitions

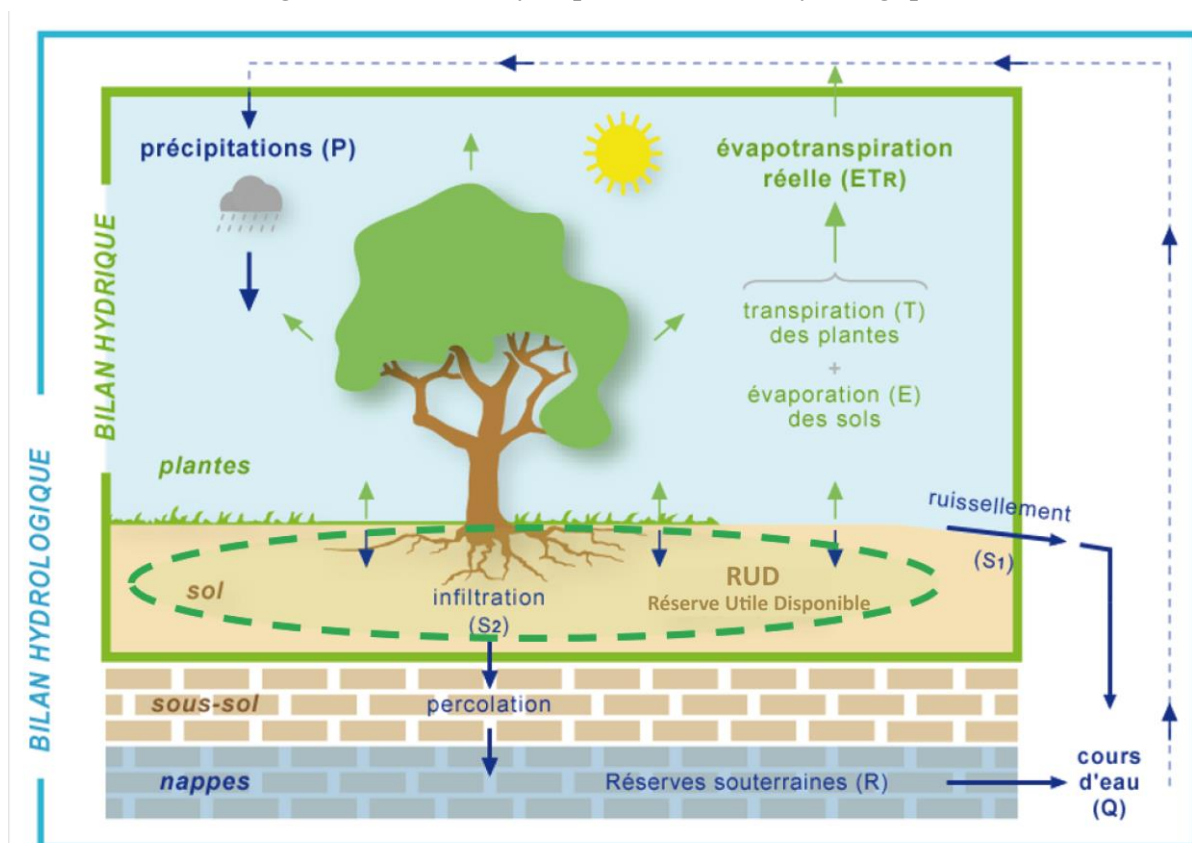
Les sols sont composés d'eau, d'air, d'organismes vivants, de matières organiques et d'éléments minéraux. Ces caractéristiques confèrent aux sols une fonction de production de biomasse pleinement exploitée par l'agriculture. La définition du sol est présentée dans l'Annexe 5. Le climatologue s'intéresse surtout à la capacité de rétention en eau utilisable du sol, variable essentielle (Cantat et al., 2009) puisqu'elle permet pour un temps de compenser le déficit pluvial (Cantat et al., 2010).

Sur l'ensemble de la profondeur du sol, un volume d'eau est retenu contre les forces de gravité. Ce volume total d'eau d'un horizon ou d'un sol est appelé Capacité de stockage pour l'eau (CSE). Cependant, tout ce volume d'eau n'est pas mobilisable pour la plante. La réserve en eau qu'elle peut mobiliser via ses racines (Veihmeyer et Hendrickson, 1927) est appelée RUM (Réservoir Utilisable Maximal ; Baize et Jabiol, 2011), compris entre la capacité au champ (réservoir au maximum) et le point de flétrissement permanent en dessous duquel l'eau capillaire n'est pas mobilisable pour le végétal en raison des forces de succion des racines insuffisantes (Silva et al., 2014). Le RUM se distingue de la réserve utilisable disponible (RUD ; Baize et Jabiol, 2011) qui varie dans le temps en fonction des conditions atmosphériques et du stade de la plante. Par conséquent, pour ne pas confondre ces deux concepts, Baize et Jabiol (2011) proposent d'abandonner le terme de Réserve Utile (RU).

3.2.3.2. Définition du bilan hydrique

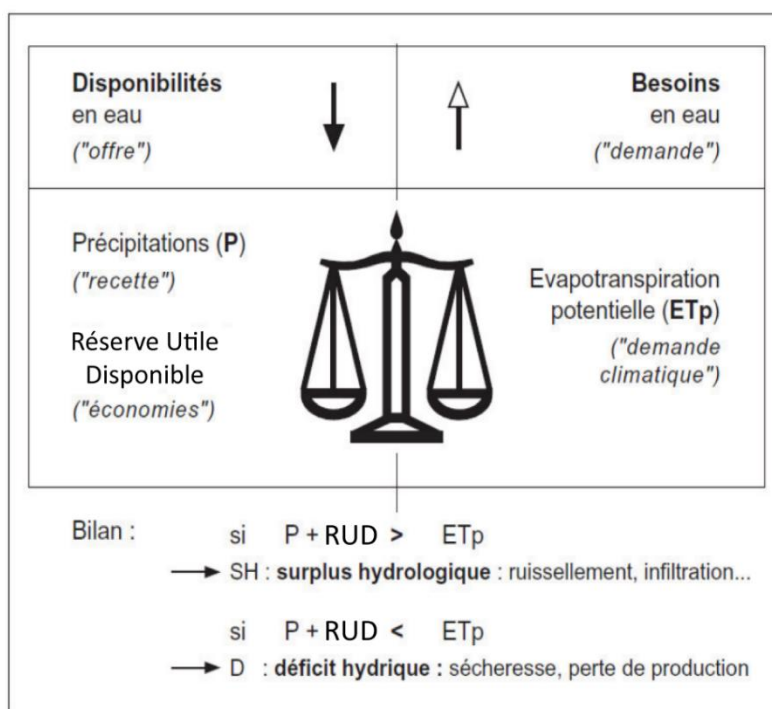
Le manque d'eau pour le végétal est estimé à partir d'un bilan hydrique, technique d'analyse qui colle au plus près des conditions biopédoclimatiques puisqu'il intègre les relations entre l'atmosphère, la plante et le sol (Cantat et *al*, 2009). Il permet de déterminer l'évolution de la RUD du sol et par conséquent d'évaluer le déficit hydrique, soit le manque d'eau pour la plante, ainsi que le confort hydrique associé. Le bilan hydrique comprend plusieurs variables d'entrée. Les précipitations constituent l'offre climatique et participent au remplissage du réservoir (**Figure 74 et 75**). L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à « la quantité d'eau que cède à l'atmosphère, par transpiration de la plante et évaporation du sol, une végétation abondante, en pleine croissance, couvrant un sol largement alimenté d'eau » (Amat, 2008). L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau qui s'est réellement évapotranspirée et se limite à l'eau disponible. Il y a déficit hydrique lorsque l'ETR est inférieure à l'ETP. Les besoins en eau sont satisfaits lorsque l'ETR est égale à l'ETP. Finalement, l'ETP dépend directement du climat tandis que l'ETR est fonction du climat et de l'eau dans le sol (Mounier, 1965 ; Dubreuil, 1994).

Figure 74 : Le bilan hydrique dans le bilan hydrologique



Réalisation : Olivier Cantat., 2012 (modifié)

Figure 75 : « Les deux « plateaux » de la balance hydrique : un équilibre entre les disponibilités et les besoins en eau des plantes, régulé par la réserve agricole utile » (Cantat et al., 2009)



Réalisation : Olivier Cantat., 2009 (modifié)

Des formules empiriques permettent de calculer l'ETP. La formule de Penman-Monteith (1965) est la plus précise car elle évalue le bilan énergétique de la surface évaporante (Amat, 2008). Elle est recommandée par la FAO (Allen et al., 1998). La formule utilisée par Météo-France a été vérifiée sur le site de Courcy et s'écrit de la façon suivante (Ducharne, 2002 in Lamy, 2013) :

$$ETP_{\text{Penman MF}} = ETP_1 + ETP_2$$

$$ETP_1 = \frac{\Delta Rn}{\Delta + \gamma \lambda}$$

$$ETP_2 = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{0,26 (1 + 0,4 U_{10})(e_s - e_a)}{\tau}$$

Avec :

ETP_{MF} = Evapotranspiration Potentielle [mm s^{-1}]

Rn = rayonnement net en surface [W m^{-2}]

T = température moyenne de l'air à 2 m [K]

U_{10} = vitesse du vent à 10 m [m s^{-1}]

e_s = pression de vapeur d'eau à saturation [hPa] donnée à partir de la température par la relation Clausius-Clapeyron

e_a = pression de vapeur d'eau à 2 m [hPa]

Δ = pente de la relation Clausius-Clapeyron [Pa K^{-1}], obtenue en dérivant cette relation

γ = constante psychrométrique [Pa K^{-1}], posée à $\gamma = 65 [\text{Pa K}^{-1}]$

γ = chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2,45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$)

τ = constante de temps ($\tau = 86400 \text{ s}$)

L'ETP Penman est utilisée pour la période passée lorsqu'elle fait partie des paramètres disponibles des stations mobilisées. Pour les projections climatiques, tous les paramètres nécessaires au calcul de cette formule n'étant pas présents en sortie du modèle climatique régional ALADIN-Climat, l'évapotranspiration potentielle est obtenue à l'aide de la formule de Turc (1961) pour laquelle la température et le rayonnement sont nécessaires. En réalité deux formules sont mobilisées. La première correspond aux jours où l'humidité relative de l'air est inférieure à 50 % tandis que la seconde correspond au cas inverse.

$$ETP_{Turc1} = (I_g + 50) \left(0,013 n \frac{T}{T+15}\right) \left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right)$$

$$ETP_{Turc2} = 0,4 \frac{T}{T+15} (I_g + 50) \left(1 + \frac{50-Hr}{70}\right)$$

Avec :

T la température moyenne de l'air à 2 m [K]

I_g le rayonnement solaire [cal/cm²/j]

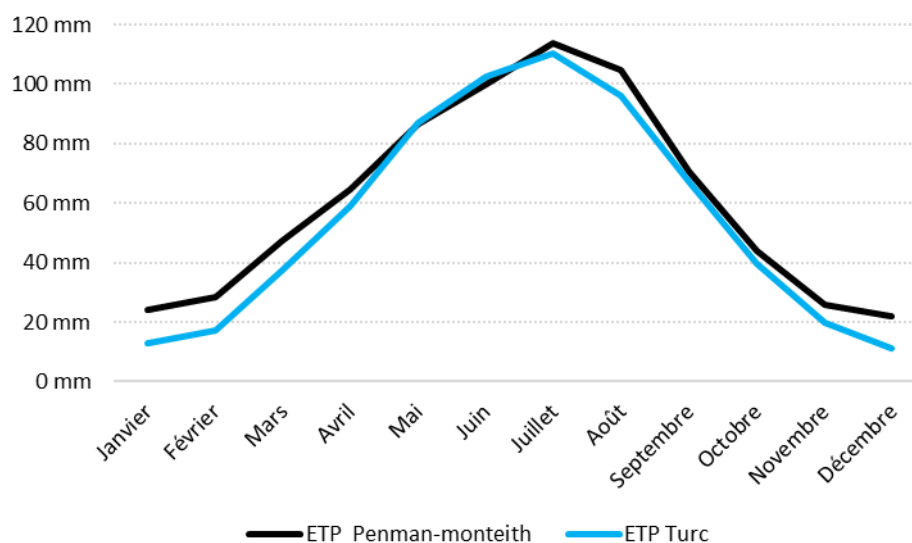
Hr l'humidité relative en %

Au pas de temps annuel la formule de Turc sous-estime l'évapotranspiration potentielle de -10 % (660 mm) sur la Normale climatique 1981-2010 à Caen-Carpique par rapport à la formule de Penman-monteith (731 mm).

A l'échelle intra-annuelle (**Figure 76**), les valeurs calculées à l'aide de la formule de Turc sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith de -32 % sur la période allant de novembre à mars. Pour les autres mois de l'année, les écarts restent faibles (de +3 à -10 %).

Si la formule de Turc n'est pas aussi précise que celle de Penman- Monteith, son recours n'est pas remis en cause dans le cadre de l'approche prospective. En effet, le but est d'abord de déterminer l'évolution de la moyenne et de la variabilité interannuelle du déficit hydrique et du confort hydrique. Par conséquent, la comparaison des valeurs de ces paramètres climatiques entre les décennies futures et l'horizon de référence ne peut se faire que dans le cas où la même formule a été utilisée pour ces deux périodes.

Figure 76 : Comparaison de l'évapotranspiration potentielle calculée à partir des formules de Penman-monteith et de Turc sur la normale 1981-2010 (données Météo France de Caen-Carpiquet)



Le bilan hydrique à réservoir unique comprend une décroissance logarithmique de la réserve utile selon la méthode de Thornthwaite et Mather (1955). Cette méthode a l'avantage d'intégrer la difficulté progressive de la plante à capter l'eau dans le sol quand la RUD se vide et de prendre en compte que la plante peut commencer à subir un déficit hydrique (et donc un stress) alors qu'il reste de l'eau dans le sol. Dans le cadre de l'approche agroclimatique, le bilan hydrique est calculé au pas de temps mensuel.

En revanche, pour l'approche phénoclimatique, les calculs sont effectués au pas de temps quotidien, avec une lecture sur la durée de la phase phénologique. Le bilan hydrique est spécifique au blé tendre. L'évapotranspiration maximale (ETM) « correspond à la quantité maximale d'eau qu'une culture est susceptible d'évaporer dans des conditions idéales d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ » (Lamy, 2013). Autrement dit l'ETM traduit le besoin en eau de la plante (et remplace donc l'ETR dans les calculs du bilan hydrique). Pour l'obtenir il convient de multiplier chaque jour le potentiel atmosphérique, à savoir l'ETP, aux coefficients culturaux (K_c) propres au blé tendre et à son stade de développement (Figure 77). Les valeurs de K_c mobilisées sont celles calculées⁶⁴ par Arvalis (2017 ; Tableau 21). Le bilan hydrique se succède d'année en années avec un K_c par défaut de 0,1 entre la maturité et la date de semis suivante.

⁶⁴ Le K_c correspond à la somme du coefficient de transpiration de la culture (K_{cb}) et celui de l'évaporation de l'eau dans le sol (K_e).

Figure 77 : Evolution du coefficient cultural au cours du cycle d'une culture (Allen et al., 1998)

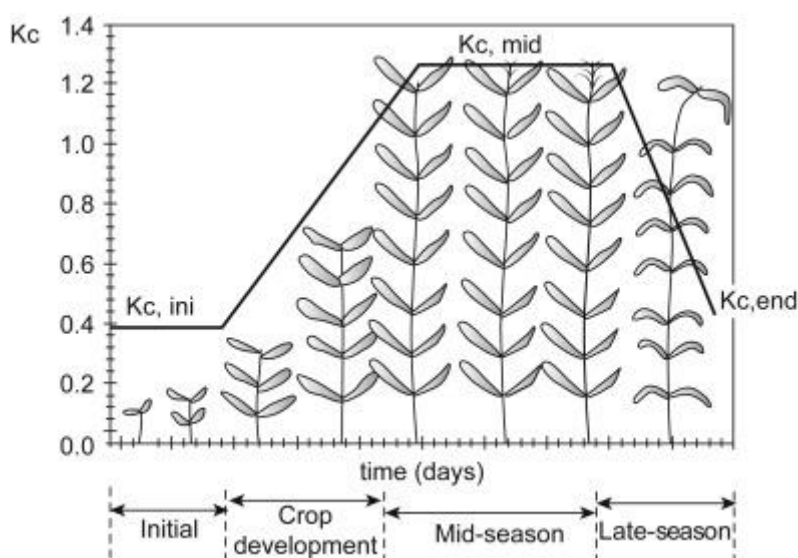


Tableau 21 : Coefficient cultural selon le stade de développement du blé tendre (d'après la Chambre d'Agriculture de Seine et Marne et Arvalis L'Institut du végétal)

Stade de développement	Coefficient cultural (Kc)
Semis à levée	0,1
Levée à début tallage	0,4
Début tallage à mi-tallage	0,6
Mi-tallage à épi 1 cm	0,8
Epi 1 cm à 2 noeuds	1
2 noeuds à sortie de la dernière feuille	1,1
Sortie de la dernière feuille à floraison	1,2
Floraison à grain laiteux	1,1
Grain laiteux à grain pâteux	0,8
Grain pâteux à maturité	0,5

L'étude de l'évolution des conditions climatiques pour la culture du blé tendre mobilise donc une approche agroclimatique et phénoclimatique, qui nécessitent en entrée plusieurs informations agronomiques. Il s'agit tout d'abord des caractéristiques de la variété : somme de température, durée du jour et besoin en vernalisation. Les seuils de température et variables faisant écho à de possibles impacts sur le rendement de la culture sont ensuite renseignés. La modélisation nécessite également des données météorologiques au pas de temps quotidien pour les paramètres suivants : température minimale, maximale, moyenne, précipitations, rayonnement et évapotranspiration.

3.2.4. Les tests statistiques retenus

L'analyse des données pour caractériser les évolutions climatiques repose sur des statistiques descriptives. A cela s'ajoutent les tests de Pettitt (1979) et de Mann-Kendall (MK ; Mann, 1945 ; Kendall, 1975). Le premier permet de détecter l'existence d'une rupture dans une série

chronologique et a déjà été mobilisé dans plusieurs études de climatologie (Bonnetoy et al., 2010 ; Briche et al., 2010 ; Madelin et al., 2010 ; Bodian et al., 2014 ; Rome et al., 2015 ; Beauvais et al., 2019 et 2020). Le second permet de détecter l'existence d'une tendance linéaire à la hausse ou à la baisse. Il est recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM ; 1988) pour le traitement statistique de données environnementales. Il a d'ailleurs été mobilisé dans plusieurs études récentes en climatologie et en hydrologie (Yu et al., 2002 ; Partal et Kahya, 2005 ; Shadmani et al., 2012 ; Drogue et François., 2013 ; Fossou et al., 2015 ; Faye et al., 2015 et 2016 ; Rome et al., 2015 ; Irannezhad et al., 2016 ; Basarir et al., 2018 ; Gadedjisso-Tossou et al., 2020 ; Kocsis et al., 2020 ; Alemu et Dioha., 2020).

Ces tests sont non paramétriques car ils ne font aucune hypothèse sur la distribution des données. Si l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée, alors l'hypothèse alternative (H_a) est retenue, signifiant ainsi l'existence d'une rupture pour celui de Pettitt et de tendance pour celui de MK. Dans ce cas la p-value est supérieure au seuil de significativité fixé. La plupart des recherches présentées dans l'état de l'art retiennent le seuil $\alpha = 0.05$ que nous avons également retenu.

Ces tests robustes permettent d'objectiver la présence de ruptures et de tendances dans les données étudiées (Rome et al., 2015). Ils sont mobilisés pour la période historique de 1950 à 2005 dans le cadre de la comparaison des températures simulées et observées, mais également pour l'évolution des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques entre 1961 et 2020. Ils ne sont en revanche pas mobilisés pour les horizons 2050 et 2100 car les plages chronologiques 2021-2050 et 2071-2100 ne sont pas continues.

3.3. Données météorologiques observées et modélisées issues de la modélisation prédictive du climat

Pour effectuer un état des évolutions observées sur les dernières décennies (de 1950 à aujourd'hui) et simuler les conditions climatiques futures pour l'agrosystème céréalier, plusieurs bases de données climatiques sont mobilisées. Il s'agit des données météorologiques de Météo-France sur une période historique et future à partir de projections climatiques.

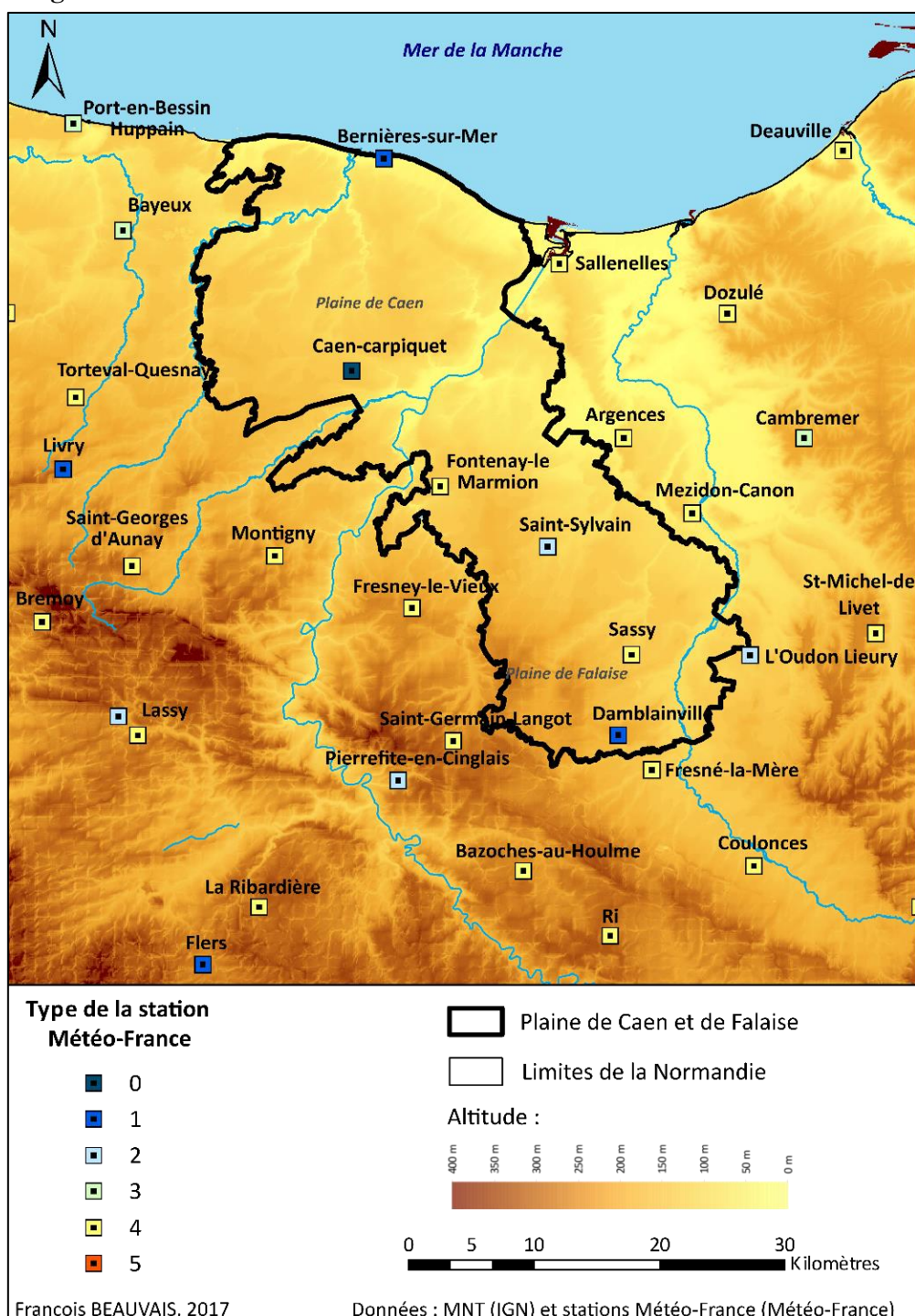
3.3.1. Les stations météorologiques de Météo France

La comparaison du climat observé et simulé ainsi que la présentation du climat et de ses évolutions en Plaine de Caen (chapitre 2) reposent sur les données de la station de Caen-Carpique, ouverte depuis le 1^{er} octobre 1944. Au cours de son histoire elle a fait l'objet de quatre déplacements successifs. D'abord située sur le vélodrome (38 m d'altitude) à l'ouest de la ville, elle est ensuite déplacée le 30 avril 1945 sur l'aérodrome (62 m d'altitude) et fait de nouveau l'objet d'un changement d'emplacement sur le même site (66 m d'altitude) le 37 janvier 1947. Elle est ensuite disposée sur l'aéroport (67 m d'altitude) le 22 juin 1972. Le test de Pettitt (1979) au seuil de significativité de 0,05 ne révèle pas de rupture statistique aux dates de modification de l'emplacement de la station. Cette station est jugée comme représentative puisqu'elle est disposée sur un espace plan et dégagé à l'image des plateaux topographiques et des paysages ouverts qui caractérisent les régions agricoles de grandes cultures.

Les paramètres suivants sont retenus mais ne sont pas tous accessibles depuis la date d'ouverture de la station (annexes 6 et 7) : températures minimales (T_n , en °C) ; températures maximales (T_x , en °C) ; précipitations (RR, en mm) ; l'évapotranspiration de Penman-Monteith (ETP, en mm), le rayonnement solaire (RG, en cal/cm²/jour) et le vent (W, en m.s).

Quatre autres stations Météo-France sont mobilisées afin d'exprimer la diversité spatiale des paramètres climatiques (**Figure 78**) en Plaine de Caen. La station de Bernières-sur-Mer (depuis 2001, 2 m d'altitude) est située sur le littoral. Celle de Saint-Sylvain (depuis 1972, 62 m d'altitude), est en position plus continentale que Caen-Carpique, et exprime de ce fait le climat de l'arrière-pays Caennais. Le site de Damblainville (depuis 1997, 155 m d'altitude) expose les conditions au sommet des hauteurs des Monts-d'Eraines, à une altitude plus élevée que l'ensemble de la plaine agricole. Plusieurs bosquets sont présents dans les hectomètres entourant le site. La station de L'Oudon-Lieury, à l'interface entre la Plaine de Caen et le Pays-d'Auge est disposée dans une petite vallée. Quelques linéaires de haies sont présents autour de la parcelle qui l'accueille. La station de Saint-Sylvain a fait l'objet d'un déplacement le 1^{er} janvier 1997 (disposée à 1,2 km plus à l'ouest de la position précédente). C'est également le cas de l'Oudon-Lieury le 17 mars 1993 (déplacée de 680 m), engendrant d'ailleurs une rupture statistique (accentuation de la température). Toutefois, les données sont analysées dans le chapitre 7 sur la période commune 2001-2020, commune à ces stations.

Figure 78 : Localisation des stations Météo France en Plaine de Caen et de Falaise



3.3.2. Le modèle SAFRAN

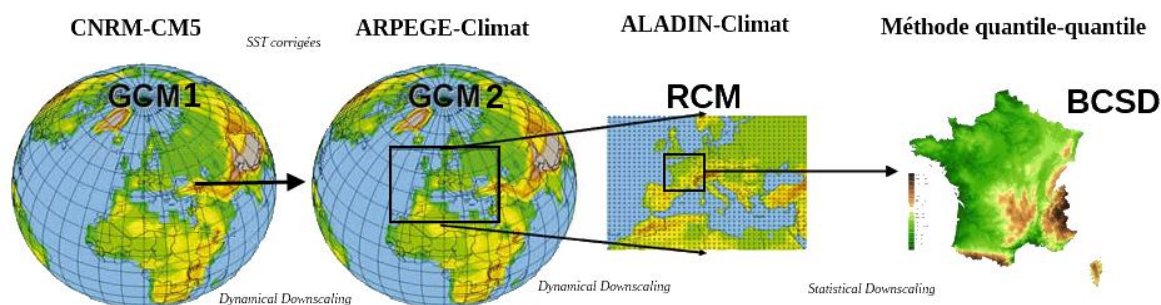
Si les stations Météo France permettent d'exploiter des données relevées sur les sites, cette étude mobilise également les ré-analyses du modèle SAFRAN. SAFRAN est un système d'analyse qui combine les observations horaires de surface avec celles des modèles météorologiques. Les paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude et interpolés sur une grille horizontale d'une résolution spatiale de 8 x 8 km (<https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article424>). Elles sont utiles pour comparer les données du scénario historique des projections climatiques sur la période de référence 1976-2005 puisque les points de grille sont équivalents. Par ailleurs lorsque qu'un

paramètre n'est pas relevé dans les stations ou bien qu'il subsiste des données manquantes, ce modèle est une alternative. En dépit de sa résolution de 8x8 km qui, à échelle fine, peut masquer des effets d'abri, SAFRAN permet d'obtenir des données là où il n'y a pas de station météorologique. La maille qui se juxtapose avec la station de Caen-Carpiquet est retenue. Elle est mobilisée dans le cadre de l'analyse prospective (horizons 2050 et 2100) en complément des données du scénario historique des simulations CNRM-2014 issues du même point de grille. Les données SAFRAN sont également utilisées pour la période 1961-2020 de façon à rester sur la même maille que l'analyse prospective mais aussi pour pallier les trous de données de la station de Caen-Carpiquet, pour le rayonnement notamment indisponible avant 1976.

3.3.3. Les données sorties du modèle ALADIN-Climat

Le climat du futur est étudié à partir des données journalières CNRM-2014 issues du modèle régional à aire limitée ALADIN-Climat (Spiridonov *et al.*, 2005), disponibles pour tout le territoire français sur le portail internet *DRIAS Les futurs du climat*⁶⁵ (Ouzeau *et al.*, 2014). Les conditions aux limites latérales d'ALADIN-Climat sont issues d'une première descente d'échelle dynamique entre le modèle global couplé CNRM-CM5 (Voldoire *et al.*, 2011) et le modèle ARPEGE-Climat (Déqué *et al.*, 1994 ; **Figure 79**). Ce modèle global fait partie du projet CMIP5 de l'exercice du GIEC. La maille élémentaire du modèle est d'une résolution de 12 km, échelles auxquelles sont définis les paramètres de surface des modèles (densité foliaire, albédo, fraction de sol couverte par la végétation). Ces paramètres sont obtenus d'après la base de données ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003) tout comme l'altitude à partir de la base Geotop30⁶⁶.

Figure 79 : Descente d'échelle de la simulation CNRM-2014 (Drias, site internet)



Si les simulations effectuées sont en accord avec les observations, il subsiste quelques erreurs sur les moyennes et certains extrêmes. Les données sont donc corrigées par rapport aux données du modèle SAFRAN utilisées comme des observations de base (Quintana-Segui *et al.*, 2008). Il s'agit de la méthode quantile-quantile (Déqué *et al.*, 2007).

Le scénario historique est établi sur la période 1950-2005. Les projections climatiques sont disponibles sur la période 2006-2100 pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5.

⁶⁵ <http://www.drias-climat.fr/>

⁶⁶ Ces précisions ont été fournies par le service technique du portail *Drias Les futurs du climat*.

Afin d'être représentatif du climat de la plaine, la maille sélectionnée doit être relative à une zone d'espaces plans et dégagés. La maille doit donc être pleinement dans la délimitation de l'espace d'études puisqu'au-delà les paysages ne sont plus ceux des grandes cultures (topographie plus accidentée, prairies ou paysages qui se referment). A partir des **Figure 80** et **81**, il est possible de constater que la résolution de 8 x 8 km des mailles n'exprime pas de variabilité spatiale des principales variables climatiques en Plaine de Caen. Seules quelques mailles se démarquent mais il s'agit justement de celles situées en bordure de l'espace d'étude. Au nord, les mailles littorales ont un nombre de gelées et de jours de chaleurs inférieurs. Pour celles du sud-ouest, en raison de l'altitude plus élevée et de l'éloignement à la mer, les gelées sont plus nombreuses. Finalement seules quelques mailles répondent à ce critère et il est possible de constater que les quatre paramètres climatiques ne se distinguent que très peu. Ainsi, la maille retenue est celle qui se juxtapose avec la location de la station Météo France de Caen-Carpiquet.

Figure 80 : Moyenne annuelle des indicateurs climatiques sur la période 1976-2005 du modèle ALADIN-Climat : cumul pluviométrique en mm (A), nombre de jours de pluie (B)

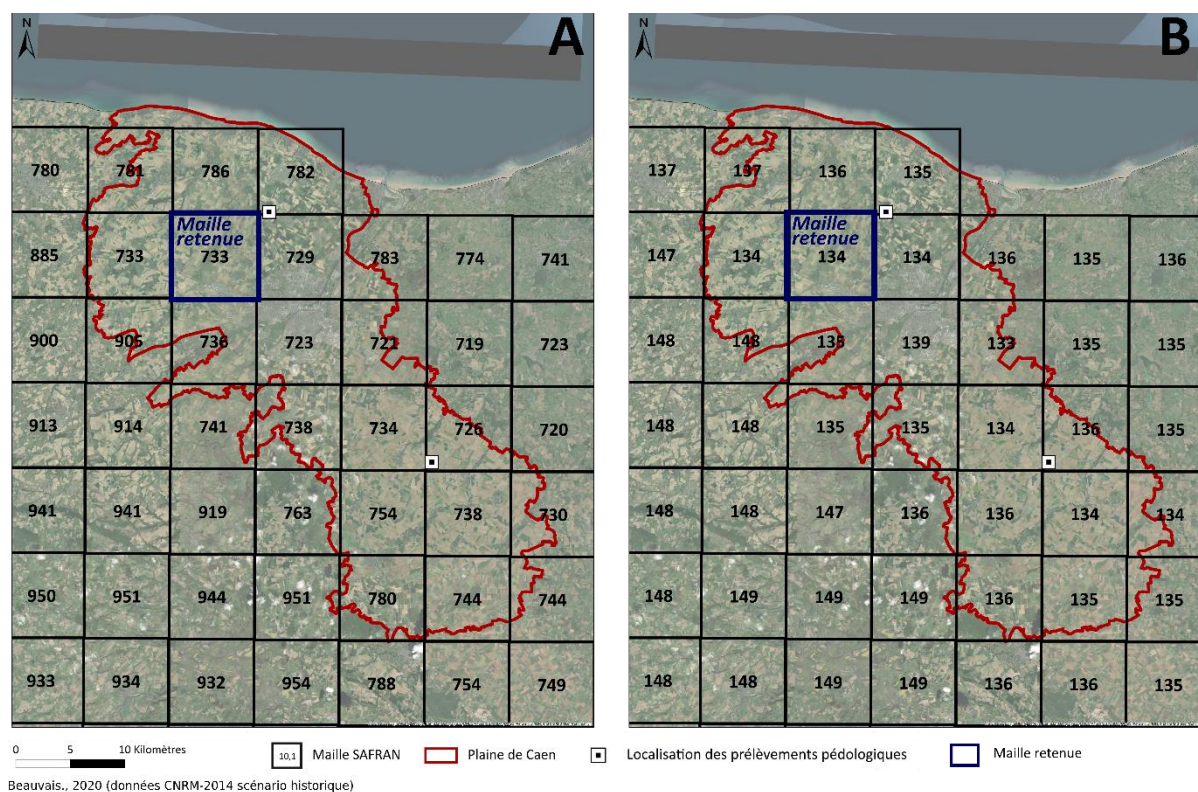
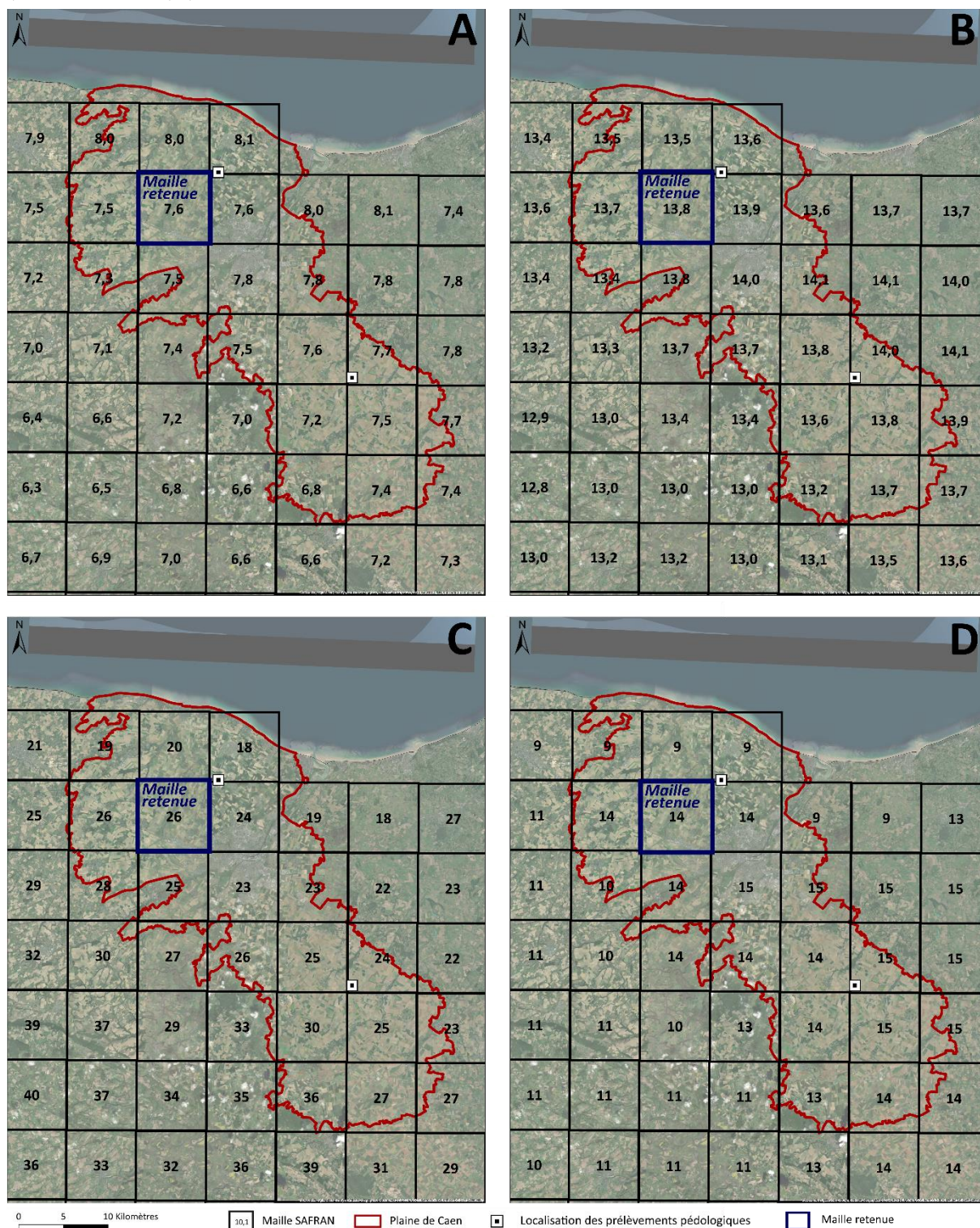


Figure 81 : Moyenne annuelle des indicateurs climatiques sur la période 1976-2005 du modèle ALADIN-Climat : température minimale en °C (A), température maximale en °C (B), jours de gel (C) et de chaleur (D)



3.3.4. Comparaison du climat observé au climat simulé par les modèles ALADIN-Climat et WRF : identification d'un biais froid

Avant de mobiliser les jeux de données issues de la modélisation prédictive, il convient de discuter leur pertinence pour le site étudié sur la période de référence 1976-2005.

Ces simulations peuvent être soumises à des biais en raison de la difficulté des modèles « à simuler la multiplication des phénomènes complexes, notamment aux échelles fines » (Beltrando, 2004 ; Bonnefoy, 2013). C'est pourquoi plusieurs études se sont attachées ces dernières années à la discussion des simulations issues des modèles climatiques (Madelin, 2004 ; Bonnardot et Cauteret., 2009 ; Bonnefoy et al., 2010 ; Briche et al., 2010 ; Martin et al., 2013 ; Bonnefoy, 2013 ; Briche et al., 2014 ; Dubreuil et al., 2019 ; Beauvais et al., 2019 et 2020).

Le travail consiste à comparer les scénarios historiques d'ALADIN-Climat aux observations du modèle SAFRAN et de la station Météo France de Caen-Carpique (**Figure 82 et 83**). Bien que ce travail de thèse repose sur le modèle ALADIN-Climat, à titre de comparaison, les résultats de l'analyse comparative sont également présentés pour le modèle WRF⁶⁷. La comparaison au modèle SAFRAN est pertinente puisqu'il s'agit de la même résolution spatiale 8x8 km des données météorologiques. Autrement dit, il est possible d'évaluer les données depuis la même maille, contrairement à la station correspondant à un site précis. Toutefois, cette dernière donne une idée du climat local afin d'être certain que la référence SAFRAN ne s'égare pas. Dix indicateurs sont retenus, à savoir :

- La température minimale ;
- La température maximale ;
- La température moyenne ;
- Le nombre de jours de chaleur ;
- Le nombre de jours de gel ;
- Les précipitations totales ;
- Le nombre de jours de précipitations ;
- Le nombre de jours de fortes précipitations ;
- Rayonnement global cumulé ;
- Evapotranspiration potentielle.

Sur la période 1976-2005, la température minimale est sous-estimée de -0,4°C par ALADIN et de -0,6°C par WRF en comparaison aux données du modèle SAFRAN. Pour la température maximale le biais est équivalent (-0,4 °C) pour le premier modèle tandis qu'il est très légèrement accentué pour le second (-0,7°C). La température moyenne simulée est par conséquent également sous-estimée. La simulation du nombre de jours de gelées annuelles des deux modèles est proche (26 et 27 jours) de l'observation (25 jours). En revanche les jours de chaleurs sont sous-estimés de 4 jours avec ALADIN et de 8 jours avec WRF puisqu'ils calculent respectivement 14 et 10 jours contre 18 pour l'observation SAFRAN.

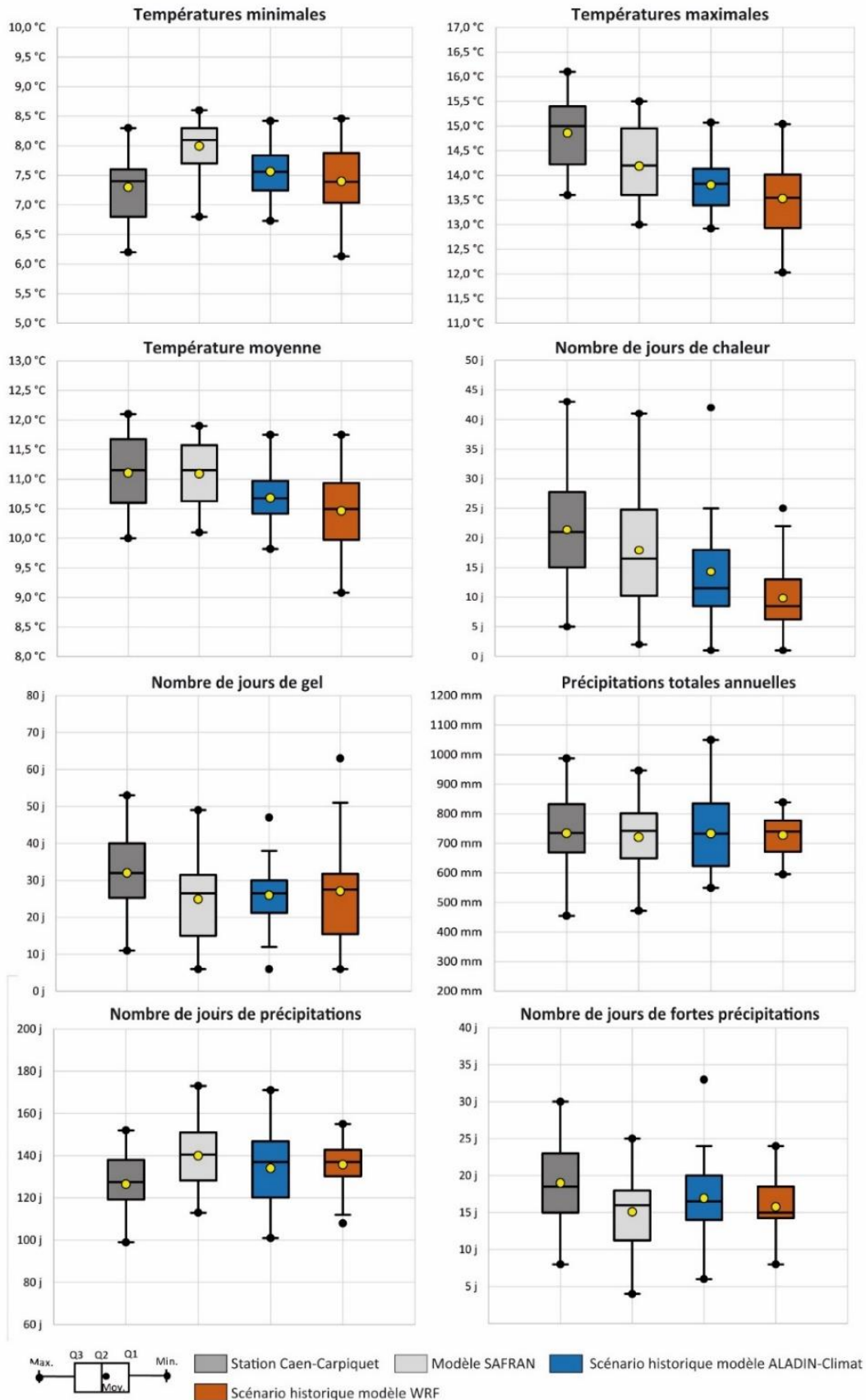
⁶⁷ Les simulations du modèle WRF (Skamarock., 2008) sont également disponibles sur le portail internet *DRIAS Les futurs du climat* et sont appelées IPSL-2014. La simulation de WRF sur la France est forcée par une première simulation sur l'Europe, succédant à celle du modèle global IPSL-CM4A (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/180>) La maille élémentaire du modèle est de 15 km. Le scénario historique couvre la période 1971-2005. Les projections 2006-2100 sont établies pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Toutefois, il convient de préciser que le modèle SAFRAN surestime de $0,7^{\circ}\text{C}$ la température minimale, par conséquent celle simulée avec les modèles ALADIN et WRF s'approche finalement davantage de celle de la station. Néanmoins, la température maximale simulée est inférieure de $-0,7^{\circ}\text{C}$. Ainsi, si l'on compare la température des deux modèles à la station le biais est beaucoup plus prononcé (-1 et $-1,3^{\circ}\text{C}$). Les écarts entre le modèle SAFRAN et la station peuvent s'expliquer par le fait que celles du modèle sont exprimées au pas de temps horaires, lissant ainsi les minimums et maximums. Aussi, la température minimale d'une journée relevée à la station Météo France correspond à la température la plus faible entre J-1 18h UTC et le jour J à 18h. La température maximale quant à elle est relevée du jour J 6h à J+1 6h. Avec le modèle SAFRAN, il s'agit de la température minimale et maximale horaire sur les 24h qui composent une journée. Néanmoins, la sous-estimation des températures par les modèles ALADIN-Climat et WRF par rapport au modèle SAFRAN témoigne d'un biais froid. Ce biais froid engendre d'ailleurs une légère sous-estimation de l'évapotranspiration de Turc (-9%) calculée à l'aide des données de températures et de rayonnement global d'ALADIN. Le rayonnement global cumulé à l'année simulé (84313 cal/cm^2) est proche de l'observation SAFRAN (86213 cal/cm^2). Cependant SAFRAN le sous-estime de 10% par rapport aux mesures de la station (95710 cal/cm^2).

Les précipitations totales annuelles des deux modèles sont proches de l'observation (721 mm pour SAFRAN et 734 mm pour la station) avec une simulation respective de 733 et 728 mm. Il en va de même pour le nombre de jours de pluies puisque 134 et 136 jours sont simulés. ALADIN et WRF simulent 16 et 17 jours de fortes précipitations, correspondant à l'observation SAFRAN (15 jours) mais tout en sachant que la modélisation semble légèrement sous-estimer ce type d'évènement puisqu'ils surviennent en moyenne à 19 reprises à la station.

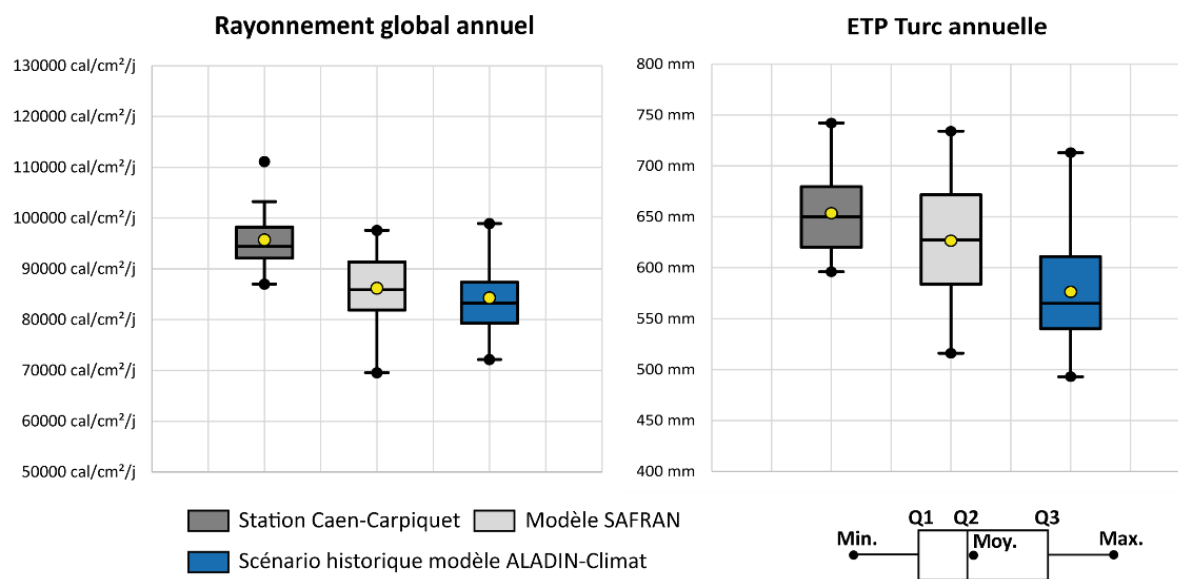
La variabilité interannuelle des données CNRM-2014 et IPSL-2014 en période de référence ne peut être strictement équivalente à celle de l'observation puisqu'il s'agit de scénarios historiques pour lesquels les modèles simulent leur propre variabilité. Cependant, l'analyse porte ici de façon subjective sur l'interprétation de la variabilité afin de déterminer à l'aide des boxplots si elle s'approche de l'observation. La variabilité interannuelle de la température maximale apparaît proche de la réalité avec WRF, mais elle est accentuée pour les températures minimales et moyennes. ALADIN en revanche simule des années plus homogènes que l'observation et il en va de même pour les gelées. Toutefois, probablement en raison du biais minimisant les journées de chaleur, et donc les années pouvant en cumuler un nombre important, la variabilité interannuelle de cet indicateur est très nettement sous-estimée. Pour les précipitations c'est le modèle WRF qui semble simuler une variabilité interannuelle plus faible que l'observation.

Figure 82 : Comparaison des principaux paramètres climatiques simulés avec ALADIN-Climat et WRF par rapport au modèle SAFRAN et à la station météorologique de Caen-Carpiquet sur la période 1976-2005



Beauvais., 2017

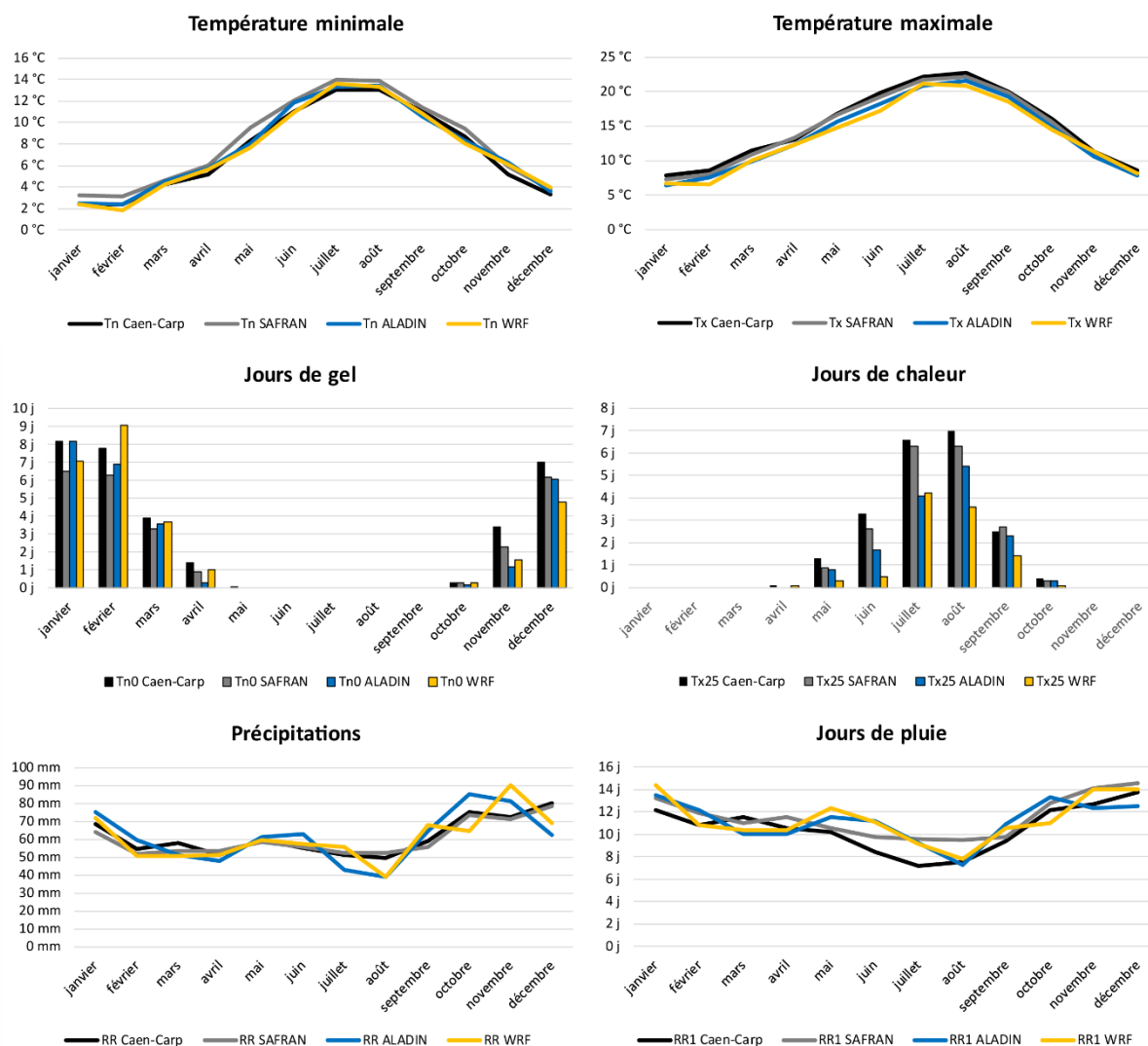
Figure 83 : Comparaison du rayonnement global et de l'ETP Turc calculée avec ALADIN-Climat rapport à celle du modèle SAFRAN et de la station Caen-Carpique sur la période 1976-2005



Beauvais., 2017

A l'échelle intra-annuelle (**Figure 84**), les écarts de températures entre le modèle SAFRAN et la station de Caen-Carpique sont apparents tout au long de l'année. Les cumuls pluviométriques sont conformes à la station. Néanmoins les jours de pluie sont surestimés l'été. Les deux modèles ALADIN et SAFRAN respectent la saisonnalité hormis quelques écarts du côté des jours de précipitations en début d'été en raison d'une légère surestimation. Le cumul pluviométrique est légèrement sous-estimé en été et surestimé en octobre et novembre pour ALADIN et novembre pour WRF. Les températures sont sous-estimées tout au long de l'année, parfois de façon prononcée comme pour la température maximale avec WRF au mois de juin (-2,1°C). En revanche, le biais froid n'est pas apparent pour les deux derniers mois de l'année. Si les gelées sont correctement simulées, les jours de chaleurs sont largement sous-estimés tout au long de l'année.

Figure 84 : Comparaison à l'échelle intra-annuelle de l'évolution des principaux paramètres climatiques simulés avec ALADIN-Climat et WRF par rapport au modèle SAFRAN et à la station météorologique de Caen-Carpiquet sur la période 1976-2005



Beauvais., 2017

A Caen le réchauffement climatique a engendré une rupture de la température minimale et maximale (Figure 85 et 86). Elle est détectée en 1987 à partir du test de Pettitt (Pettitt, 1979) au seuil de significativité alpha de 0,05. Une rupture est également détectée pour le scénario historique du modèle ALADIN, en 1985. Le biais de la température minimale est plus légèrement marqué pour la période post-rupture (-0,5°C) que pour la période pré-rupture (-0,4°C). Concernant la température maximale, le biais est uniquement présent pour la période post-rupture (-0,7°C). Avec les données du modèle WRF aucune rupture n'apparaît. Cependant, ce constat peut être expliqué par la plus faible profondeur historique des données disponibles seulement à partir de 1971. En effet, en effectuant ce test à partir de 1971 pour ALADIN aucune rupture n'est également constatée.

Figure 85 : Comparaison de l'évolution de la température minimale observée (modèle SAFRAN) et simulée des modèles ALADIN-Climat et WRF sur leurs périodes historiques à partir du test d'homogénéité de Pettitt

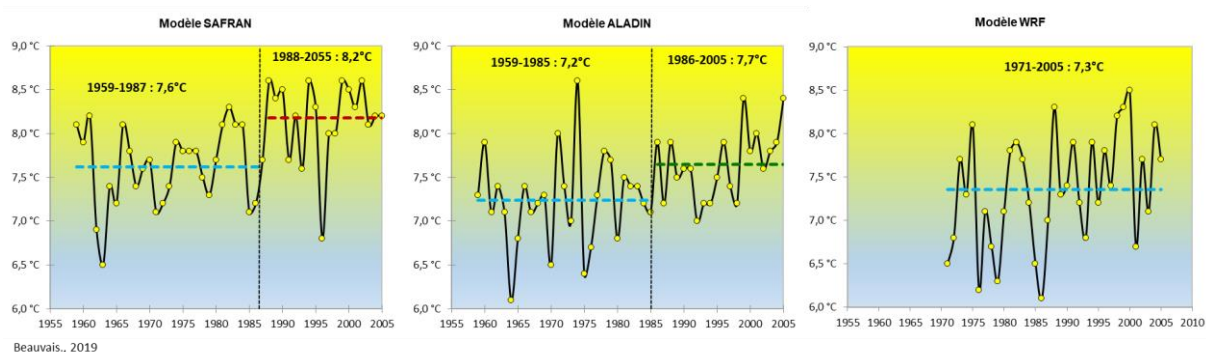
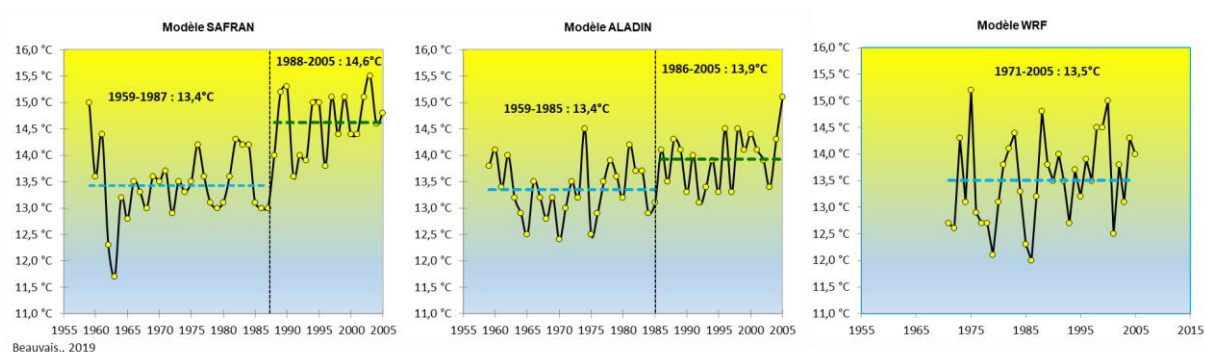


Figure 86 : Comparaison de l'évolution de la température maximale observée (modèle SAFRAN) et simulée des modèles ALADIN-Climat et WRF sur leurs périodes historiques à partir du test d'homogénéité de Pettitt



Enfin, les scénarios historiques des modèles ALADIN et WRF simulent un climat qui s'avère être cohérent par rapport à l'observation. Des écarts subsistent dans la variabilité interannuelle et à l'échelle intra-annuelle, mais ces éléments peuvent s'expliquer en partie par le fait que les deux modèles simulent leur propre variabilité. Toutefois, un biais froid est constaté pour les températures minimales et maximales. Il concerne surtout la période post-rupture. Par conséquent on peut supposer qu'ils peinent à simuler les hausses importantes de la température. Si cet élément est constaté en période de référence, alors il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle le réchauffement climatique des prochaines décennies pourrait être sous-estimé. Ce constat a également été effectué avec les mêmes simulations⁶⁸ pour la Bretagne par Vincent Dubreuil et al (2019) ayant procédé à une correction du biais de chaque mois de l'année sur la période 1976-2005. Il convient alors de procéder à une correction pour la présente étude et en tenant compte également du biais inégal entre les périodes pré et post-rupture. Le scénario historique est donc corrigé en considérant le biais moyen mensuel des températures minimales et maximales sur la période 1976-1987 puis 1988-2005 par rapport aux données SAFRAN. Les données des scénarios RCP sont quant à elles rajustées uniquement selon le biais post-rupture. Les données SAFRAN comportent également quelques écarts avec la station Météo France de Caen-Carpique, notamment en surestimant les températures minimales et sous-estimant les températures maximales. Toutefois,

⁶⁸ Un biais froid a également été constaté pour d'anciennes simulations du modèle ALADIN et ARPEGE dont les études ont été citées en entête de cette sous-partie.

afin de réaliser une analyse comparable, elles sont retenues comme référence pour l'observation lorsqu'il s'agit d'analyser les scénarios historiques des modèles ALADIN et WRF en raison de leur résolution spatiale équivalente (maille de 8x8 km).

3.3.5. Conséquences du biais froid sur la simulation du cycle du blé tendre

Ce biais froid engendre un allongement de la durée du cycle du blé simulé sur la période 1976-2005 (Tableau 22). En mobilisant les sommes de températures relevées au champ (parcelle d'Anguerny), la maturité physiologique apparaît le 28 juillet. L'observation est équivalente entre le calcul effectué avec les données du modèle SAFRAN et celles de la station de Caen-Carpiquet, puisqu'il s'effectue à partir de la température moyenne pour laquelle il n'y a pas d'écart entre ces deux jeux de données. La date de récolte, qui équivaut à 250°CJ supplémentaires, correspond au 10 août. Par conséquent, les modèles ALADIN et WRF sous-estimant la température moyenne, les dates de maturité physiologique correspondantes sont simulées le 2 et 5 août (+ 5 et +8 jours) et les dates de récolte le 17 et 20 août (+7 et +10 jours). Ramenée à l'ensemble de la durée du cycle, autour de 260 jours du semis à la maturité physiologique, la marge d'erreur est faible : 2,3 % avec ALADIN et 3,3 % avec WRF.

Tableau 22 : Comparaison de la durée du cycle du blé tendre et des indicateurs climatiques associés sur la période de référence 1976-2005 entre les données observées et les simulations historiques des modèles ALADIN et WRF avec et sans correction

	Caen-Carpiquet	Modèle SAFRAN	ALADIN non corrigé	WRF non corrigé	ALADIN corrigé	WRF corrigé
Durée cycle (mm) semis - maturité	257	257	262	265	256	259
Date maturité	28-juil.	28-juil.	2-août	5-août	27-juil.	30-juil.
Date de récolte	10-août	10-août	17-août	20-août	10-août	13-août
Température moyenne (°C) cycle	9,6	9,6	9,4	9,3	9,7	9,5
Cumul pluviométrique (mm) cycle	511	505	509	525	500	513
Gelées cycle	31	24	27	27	22	24
Echaudage thermique (j) méiose - maturité	8,5	6,9	5,8	4,5	5,9	4,7
Déficit hydrique (mm) cycle	70	56	60	-	55	-
Rayonnement (cal/cm ²) montaison	24 021	21 207	22 469	-	21 700	-
Vernalisation (j) levée - épi 1 cm	86	86	86	89	81	86

Néanmoins il apparaît pertinent de corriger les données puisque le décalage des dates d'apparition des stades en raison de ce léger biais froid peut engendrer une comptabilité erronée des aléas météorologiques sur les phases sensibles du cycle. A titre d'exemple la **Figure 87** témoigne du

décalage de la phase phénologique du grain pâteux pour l'année 1998 du scénario historique d'ALADIN.

Sans cette correction cette phase phénologique se déroule du 22 juillet au 04 août, elle est exposée à 6 jours d'échaudage thermique. Les journées du 18 et du 20 juillet sont alors échaudantes pour la phase précédente (grain laiteux). En corrigeant l'écart de température du modèle ALADIN par rapport à SAFRAN, cette phase a lieu du 14 au 26 juillet. Par conséquent, elle est exposée aux jours de chaleur du 18 et du 20 juillet, mais également du 16 juillet atteignant le seuil de 25°C. Finalement, sans correction la phase grain laiteux est exposée à 6 jours d'échaudage, contre 8 après correction. Cependant, il convient de préciser que la situation inverse peut être constatée. Dans le cas où une vague de chaleur survient plus tardivement, les données non corrigées retardant la fin du cycle peuvent exposer le blé à un aléa auquel le blé n'est plus exposé une fois le biais froid corrigé. Ce même raisonnement est valide pour les autres phases phénologiques et les autres aléas auxquels la plante peut être confrontée. Pour le bilan hydrique l'ajustement des stades est également pertinent puisque le coefficient cultural varie en fonction de ces derniers.

Figure 87 : Comparaison de la comptabilité des jours d'échaudage thermique et des dates relatives au stade grain pâteux (2020 à 2500°CJ) avec et sans correction des données du modèle ALADIN



Concernant les autres variables, le cumul pluviométrique sur la période de développement et de croissance du blé des deux modèles correspond sensiblement à l'observation sur la période 1976-

2005. Ce cumul diminue très légèrement après la correction des températures puisque sans celle-ci la durée du cycle, c'est à dire la période de réception des précipitations est rallongée. Cette même logique est constatée pour les autres variables. Le rayonnement cumulé lors de la montaison diminue après la correction étant donné que celui des journées excédentaires dans la durée de cette phase phénologique n'est plus relevé. La correction ne permet pas en revanche de corriger la sous-estimation du nombre de jours d'échaudage thermique. Si la température maximale des journées est ajustée, une partie du biais froid mis en évidence était initialement masquée par la surestimation de la durée du cycle avec un nombre de jours supplémentaires en fin de cycle, soit en été et pouvant être exposés à un dépassement du seuil de 25°C. Il est alors possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle le biais froid n'est peut-être pas seulement l'affaire d'une sous-estimation régulière des températures journalières mais pouvant être lié à une difficulté à resimuler l'occurrence de vagues de chaleur. Ce constat est effectué par rapport à l'observation SAFRAN, mais il convient de rappeler que le modèle sous-estime déjà les jours de chaleur en raison d'une température maximale correspondant à un pas de temps horaire (cf. sous-partie précédente). Les gelées initialement surestimées (27 jours) par rapport à SAFRAN (24 jours) sont rajustées, même si la correction engendre une sous-estimation de deux jours pour ALADIN. Concernant le nombre de jours de vernalisation, la correction génère une légère sous-estimation de ces derniers (81 jours contre 86 pour l'observation). Le déficit hydrique légèrement surestimé (60 mm) sans correction en raison des jours excédentaires du cycle par rapport à l'observation (56 mm) est ajusté (55 mm) même si l'écart est quasi insignifiant.

Au final, le biais froid rencontré avec les deux modèles ALADIN-Climat et WRF engendre une sous-estimation du nombre de jours d'échaudage thermique. La sous-estimation de la température provoque également un léger retard de la phénologie qui peut engendrer une comptabilité erronée des aléas climatiques en raison d'un décalage des périodes phénologiques de l'ordre de quelques jours, ce qui justifie la correction des données. Après cette correction, le retard de la phénologie n'est plus observé avec le modèle ALADIN alors qu'il est encore de 3 jours avec WRF. Si le nombre de jours de chaleur est réhaussé, ils restent encore sous-estimés, surtout avec le modèle WRF.

3.4. Les données de terrain en entrée de la modélisation et estimation des limites du modèle

Afin de tenir compte de la spécificité des sols de la Plaine de Caen pour la détermination du RUM nécessaire au calcul du bilan hydrique et déterminer les données variétales pour la simulation de la phénologie, des relevés de terrains sont réalisés. Le terrain est également utile à l'estimation des limites de la modélisation, mais ce volet de recherche est davantage précisé en partie 3.

3.4.1. Relevés pédologiques dans le cadre de l'estimation du RUM pour le bilan hydrique

Pour s'approcher au plus près des conditions biopédoclimatiques de la plante, il est primordial d'estimer le RUM des sols représentatifs de la zone d'étude. Des relevés de terrain et des analyses en laboratoire ont été menées dans ce but.

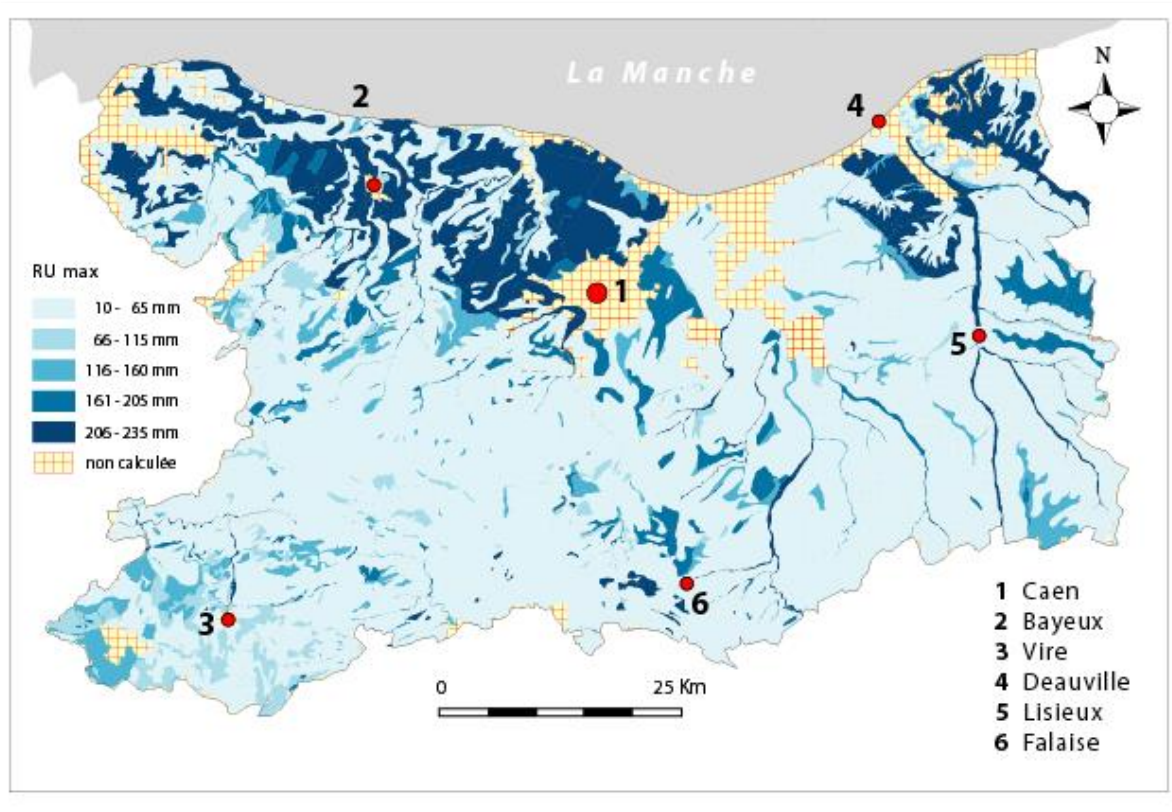
3.4.1.1. Contexte pédologique de la Plaine agricole et contraste NO/SE

La Plaine agricole de Caen est caractérisée par une couverture pédologique inégale (Le Gouée, 2008 ; **Figure 88**). Le nord-ouest est principalement recouvert de sols, issus d'un faible lessivage et de l'hydromorphie héritée (pédogénèse avec oxydo-réduction), majoritairement épais (~1m10) et de texture limono-argileuse sans charge en éléments grossiers. Ils se sont développés sur les formations superficielles appelées limons des plateaux, pouvant atteindre localement plusieurs mètres d'épaisseur. Ces roches détritiques meubles sédimentaires (löss) datent du Weichsélien (équivalent du Würm pour les Alpes), c'est-à-dire de la dernière glaciation (-20 000 ans) à la fin du Pléistocène. L'environnement périglaciaire favorise l'accumulation de particules fines arrachées du fond de l'actuelle Mer de la Manche (qui n'était alors pas immergée) par les vents froids provenant de l'Europe du Nord recouverte de glace (Doré et *al.*, 1990 ; Lithothèque de Normandie, site internet)⁶⁹. Cependant, ces dépôts ne sont pas répartis uniformément sur l'ensemble de la région. Les sols du sud-est de l'agglomération Caennaise reposent quant à eux en grande partie sur le calcaire et se sont directement formés sur celui-ci. Ils sont issus de la carbonatation, minces, caillouteux et d'une texture limono-sableuse (Le Gouée, 2016). Cette couverture pédologique inégale traduit des capacités de rétention en eau des sols très contrastées entre les parties septentrionales et méridionales de la plaine agricole puisque le RUM (Réservoir Utilisable Maximal) est respectivement d'environ 200 et 50 mm.

En seulement quelques kilomètres, en raison d'un contraste pédologique, l'agriculture fait face à une vulnérabilité différente à la sécheresse, et ce, pour un même climat.

⁶⁹ <https://geologie.discip.ac-caen.fr/paleozoi/valleeGuigne/loess.htm#:~:text=Dans%20le%20versant%20NE%20de,de%20la%20derni%C3%A8re%20glaciation%20quaternaire>

Figure 88 : Carte des réserves utiles des sols agricoles du Calvados (Le Gouée, 2008)



Ainsi, au nord-ouest de l'agglomération caennaise, la plante ne souffre que peu du manque d'eau pour satisfaire ses besoins physiologiques mais la réalité est tout autre au sud-est. Dès lors que l'ETP devient supérieure à l'offre de précipitations, la RUD se vide. Les précipitations ne sont alors pas suffisantes pour reconstituer la réserve à hauteur de la quantité d'eau mobilisée par la plante. Par conséquent, cette phase de sollicitation est très courte pour les petits sols. Ainsi, il n'est pas rare d'observer le déploiement de rouleaux d'irrigation⁷⁰ dès le printemps (Trzpit, 1996) dans les zones de « petits sols » (Figure 89).

⁷⁰ Note sur la géologie locale : La Plaine agricole de Caen est située à l'ouest du Bassin Parisien, le pendage des couches stratigraphiques est donc orienté vers l'est (structure monoclinale). Il s'agit de couches calcaires du Jurassique moyen (ère mésozoïque) du Bathonien et du Bajocien (environ 170 à 166 millions d'années), entre lesquelles se glissent des marnes des mêmes étages. La perméabilité des calcaires explique la présence d'aquifères : la nappe libre du Bathonien et la captive du Bajocien (libre lorsqu'elle n'est pas recouverte par les calcaires et marnes du Bathonien). Elles permettent d'approvisionner la population de l'agglomération caennaise en eau, et constitue donc également une ressource pour l'agriculture usant de l'irrigation.

Figure 89 : Système d'irrigation à Cauvicourt (sud de Caen) le 29 avril 2017



3.4.1.2. Sélection de deux parcelles agricoles représentatives de l'enveloppe pédologique Caennaise

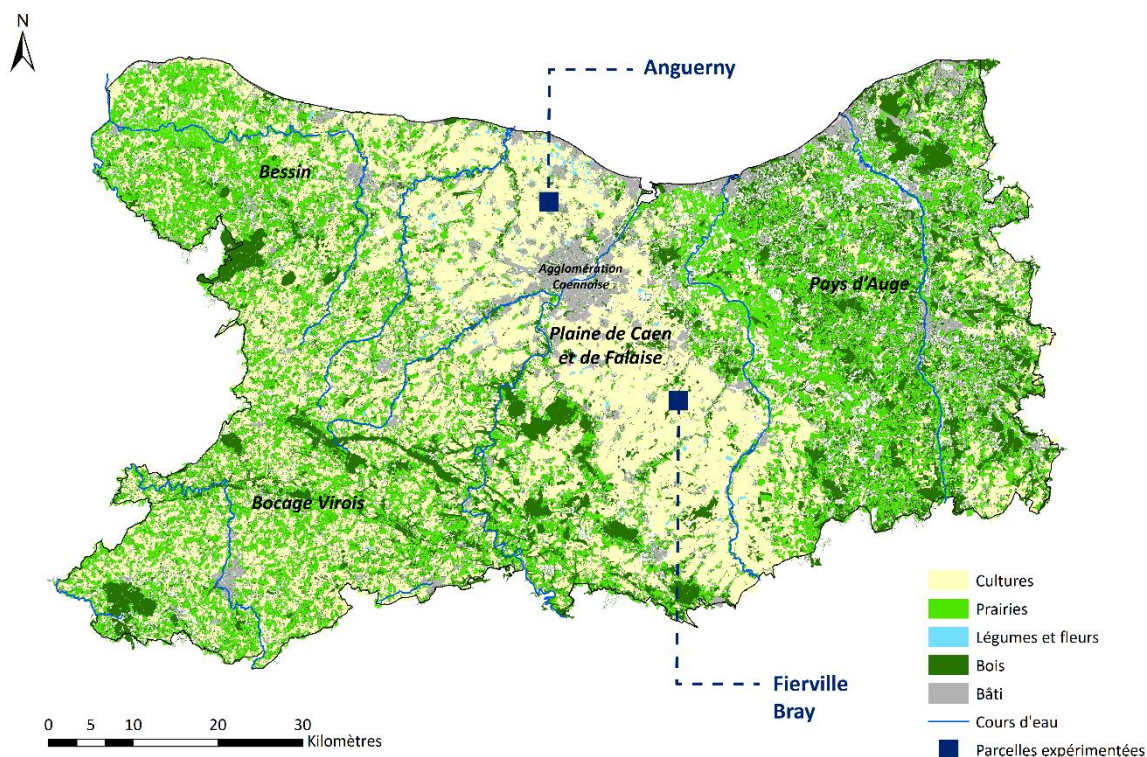
Les méthodes directes pour l'estimation des courbes de rétention en eau du sol sont délicates, chronophages, coûteuses et impossibles à appliquer sur de vastes territoires (Verreken et *al.*, 2010 ; Baize et Jabiol, 2011 ; Haghverdi et *al.*, 2014 ; Dobarco et *al.*, 2019). C'est pourquoi de nombreuses études s'appuient sur la fonction de pédotransfert que Bouma et Van Lanen (1987) définissent comme "*une expression mathématique reliant les caractéristiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, taux de carbone organique, etc.) à une propriété ou à un comportement (rétention en eau, conductivité hydraulique, etc.)*" (Baize, Les mots de l'agronomie). Toutefois, si les règles de pédotransferts sont efficaces, les mesures directes et les analyses en laboratoire restent à privilégier lorsque l'étude le permet (Al Majou et *al.*, 2008 ; Labidi et *al.*, 2016). C'est la méthode que nous avons retenue pour estimer le RUM de façon précise puisque les sols de la Plaine de Caen des secteurs nord-ouest et sud-est sont respectivement homogènes ce qui ne nécessite pas d'effectuer des mesures sur un grand nombre de sites.

Deux fosses pédologiques (**Figure 90**) ont été ouvertes au nord-ouest à Anguerny (le 2 avril 2019) et au sud-est à Fierville-Bray (le 29 juin 2020) selon le protocole RMQS2 (Jolivet et *al.*, 2018a ; 2018b). Les parcelles favorables et défavorables pour les cultures sont bien connues du milieu agricole. Par conséquent, elles ont été proposées par Eric Lemarinier et Bernard Bugenne, exploitants agricoles sur ces deux sites. Elles ont ensuite été validées par Patrick Le Gouée

spécialiste des sols de Normandie et auteur de nombreux travaux sur le sujet. D'ailleurs, au regard du rapport de Le Gouée et Delahaye (2008) et des fiches UCS n°38 et n°2 du Référentiel Régional Pédologique du Calvados (Etude n°30234 ; Le Gouée, 2016), ces deux sites sont représentatifs des sols épais du nord-ouest de Caen et des petits sols du sud-est. La prise en compte dans l'étude d'un sol épais et mince permet d'avoir l'enveloppe possible du RUM en Plaine de Caen.

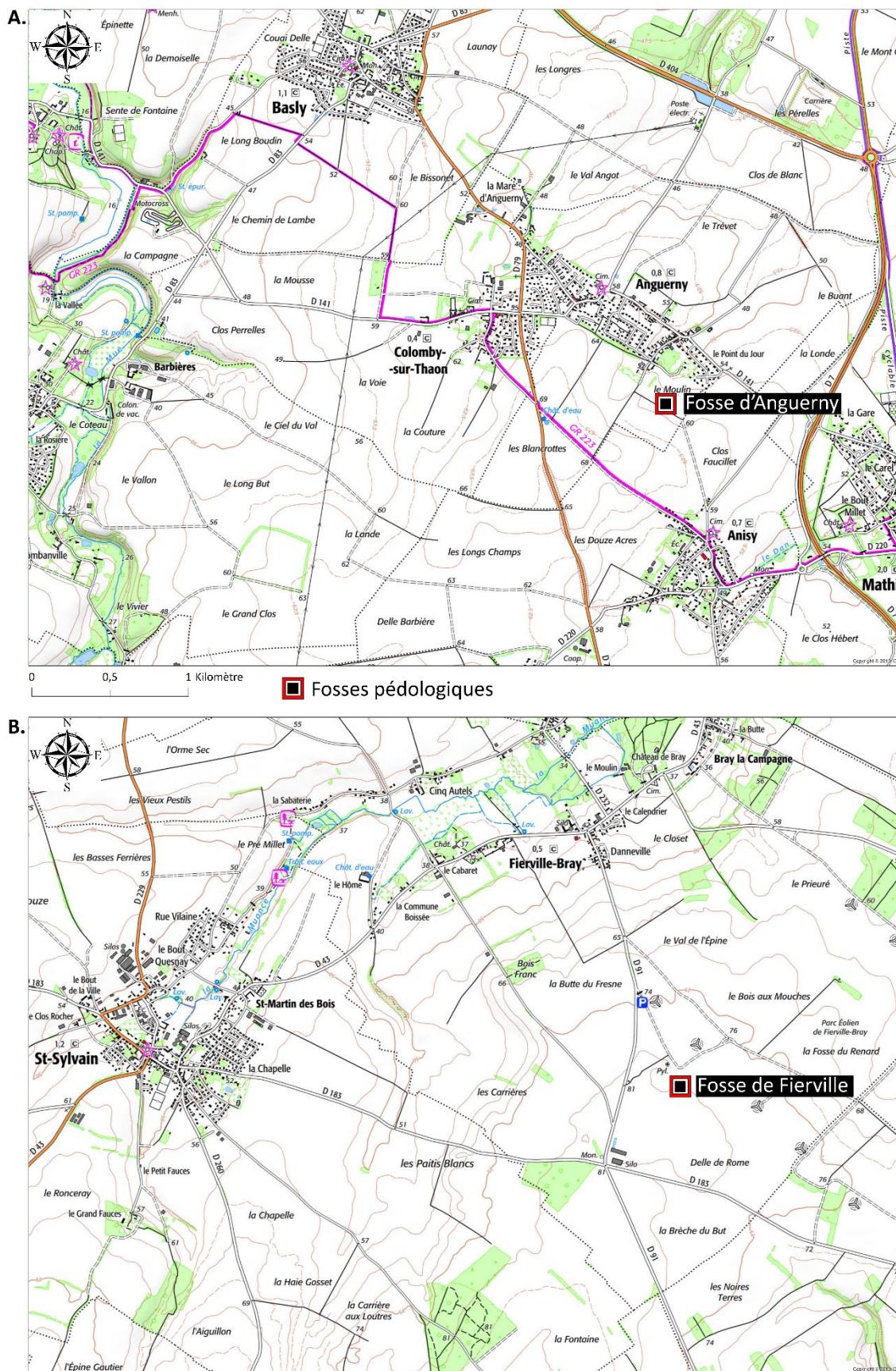
Ces deux parcelles sont le support de cultures de blé tendre d'hiver lors de l'échantillonnage et s'inscrivent dans un paysage d'espaces relativement plans et dégagés. Celle d'Anguerny se situe sur un versant à pente faible (- 2 % ; orienté vers le nord) de faible dénivelée (15 m) en bordure sud du village (**Figure 91 A**). Celle de Fierville-Bray est situé sur le plateau et est relativement plane. Les deux prélèvements ont été respectivement effectués aux altitudes de 57 et 78 m d'altitude (**Figure 91 B**).

Figure 90 : Situation des fosses pédologiques dans l'occupation du sol du Calvados



Réalisation : Beauvais., 2020 (données RPG 2012 de l'ASP et BD Topo 2016 de l'IGN)

Figure 91 : Localisation des fosses pédologiques d'Anguerny (A) et de Fierville-Bray (B) sur la carte topographique de l'IGN (Scan 25)



Le sol d'Anguerny est un BRUNISOL pachique luviq. Les BRUNISOLS ont une pédogénèse marquée « *par des altérations modérées et par une faible néogénèse des minéraux argileux secondaires et d'oxyhydroxydes de fer* » (Baize et Girard, 2008). Le premier horizon (0-30 cm) LA (labouré) est organo-minéral de couleur marron foncé et de texture Limono-sableuse. Le second horizon (30-110 cm) S (structural) est minéral, plus clair et de texture Limono-argileuse. Celui-ci se décompose dans sa partie supérieure (S1) en un horizon très faiblement éluvial entre 30 et 70 cm de profondeur (speudo E⁷¹) et dans sa partie inférieure (S2) en un horizon très faiblement illuvial entre 70 et 110 cm (speudo BT⁷²).

Il est speudo E jusqu'à 70 cm (S1) puis speudo BT⁷³ jusqu'à 110 cm (S2), expliquant le caractère luviq de ce sol où les argiles sont légèrement lessivées. Le qualificatif pachique correspond au fait que l'épaisseur totale des horizons [A+S] est supérieure à 80 cm. Ce sol repose sur un dépôt lœssique de plusieurs mètres (7 m d'après l'exploitant agricole ayant assisté à un forage géologique à 500 m de la parcelle)⁷⁴. Le sol de Fierville-Bray est un CALCOSOL leptique de couleur marron et de texture limono-sablo-argileux. Le premier horizon (0-20 cm) est LAca⁷⁵ et le second (20-30 cm) est Sca/Cca⁷⁶. Il s'est développé sur un calcaire bathonien du Jurassique moyen.

3.4.1.3. Estimation des RUM à partir du protocole RMQS2 (prélèvements, labo et calculs)

La fosse d'Anguerny est ouverte le 2 avril 2019 en condition de sol ressuyé au stade du blé épi 1 cm sur une dimension de 1x1 mètre (**Figure 92**). Le creusement est effectué à la main avec une bêche et une pelle sur une profondeur de 105 cm. Les déblais sont évacués sur les bâches disposées à

⁷¹ Les horizons E sont éluviaux. Ce sont des "*horizons organo-minéraux appauvris en fer et/ou en minéraux argileux phylliteux et/ou en aluminium, avec concentration corrélative en minéraux résistants. Ce sont des horizons d'éluviation par entrainement vertical, oblique ou latéral*" (Baize, 2008). Pour savoir s'il y a bien E puis BT, il faut calculer l'Indice de Différenciation texturale (IDT) en divisant le pourcentage d'argile de l'horizon classé en BT par le pourcentage d'argile de celui classé en E. Si l'IDT est compris entre 1,1 et 1,3 alors le sol est luviq donc ce sera toujours S1 et S2. En revanche s'il est entre 1,3 et 1,8 alors ce sera E et BT. L'IDT se calcule pour H2 et H3 car le lessivage concerne l'horizon intermédiaire et profond. Néanmoins, l'analyse granulométrique aboutit à un IDT de 1. Nous avons alors finalement retenu l'interprétation effectuée sur le terrain par Patrick Le Gouée.

⁷² Les horizons BT sont argilluviaux et sont définis de la façon suivante : "*Horizons à structuration pédologique généralisée, non formés en surface, caractérisés par une accumulation absolue de matière (essentiellement des particules argileuses) par rapport aux autres horizons présents dans le solum. Dans les horizons BT, il y a à la fois altération in situ de minéraux primaires et apports d'argiles phylliteuses en provenance d'horizons éluviaux E situés juste au-dessus d'eux ou situés plus haut sur le versant (apports illuviaux)*" (Baize, 2008).

⁷³ Les horizons BT sont argilluviaux et sont définis de la façon suivante : "*Horizons à structuration pédologique généralisée, non formés en surface, caractérisés par une accumulation absolue de matière (essentiellement des particules argileuses) par rapport aux autres horizons présents dans le solum. Dans les horizons BT, il y a à la fois altération in situ de minéraux primaires et apports d'argiles phylliteuses en provenance d'horizons éluviaux E situés juste au-dessus d'eux ou situés plus haut sur le versant (apports illuviaux)*" (Baize, 2008).

⁷⁴ Des sondages pédologiques complémentaires réalisés le 19 janvier 2019 sur la parcelle révèle la présence de ces loess jusqu'à une profondeur d'au moins de 198 cm (le matériel n'ayant pas permis d'aller plus en profondeur).

⁷⁵ Horizon labouré calcaire.

⁷⁶ Sca qualifie un horizon structural calcaire avec des éléments grossiers. Cca correspond à un horizon minéral de profondeur qui est différent des couches M ou R (roches dures meubles ou altérées constituant une discontinuité physique ou chimique à la base du solum – couche partiellement exploitée par les racines) car leurs "*constituants ont subi, dans toute leur masse, une fragmentation importante et/ou une certaine altération géochimique*". Ils diffèrent des horizons structuraux car ils n'ont pas acquis de structuration pédologique généralisée (Baize, 2008).

gauche et à droite de la face faisant l'objet du prélèvement, en séparant les horizons supérieurs et profonds, de façon à respecter au mieux la superposition des horizons lors du rebouchage. La paroi est ensuite décrite et photographiée avant les prélèvements. L'interprétation de la fosse permet de dégager cinq horizons. Trois sont compactés en raison notamment de l'intervention sur la culture précédente (arrachage des betteraves) et de la semelle de labour. En effet, une zone compactée constitue un facteur limitant pour le développement racinaire de la plante car elle est difficile à pénétrer. Sur cette fosse l'enracinement du blé observé est d'une profondeur de 50 cm (théoriquement au stade épi 1 cm, il devrait être proche d'un mètre). En tenant compte de cette interprétation et de la hauteur du cylindre (9 cm) les échantillons volumétriques pour calculer les densités apparentes (DA) sont effectués en marche d'escalier aux profondeurs suivantes : 0 - 9 cm ; 12 - 21 cm ; 22 - 31 cm ; 32 - 41 cm ; 58 - 67 cm ; 80 - 89 cm. La méthode au cylindre (500 cm³ ; norme NF ISO 11272 -Détermination de la masse volumique apparente sèche) est adaptée aux sols dont la charge en éléments grossiers est inférieure à 10 % (Jolivet et *al.*, 2018). Il est enfoncé verticalement dans le sol à l'aide d'un maillet et est ensuite dégagé à l'aide d'un couteau et d'une spatule. Les deux extrémités du cylindre sont ensuite arasées avec le couteau avant de vider le contenu dans le sachet de prélèvement. Les mottes de sol non remaniées d'environ 10 cm³ sont ensuite extraites délicatement de mottes d'un volume beaucoup plus important aux profondeurs suivantes : 0 - 25 cm ; 30 - 50 cm ; 32 - 41 cm ; 50 - 75 cm ; 75-100 cm. La prise en compte des mottes est nécessaire car suivant leur niveau de compaction, le réservoir en eau peut différer.

Figure 92 : Protocole d'échantillonnage de la fosse pédologique d'Anguerny le 2 avril 2019



Photographies : Patrick Le Gouée, Augustin Sallent et François Beauvais, le 02 avril 2019

Pour le site de Fierville-Bray, les prélèvements ont été effectués le 29 juin 2020 en profitant d'un profil cultural dégagé sur une longueur de 100 m lors de la construction d'un hangar de stockage (**Figure 93**). Le profil a été rafraîchi avant d'effectuer les prélèvements sur 30 cm, soit l'épaisseur du sol. Ce dernier étant composé d'une forte charge en éléments grossiers, les prélèvements volumétriques sont effectués à l'aide de la méthode au sable correspondant aux normes NF X 31-503 (Mesure de la masse volumique apparente - Méthode au sable) et NF ISO 11272 (Détermination de la masse volumique apparente sèche). Le sable a l'avantage de s'ajuster à la surface de la cavité qui n'est pas totalement plane. Les prélèvements sont effectués aux profondeurs : 0 - 10 cm ; 8 - 16 cm ; 20 - 27 cm. L'excavation engendrée par l'échantillonnage est comblée par le sable qui fait ensuite l'objet d'une pesée. Sachant qu'1mL de sable utilisé équivaut à 1,656 g, il est alors possible de retrouver le volume de sol prélevé en multipliant le poids total de sable. Le prélèvement des mottes aux profondeurs 0-20 cm et 20-30 cm est effectué le 13 octobre 2020 en conditions hydriques de sol proches de la capacité au champ.

Figure 93 : Protocole d'échantillonnage de la fosse pédologique de Fierville-Bray le 29 juin 2020



Photographies : François Beauvais et Patrick Le Gouée, le 29 juin 2020

Sur le terrain les mottes sont ensuite disposées dans des boîtes en plastique rigide hermétiques. De retour au laboratoire elles sont conservées en chambre froide avant d'être expédiées à l'Unité de Science du Sol de l'INRAE Orléans. Les déterminations sur ces échantillons (mottes de 5 à 10 cm³) permettent de mesurer les quantités d'eau retenues à des valeurs particulières de potentiel matriciel de l'eau à l'aide d'une presse à membrane (Richards, 1941) pour les pF 2,0, et d'un extracteur à plaque en céramique poreuse (même principe que Richards) pour les pF 4,2, selon le protocole correspondant à l'ancienne norme Afnor X31-505. Le temps d'équilibre aux potentiels fixés est de 7 jours. La teneur en eau pondérale (ou massique) du sol résulte de la différence entre la masse humide, à un potentiel donné (en kPa) et la masse sèche (à 105°C) [g/100 g sec], (Baize et al., 2013). Le volume massique sur mottes (densité apparente) est déterminé à la capacité au champ et à l'issue des pF 2,0 et 4,2 par la méthode au pétrole, après imbibition des mottes dans le pétrole, selon le principe de la poussée d'Archimède.

Formule utilisée pour le calcul de la densité apparente est la suivante :

$$Da = \frac{m_s \times p_p}{m_p \times p_w}$$

Avec :

m_p : masse de pétrole déplacé par l'échantillon(g)

m_s : masse de l'échantillon sec à 105°C (g)

p_p : masse volumique du pétrole (g.cm3)

p_w : masse volumique de l'eau(1g.cm3)

Les mesures sont effectuées sur 8 répétitions par horizon pour l'humidité au prélèvement et aux pF 2,0 et 4,2. Selon Al Majou et al (2008) l'humidité du sol mesurée en laboratoire la plus proche des conditions de terrain à la capacité au champ correspond au potentiel hydrique à -10 kPa (pF = 2,0), ce qui est également confirmé par nos mesures (**Tableau 23**). L'humidité correspondant au point de flétrissement est de -1580 kPa (pF = 4,2).

Tableau 23 : Humidité w terrain, pF 2,0 et 4,2 (humidité pondérale) pour les sites d'Anguerny et de Fierville-Bray déterminées à l'aide de la presse à membrane et de l'extracteur à plaque (moyenne des 8 répétitions)

Horizons (cm)	Terrain	pF 2,0	pF 4,2
	Humidité w (g/100g sec)		
Anguerny			
0-25	21,25	20,41	8,79
30-50	20,00	20,28	8,39
50-75	20,36	20,32	8,58
75-100	22,87	20,98	9,12
Fierville-Bray			
0-20	35,09	34,55	18,00
20-30	28,56	25,34	16,35

Parallèlement, les densités apparentes (**Tableau 24**) effectuées avec des cylindres de 500 cm³, sont déterminées au laboratoire LETG Caen avec la participation de Marie-Paule Bataillé (assistante ingénieure). Après avoir été émiétés, pour optimiser le séchage, les échantillons sont mis en étuve à 105°C durant 48h. Leur masse sèche est divisée par le volume du cylindre.

Tableau 24 : Valeur des densités apparentes en g/cm³ des prélèvements effectués à Anguerny (02 avril 2019) et Fierville-Bray (29 juin 2020)

Profondeur (cm)	Numérotation	Valeur DA (g/cm ³)
DA Anguerny		
0 - 9	DA1A	1,27
12-21	DA2A	1,37
22 - 31	DA3A	1,39
32 - 41	DA4A	1,41
58 - 67	DA5A	1,49
80 - 89	DA6A	1,4
DA Fierville-Bray		
0 - 10	DA1F	1,31
8 - 16	DA2F	1,28
20 - 27	DA3F	1,26

Le RUM (**Tableau 25**), soit le calcul de la quantité maximale accessible aux plantes pour un sol donné est calculé à partir de la formule suivante (Baize, 2000) :

$$\text{RUM} = (\text{pF } 2,0 - \text{pF } 4,2) \times \text{DA} \times \text{E}$$

Avec :

pF 2,0 : humidité pondérale à la capacité au champ en %

pF 4,2 : humidité pondérale au point de flétrissement en %

Da : densité apparente

E : épaisseur de sol en dm

Hervé Gaillard (technicien de recherche à l'INRAE), qui a effectué les mesures pF sur mottes, préconise, pour le calcul du RUM, de retenir les valeurs obtenues à pF 2,0. La part en éléments grossiers (> 2 mm) du sol de ce site a ensuite été retranchée : 52 % de 0 à 10 cm ; 55 % de 10 à 20 cm et 56 % de 20 à 30 cm.

Le RUM sur la totalité du profil de sol d'Anguerny, d'une profondeur de 105 cm, est de 209 mm. La profondeur maximale théorique de l'enracinement du blé est de 110 cm pour un sol limoneux sans facteur limitant (Gate, 1995). En extrapolant le réservoir mesuré entre 100 et 105 cm à la portion 105-110 cm, le RUM est alors de 219 mm. Toutefois, lors de l'analyse du profil de sol, le tassement du sol lié au précédent cultural (betteraves) engendre un facteur limitant au développement racinaire en profondeur. Au stade épi 1 cm, le blé a atteint 90 % de son potentiel d'enracinement. Par conséquent, sur une base de 55 cm le RUM est alors de 95,7 mm. A Fierville-Bray, l'enracinement de la plante étant limité par la faible épaisseur du sol et la forte charge en élément grossier, le RUM est de seulement 32 mm.

Tableau 25 : Ensemble des variables mesurées par tranche de sol recoupées à partir des valeurs de DA et des prélèvements de mottes avec le RUM calculé correspondant

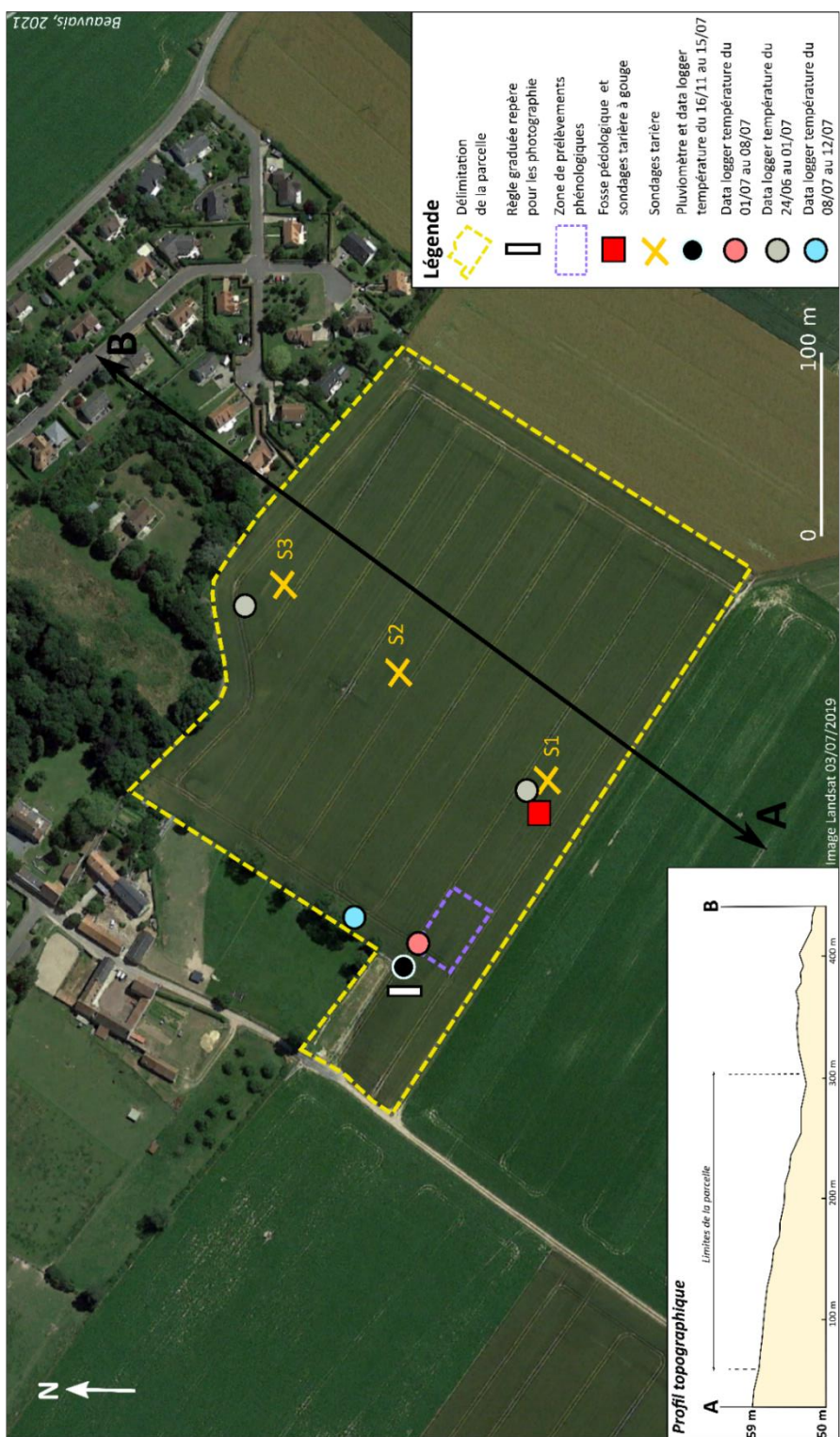
Profondeur (cm)	Epaisseur (cm)	DA (g/cm ³)	mm eau/cm sol	Charge en éléments grossiers en % (>2 mm)	RUM (mm)
Anguerny RUM = 209 mm					
0 à 10	10	1,27	1,73	0	17,3
10 à 20	10	1,37	1,89	0	18,9
20 à 25	5	1,39	1,93	0	9,65
25 à 30	5	1,39	1,93	0	9,65
30 à 40	10	1,41	2,01	0	20,1
40 à 50	10	1,41	2,01	0	20,1
50 à 60	10	1,49	2,12	0	21,2
60 à 70	10	1,49	2,12	0	21,2
70 à 75	5	1,49	2,12	0	10,6
75 à 80	5	1,49	2,15	0	10,75
80 à 90	10	1,4	1,99	0	19,9
90 à 100	10	1,4	1,99	0	19,9
100 à 105	5	1,4	1,99	0	9,95
Fierville-Bray RUM = 32 mm					
0 à 10	10	1,31	2,77	52,2	14,1
10 à 20	10	1,28	2,69	55,1	12,1
20 à 30	10	1,26	1,28	55,7	5,7

Les données pédologiques en entrée du modèle du bilan hydrique sont donc issues de relevés de terrain. Deux RUM sont estimés à partir de prélèvement dans deux parcelles agricoles représentatives des sols du nord-ouest et du sud-est de la Plaine de Caen. Les échantillons sont ensuite analysés en laboratoire.

3.4.2. Instrumentation d'une parcelle agricole : observation phénologique, climatique et pédologique

Afin d'obtenir les sommes de températures relatives au blé, des relevés de températures et phénologiques ont été effectués sur une parcelle que nous avons instrumentée. Elle a également été le cadre d'un suivi de l'évolution de la RUD (Figure 94).

Figure 94 : Localisation des instruments de mesures et des relevés effectués dans la parcelle d'Anguerny (14)



3.4.2.1. Présentation de la parcelle agricole

La parcelle étudiée se situe au nord-ouest de Caen au sein de l'exploitation d'Éric Lemarinier. Sa distance à la mer est de 7 km. Elle est recouverte d'un sol épais de texture limo-argileuse, reposant sur plusieurs mètres d'épaisseur de lœss. Elle s'étend sur une surface de 68 110 m² (6,8 Ha). Elle est bordée au nord par un boisement (sur une longueur de 168 m), au nord-est par des pavillons entourés d'une haie (sur 130 m), à l'est et au sud par des champs ouverts (sur 630 m) et à l'ouest par une prairie bordée de quelques arbres (sur 230 m) – (Figure 95).

Figure 95 : Environnement de la parcelle d'Anguerny à 360°



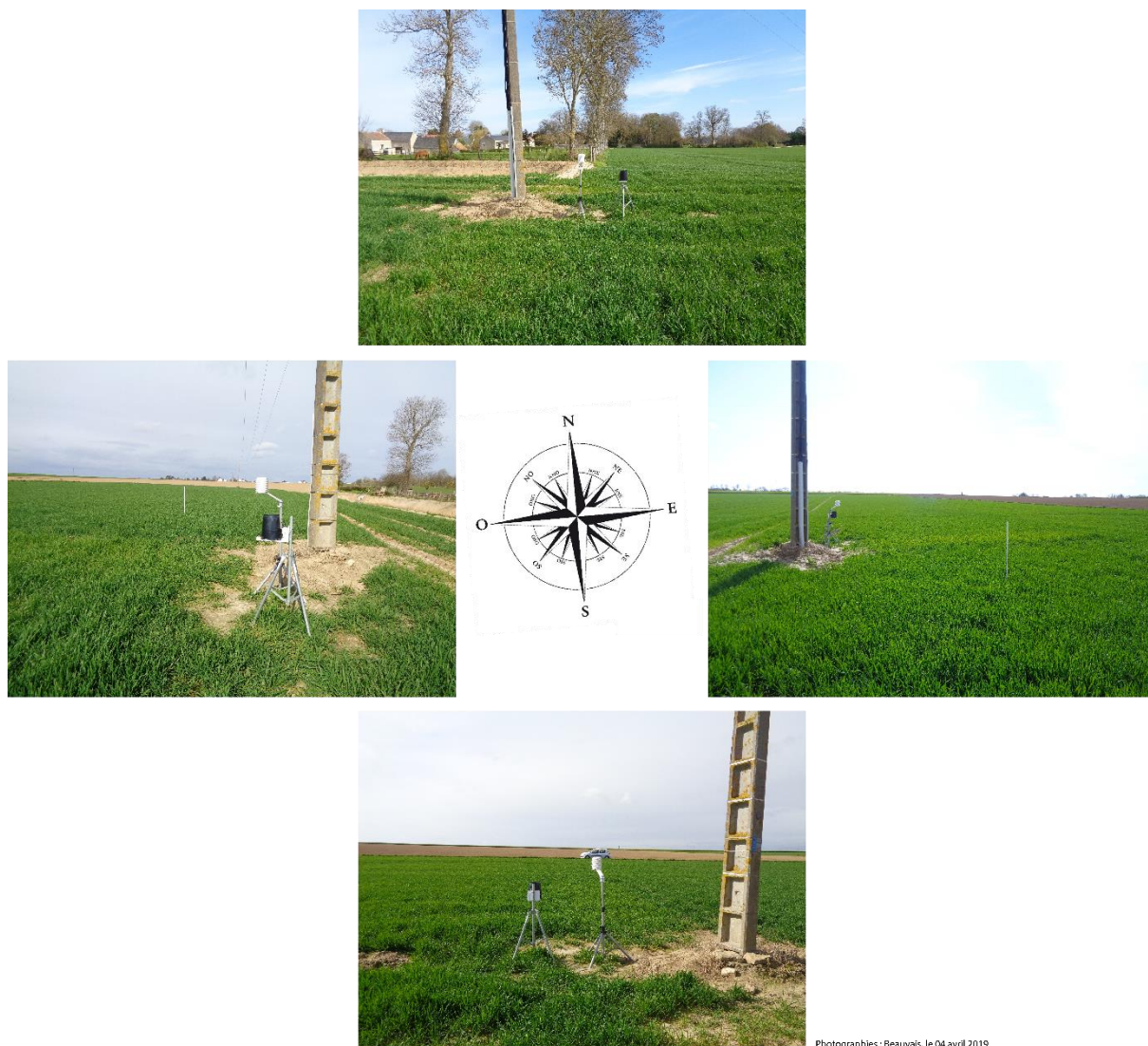
Plusieurs éléments justifient le choix de cette parcelle :

- Semis de blé tendre d'hiver sur le cycle 2018-2019 ;
- Sol représentatif de la couverture pédologique des plateaux limoneux du nord de Caen (cf. partie 3.2) ;
- Exploitant agricole ayant accepté que sa parcelle fasse l'objet d'une instrumentation ;
- Ruelle débouchant sur la parcelle et permettant de stationner le véhicule et d'accéder sans prendre le risque d'embourber le véhicule en période de surplus hydrologique.
- Proximité avec le laboratoire (10 km).

3.4.2.2. Disposition du pluviomètre et du data logger température - hygrométrie

La parcelle est située à 8 km de la station Météo-France littorale de Bernières-sur-Mer et à 10 km de celle de l'aéroport de Caen-Carpique. Pour avoir des relevés dans la parcelle agricole, un pluviomètre à bascule (auge) et un enregistreur thermo-hygrométrique Wisemann Klein Datalogger WK 057 fixé dans un abri hélicoïdal Barani type standard ont été implantés le 16 novembre 2018 (le lendemain du semis) à l'ouest de la parcelle, à 3,5 et 2 m d'un poteau téléphonique (Figure 96). Il constitue l'obstacle le plus proche en direction du nord-ouest. Les arbres délimitant la prairie voisine sont situés à 21 m au nord des instruments. Aucun autre obstacle majeur n'est présent autour de la station. En effet, ils sont à une distance de 280 m au nord-est (pavillons bordant tout le côté nord de la parcelle), 1000 m à l'est (arbres de la route D.7), 800 m au sud-est (village d'Anisy) et 600 m au nord-ouest (pavillons). Le choix de cet emplacement a été fait avec l'exploitant pour ne pas occasionner de gêne pour l'accès à la parcelle en dehors de la zone de pulvérisation pour ne pas biaiser les relevés pluviométriques.

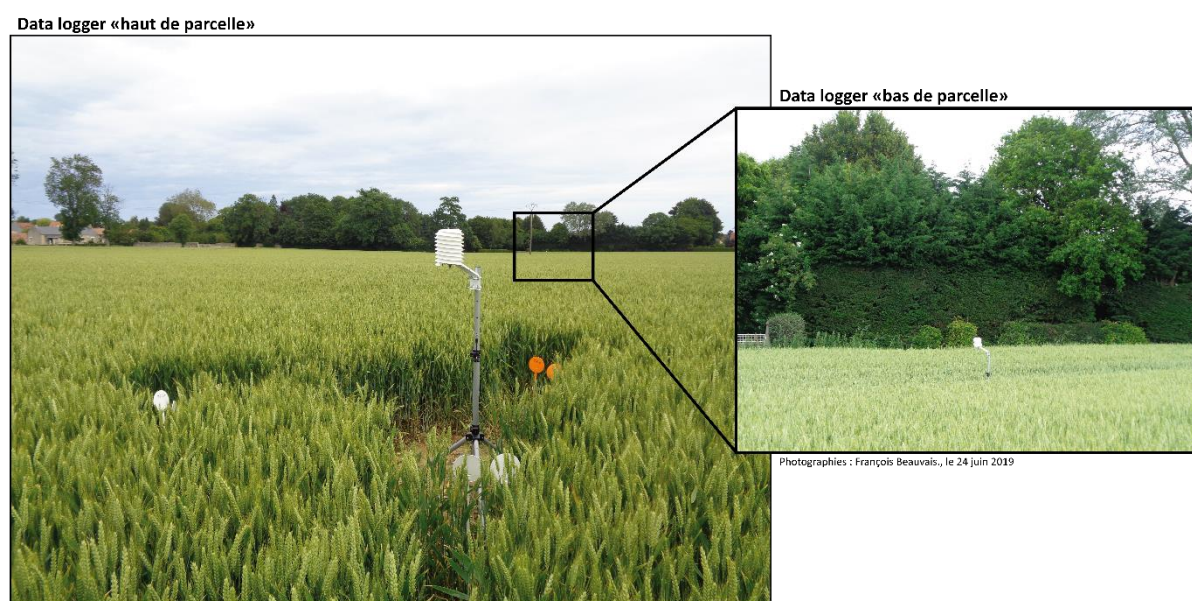
Figure 96 : Environnement de l'enregistreur de température BARANI et du pluviomètre



Les mesures sont enregistrées toutes les 6 minutes pour le pluviomètre et toutes les 10 minutes pour la température. Deux ruptures dans les données de l'enregistreur de température hygrométrie ont été constatées. La première concerne les journées du 28 et 29 novembre 2018. Les données de Caen-Carpiquet ont complété ces deux journées manquantes. Par ailleurs, un deuxième enregistreur a été disposé en bas de la parcelle pour étudier d'éventuelles différences de température lors des gelées. Cependant l'enregistreur de référence situé à proximité du poteau téléphonique a fait l'objet d'un vol. Celui du bas n'ayant pas fait l'objet de vandalisme, la période manquante pour l'enregistreur de référence du 12 février au 1^{er} mars 2019 a été remplacée par celles de l'enregistreur du bas de la parcelle. La comparaison haut-bas de la parcelle (que l'on suppose malgré tout minime) ne peut néanmoins avoir lieu. Le matériel étant retiré le 15 juillet 2019, les données météorologiques des 15 derniers jours du cycle (entre la maturité physiologique et maturité récolte) sont celles de Caen-Carpiquet.

Ce type de comparaison haut-bas a également été effectué (cette fois-ci sans vandalisme) du 24 juin 13h UTC au 1^{er} juillet 15h10 UTC pour connaître la différence de température lors des journées de chaleur (**Figure 97**). Pour cela, un abri météo a été disposé au niveau de la fosse pédologique et un autre en bas de la parcelle. Le dénivelé entre ces deux points de mesure est de 6 m.

Figure 97 : Disposition des data logger en haut et en bas e la parcelle



Les enregistreurs de température sont à chaque fois fixés à une hauteur de 1,50 m, soit dans les gammes préconisées (entre 1,25 et 2 m) par l'OMM (2008).

Par ailleurs, ces data loggers ont également été mobilisés pour d'autres mesures dans la plaine agricole, en itinérance afin de réaliser des transects de températures. Ils sont présentés dans le chapitre 7.

3.4.2.3. Observation phénologique

L'observation de la phénologie a été réalisée à proximité de l'enregistreur de température, à chaque fois dans la même zone. Certains stades sont observables sans prélèvements (épiaison, floraison) tandis que d'autres (épi 1 cm, 2 nœuds, méiose, ...) nécessitent de disséquer les plants de blé. Les stades ont été déterminés selon le protocole exposé par Gate (1995 ; **Tableau 26**). La date d'observation de ces stades phénologiques permet ensuite de calculer la somme de température (base 0°C écartée à 28°C) nécessaire à leur apparition.

Tableau 26 : Détermination des stades phénologiques selon le protocole d'observation de Gate (1995)

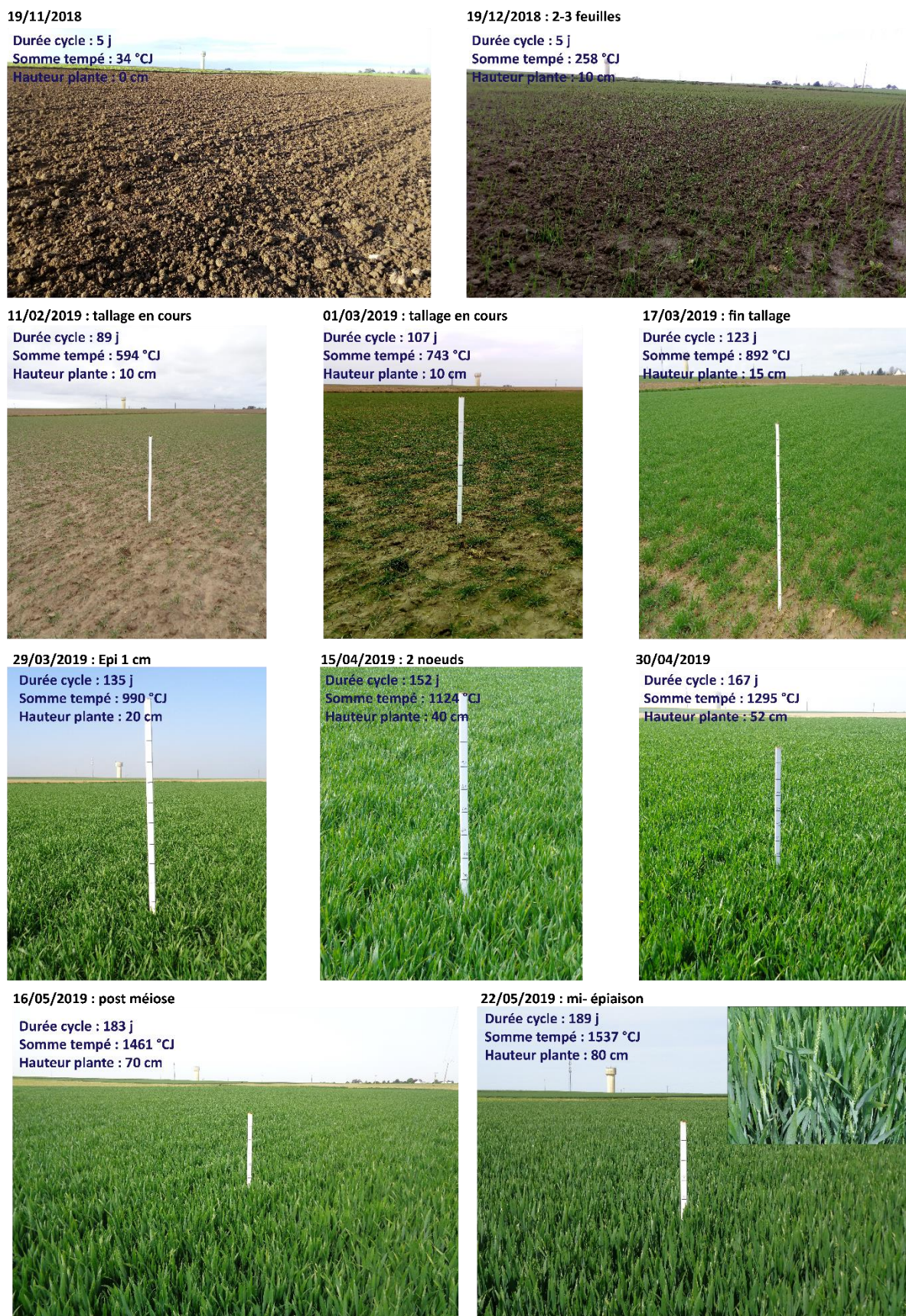
Stade	Echelle BBCH (Witzemberger et al., 1989 ; Lancashire et al., 1991)	Description agronomique (Gate, 1995 et 2003)	Observation (Gate, 1995)
Levée	10	"Le coléoptile a dépassé le niveau du sol, la première feuille perce son sommet et sort par le pôle apical".	"En condition de semis et de levée homogène : la date de levée correspond à celle où la majorité des lignes de semis sont visibles".
Début tallage	21	"La plante possède trois à quatre feuilles, une nouvelle tige (talle primaire) apparaît sur le maître-brin à l'aisselle de la feuille la plus âgée".	"Prélever 40 plantes en dehors du passage des roues et des zones de bordures. La date du début tallage correspond à celle où 50 % des plantes ont une talle".
Epi 1 cm	30	"Les plantes se redressent. C'est la fin du tallage herbacé (arrêt de l'émission de talles). La tige principale et les talles les plus âgées s'allongent".	Prélever 40 plantes en fendant le maître brin à l'aide d'un cutter. "Le sommet de l'épi doit être à 1 cm du plateau de tallage sur le maître brin".
2 nœuds	32	"La tige, constituée essentiellement de nœuds empilés à l'origine, grandit par élongation des premiers entre-nœuds".	"L'entre-nœud situé au-dessus du premier nœud a une longueur supérieure à 2 cm" et cela concerne 50% des plantes.
Méiose pollinique	-	"La méiose est un événement cellulaire primordial qui se produit dans l'épi mais qui coïncide avec un stade morphologique de la plante. Le sommet de l'épi atteint la ligule de l'avant dernière feuille. Ce stade correspond en général à la méiose mâle (pollinique)". Ce stade précède le gonflement de l'épi.	"Prélever 30 tiges appartenant à la strate dominante, disséquer les tiges, 50% du sommet des épis touchent la ligule de l'avant dernière feuille. Le limbe de la dernière feuille est parfaitement déployé".
Epiaison	55	L'épi sort de la gaine foliaire	"50% des épis sont à moitié dégainés".
Floraison	65	"Les glumelles des fleurs s'ouvrent largement et les sacs polliniques sortent hors de la fleur"	"Les premières étamines sortent des épillets sur 50% des épis de la parcelle".
Stade laitieux	73	"Les téguments du grain sont formés. La taille potentielle du grain est déterminée. Le grain est vert"	"Le grain occupe la totalité de la cavité florale. Son contenu est surtout liquide".
Stade pâteux	83	"Le PMG est acquis par suite du remplissage des enveloppes. Le stade pâteux correspond à la fin de la migration des réserves. Le grain commence à jaunir".	"Grain difficilement écrasable entre les doigts forme une pâte blanchâtre. Il peut en revanche être fendu facilement avec les ongles".
Maturité physiologique	89	"C'est le stade clé qui marque la fin de la période de remplissage des grains. Le grain a atteint sa teneur maximum en matière sèche. Le poids des grains et leur teneur en protéines sont acquis. Leur teneur en eau est proche de 40 %. Le grain durcit et sa coloration passe du vert au jaune".	"Le grain ne peut plus être fendu par l'ongle mais il peut être coupé avec un scalpel".
Maturité récolte	-	"Le grain se casse quand on tente de le couper avec un scalpel". Date de maturité aussi selon la météo pour éviter d'avoir un taux d'humidité des grains > à 16% (sans quoi la récolte n'est pas acceptée à la collecte).	

Pour illustrer l'évolution de la phénologie sur cette parcelle, il est possible de se référer aux illustrations des **Figure 98** et **Figure 99** qui constituent un extrait de photographies réalisées sur le terrain. Elles exposent les principaux stades qui se sont succédés. Le blé a été semé le 15 novembre. 37 visites de la parcelle ont eu lieu pour surveiller l'évolution de la phénologie, soit un rythme moyen d'un passage par semaine. Néanmoins, l'observation a été resserrée, tous les 5,4 jours pour la seconde moitié du cycle (à partir du stade épi 1 cm). Du semis à la fin du tallage, les visites furent

plus espacées (tous les 13 jours en moyenne) puisque le tallage est une période phénologique qui s'étend sur plusieurs mois (de décembre à fin mars). Initialement, une caméra de type piège photographique avait été installée le 11 février 2019. Cependant, ce suivi n'a pu être réalisé puisque ce matériel a fait l'objet d'un vol quelques jours après son installation. Pour archiver le suivi, des photographies⁷⁷ ont été réalisées lors de chaque visite. L'observation des stades phénologiques a été effectuée selon les méthodes exposées par Gate (1995).

⁷⁷ Une règle graduée tous les 10 cm a été installée. La hauteur de la plante ne permet pas d'estimer le stade phénologique mais l'idée était ici d'avoir un point de repère pour archiver l'ensemble des photos et illustrer la pousse des plants de blé

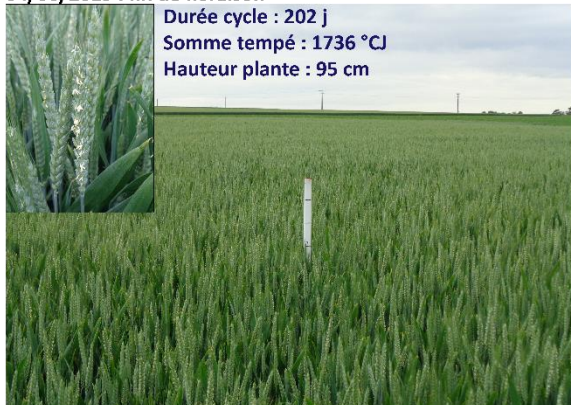
Figure 98 : Evolution de la pousse des plants de blé tendre de la germination à la fin du tallage



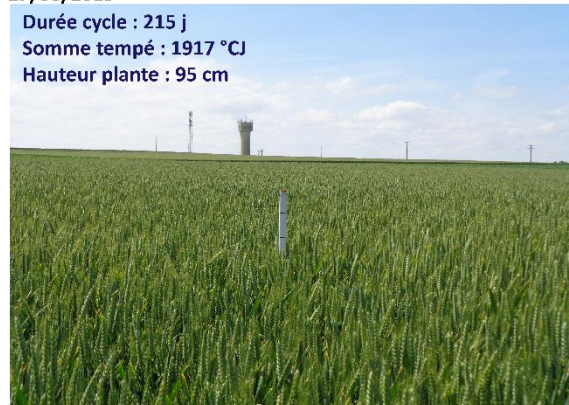
Photographies : François Beauvais, 2018 & 2019

Figure 99 : Evolution de la pousse des plants de blé tendre de la germination à la fin du tallage

04/06/2019 : fin de floraison



17/06/2019

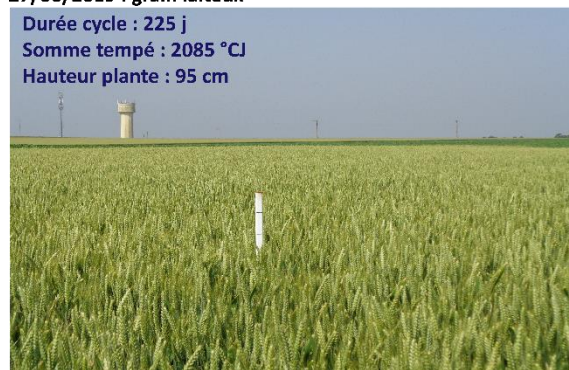


Photographies : François Beauvais, 2019

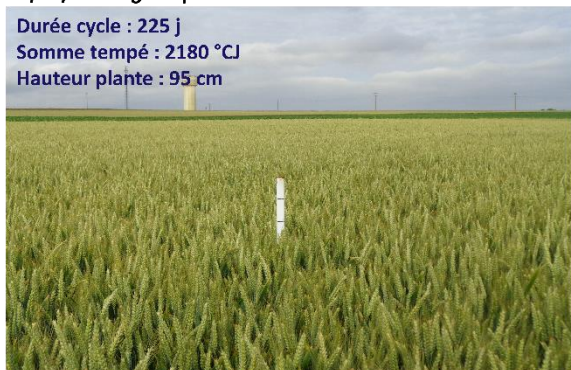
24/06/2019 : grain laiteux



27/06/2019 : grain laiteux



02/07/2019 : grain pâteux



15/07/2019 : grain pâteux



20/07/2019 : maturité physiologique



02/08/2019 : Maturité récolte



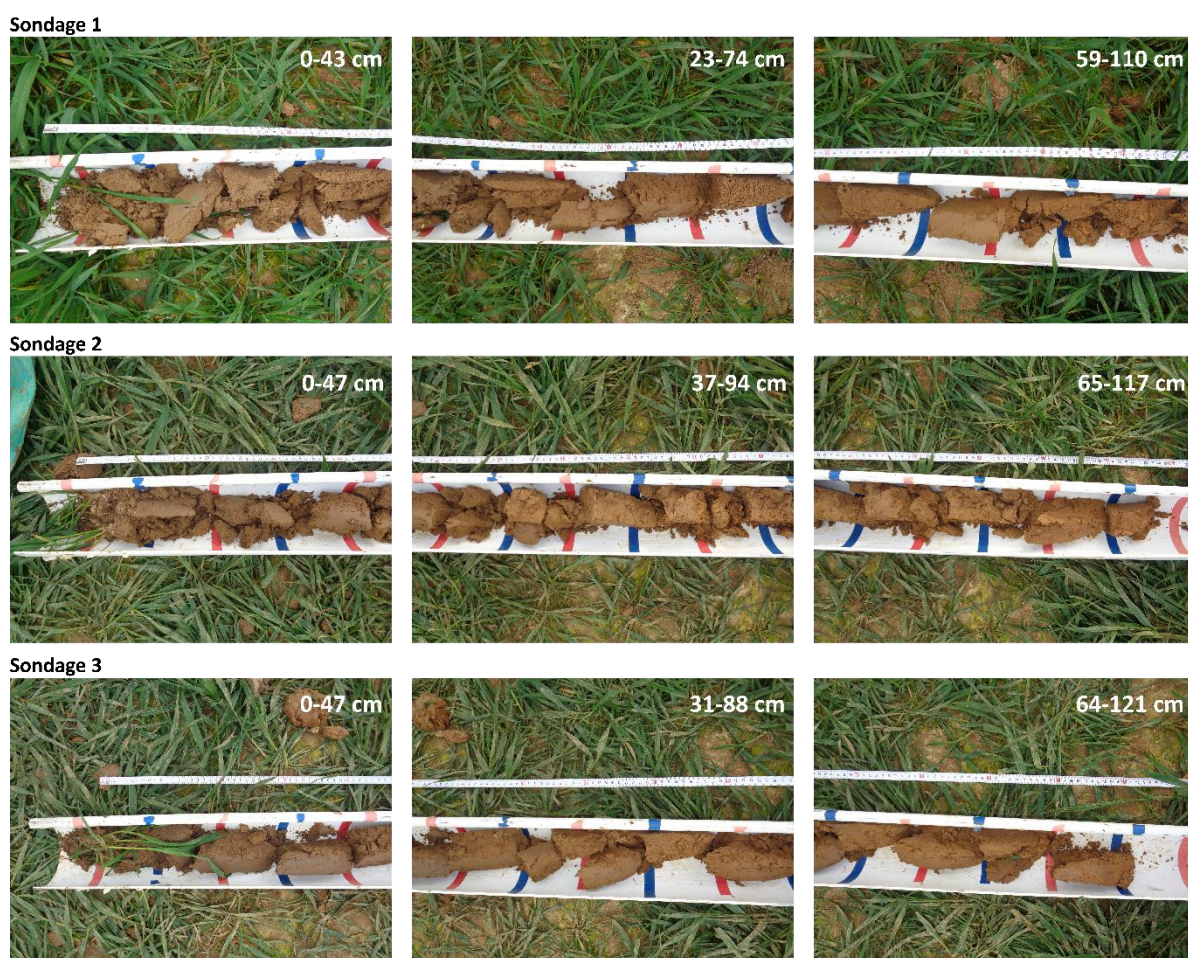
Photographies : François Beauvais, 2019

3.4.2.4. Un RUM homogène sur l'ensemble de la parcelle : sondages exploratoires

La zone investiguée étant en légère pente, nous avons voulu vérifier la présence d'une possible variation de la pédologie le long du versant, qui dans ce cas pourrait engendrer des RUM différents et ainsi biaiser les observations phénologiques effectuées à l'échelle parcellaire. Si les stades pour déterminer les sommes de températures de référence sont observés à chaque fois sur une même délimitation, d'autres observations ont été menées dans la parcelle. Pour cela nous avons effectué trois sondages (**Figure 100**) à l'aide d'une tarière à main Edelman (diamètre de 7 cm). Le sondage 1 est effectué en haut de parcelle à proximité de la fosse, un 2^e à mi-pente et le 3^e en partie basse. Pour ces trois sondages, nous avons fait le choix de nous appuyer sur des analyses granulométriques et les règles de pédotransferts puisque le but est ici de comparer les trois RUM. Les sols ont été qualifiés sur le terrain par Patrick Le Gouée.

Le 1^{er} sondage donne les caractéristiques du BRUNISOL pachique luvique présenté en partie 3.2. Le 2^e présente un NEOLUVISOL à caractère redoxique (horizon BT^g⁷⁸ 70-110 cm) en raison d'une hydromorphie présente entre 50 et 80 cm. Il n'est pas pachique car BT apparaît à plus de 80 cm de profondeur. Le 3^e est un BRUNISOL pachique, qui contrairement au premier n'est pas luvique car il n'y a pas de lessivage des argiles.

Figure 100 : Photographies des trois sondages tarières réalisés sur la parcelle d'Anguerny



Sondages tarières : BEAUVAIS François, SALLET Augustin et LE GOUEE Patrick le 02 avril 2019

⁷⁸ Lorsqu'un horizon BT présente des caractères rédoxiques (traces d'oxydo-réduction).

Les échantillons sont d'abord séchés à l'air libre (étuve à 30 °C maximum), broyés et tamisés à 2 mm. La destruction de la matière organique s'effectue à l'aide de l'eau déminéralisée à froid et en mettant l'échantillon à chauffer à 70°C jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'effervescence. Le dispersant est ajouté, avec de l'eau déminéralisée, avant de disposer l'échantillon sur l'agitateur rotatif. Le contenu est ensuite transvasé dans une allonge et auquel 100 mL de l'eau déminéralisée sont ajoutés une nouvelle fois. La texture des horizons est ensuite déterminée à l'aide de la technique de la pipette de Robinson dont la manipulation s'établit selon la loi de Stoke, selon laquelle, « *plus une particule est grosse et plus elle tombe vite dans l'eau, en sachant que la température de l'eau influe sur cette vitesse* » (Baize, 2000). Trois prélèvements de 20 mL récoltés dans des coupelles seront réalisés à l'aide de la pipette de Robinson pour une température de l'eau de 20 °C au bout de : 42 secondes pour les limons fins et gros, 4 minutes et 22 secondes pour les argiles et les limons fins, et 7 heures et 16 minutes pour les argiles. Un tamisage des sables (50 microns) est réalisé. Après avoir mis à sécher les coupelles à l'étuve (105°C), elles seront pesées afin d'établir la différence avec leur poids à vide. Ainsi, nous obtenons le poids des particules d'argiles, de limons et de sable. Ramenée au poids total leur part dans celui-ci est connue.

Les résultats sont ensuite reportés sur le diagramme de Jamagne (1977) pour déterminer la texture de l'échantillon en fonction de la proportion d'argiles, de limons et de sables. A partir des règles de pédotransfert (Bouma, 1989) il est possible de déterminer le RUM. A chaque texture correspond un coefficient pour le réservoir en eau utilisable qui est multiplié par l'épaisseur de l'horizon (Baize, 2000). Sans la prise en compte des densités apparentes, les RUM sont de 204 mm pour le premier sondage, 215 mm pour le deuxième et 201 mm pour le troisième (**Figure 101**). Par conséquent, la réserve utile pour le blé est homogène entre le haut et le bas de la parcelle.

Figure 101 : Caractéristiques pédologiques des trois sondages tarière à main réalisés sur la parcelle

Code horizon	Profondeur (cm)	Nom de l'horizon	Nom du sol	Texture	Réservoir mm d'eau/cm de sol	RUM horizon (mm)
<i>Sondage 1 RUM = 204 mm</i>						
AS1H1	0-30	LA	BRUNISOL pachique luvique	LMS	1,60	48
AS1H2	30-70	S1 pseudo E		LA	1,95	78
AS1H3	70-110	S2 pseudo BT		LA	1,95	78
<i>Sondage 2 RUM = 215 mm</i>						
AS2H1	0-30	LA	NEOLUVISOL à caractère redoxique	LA (limite LMS et LM)	1,95	58,5
AS2H2	30-70	E		LA	1,95	78
AS2H3	70-110	BTg		LA	1,95	78
<i>Sondage 3 RUM = 201 mm</i>						
AS3H1	0-30	LA	BRUNISOL pachique	LAS	1,75	52,5
AS3H2	30-80	S1/E		LMS	1,80	90
AS3H3	80-110	S2/BTg		LA	1,95	58,5

3.4.2.5. Relevés pédologiques pour suivre l'évolution de la RUD

Nous avons vu précédemment que le bilan hydrique est une simplification du système complexe atmosphère-plante-sol et de ses interactions (Cantat *et al.*, 2009). Le bilan hydrique à décroissance exponentielle avec un seul réservoir permet de dégager une tendance du dessèchement du sol. Il est suffisant pour notre étude qui vise à évaluer des tendances pour la moyenne et la variabilité du déficit hydrique pour la plante d'ici 2100. Même si cette technique d'analyse a déjà fait ses preuves dans plusieurs travaux, nous avons tout de même souhaité en estimer les limites. Le but est de

comparer la RUD simulée avec le bilan hydrique et celle directement mesurée à partir de relevés au champ.

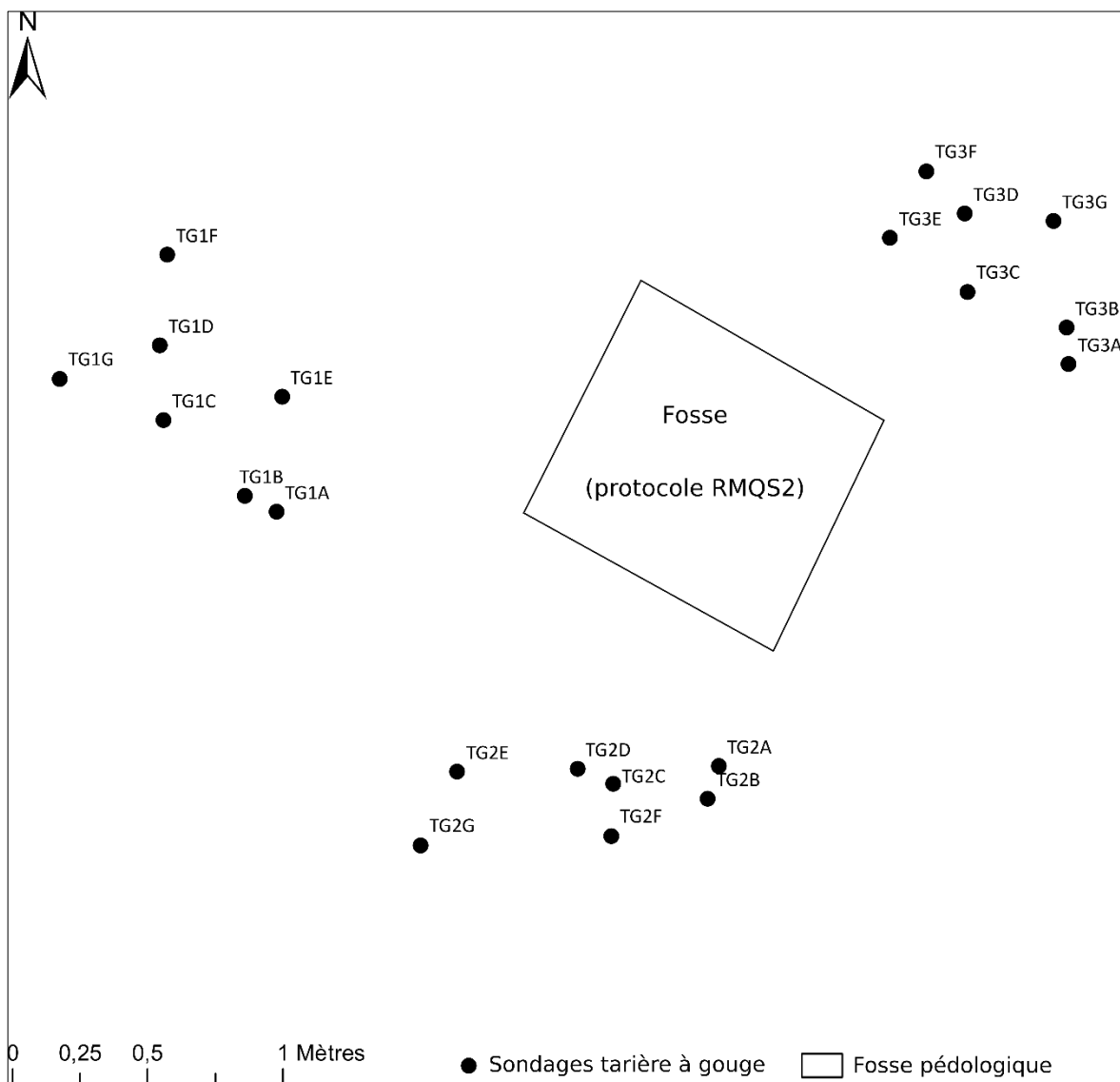
Des prélèvements in situ ont donc eu lieu dans la parcelle à l'aide d'une tarière à gouge⁷⁹ (**Figure 102**). L'avantage de ce matériel est qu'une partie du tube, lorsqu'il est enfoncé, est protégée des frottements avec le sol. Par conséquent l'échantillon n'est pas remanié. La partie superficielle du côté ajouré de l'échantillon est découpée avec une spatule. La tarière à gouge est enfoncée dans le sol à l'aide d'une masse et retirée avec la poignée d'extraction. Une fois la carotte remontée les prélèvements sont effectués par tranche de 10 cm (de 0 à 90 cm) et enfermés dans des boîtes hermétiques. Ils sont ensuite pesés et disposés en étuve à 105°C pendant 48h (méthode gravimétrique). De nouveau pesé après le séchage, nous obtenons la teneur en eau. On passe ensuite de l'humidité pondérale à volumique en s'appuyant sur la même démarche que celle opérée pour déterminer le RUM à partir de la fosse pédologique ouverte le 2 avril 2019. A chaque date de prélèvement, trois sondages ont été menés autour de la zone ayant accueilli l'ouverture de la fosse. A chaque fois le 1^{er} prélèvement est effectué à l'ouest de celle-ci, le 2^e au sud et le 3^e au nord (**Figure 103**). Chaque prélèvement a été codé et marqué sur le terrain par un piquet. La teneur en eau moyenne des trois sondages est calculée (à condition que les trois sondages soient cohérents). Ils ont eu lieu à 6 reprises (soit 18 sondages) entre le stade 2 nœuds et la fin du remplissage des grains : 9 et 15 mai ; 04, 21 et 27 juin ; 15 juillet. Les prélèvements sont effectués de bonne heure le matin pour préserver les échantillons de l'évaporation.

Figure 102 : Sondages pédologiques à l'aide de la tarière à gouge et prélèvements



⁷⁹ Le choix de la tarière à gouge s'est imposé compte-tenu des moyens financiers dont nous disposions.

Figure 103 : Localisation des sondages effectués à l'aide de la tarière à gouge par rapport à la fosse pédologique



La parcelle d'Anguerny a été instrumentée dans le but de déterminer les sommes de températures relatives à l'apparition des stades phénologiques mais également de vérifier les écarts de températures à échelle fine entre le haut (dégagé) et le bas du champ (confiné). Elle a permis également de déterminer le RUM d'un sol limoneux, profond et sans cailloux, caractéristique de la Plaine de Caen nord. Enfin, une démarche exploratoire de suivi de la RUD est réalisée à partir de prélèvements extraits à l'aide d'une tarière à gouge.

3.5. Enquête de terrain

L'enquête en sciences sociales auprès du milieu agricole a pour but de comprendre le fonctionnement de l'agrosystème et des systèmes d'exploitation au présent, mais également au futur en abordant la notion de changement climatique. Plusieurs études ont déjà été menées en ce sens, notamment sur le soja (Arvor et al., 2009), la vigne (Barbeau et al., 2015 ; Fourment, 2016 ; Neethling et al., 2017 ; Tissot et al., 2020) ou plus largement sur l'agriculture (Michel-Guillou, 2012 ; Desnos et al., 2012).

3.5.1. Justification de la remobilisation d'une enquête réalisée en 2016

Une enquête de terrain avait déjà été réalisée en 2016 lors de la réalisation du mémoire de recherche de master 1, auprès de 17 exploitants agricoles et de deux techniciens productions végétales. Pour ce travail de thèse une enquête par entretien était prévue auprès de la filière agricole. Le travail de 2016 servant dans ce cas de base pour constituer des hypothèses et aller ensuite plus loin dans l'analyse. Cette enquête était initialement envisagée pour l'année 2019. Cependant, lors de la 2^e année de thèse nous avons préféré privilégier l'approfondissement du volet agroclimatique, l'instrumentation de la parcelle, la préparation de colloques et du premier article ainsi que la réalisation d'enseignements pour l'UFR SEGGAT. Compte-tenu de cet emploi du temps chargé, l'enquête a été re-planifiée pour 2020. Dans ce but les conseillers agricoles de la Chambre d'Agriculture départementale du Calvados ont été contactés au début du mois de mars 2020. Cette demande est restée sans réponse, malgré une relance. Les syndicats agricoles FDSEA, Jeunes Agriculteurs, Coordination Rurale et Confédération Paysanne ont été sollicités. La FDSEA a répondu favorablement et nous a renvoyé vers son représentant Plaine de Caen. Le syndicat des jeunes agriculteurs a diffusé la demande dans son réseau mais sans succès. Les autres n'ont en revanche pas donné suite. L'intérêt de contacter les conseillers agricoles se trouve dans le fait qu'ils ont une vision globale de la plaine agricole et constituent donc des personnes repères pour connaître les évolutions (aléas, pratiques, variétés, ...) qui concerne l'espace agricole. Les syndicats agricoles quant à eux ont été contactés d'une part, car nous sommes partis sur l'hypothèse qu'ils constituent une porte d'entrée pour obtenir des réponses favorables de la part des agriculteurs, et d'autre part pour connaître leur position face aux enjeux relatifs au changement climatique. D'ailleurs, le syndicat ayant pour but de représenter les agriculteurs, on peut également supposer qu'il joue un rôle lorsque des aléas météorologiques surviennent.

Les axes de cette enquête étaient les suivants :

- connaître les aléas climatiques défavorables identifiés par l'exploitant et leurs évolutions ces dernières années, ainsi que les évolutions : des rendements, des pratiques agricoles (en réponse aux évolutions l'exploitant expérimente-t-il des stratégies d'adaptation ?), des variétés, des dates de semis et de réalisation des stades phénologiques (cas d'exploitants qui pourraient noter ce qu'ils observent dans leurs parcelles) ;
- savoir si le changement climatique fait partie des craintes des exploitants agricoles ;
- présenter les résultats de recherches issus des simulations bioclimatiques et demander à l'exploitant comment il s'adapterait dans ses conditions (propose-t-il des solutions de lui-même ?

aurait-il déjà de quoi s'adapter ? préfère-t-il que les organismes agricoles lui proposent des adaptations ? est-il inquiet pour la suite de la carrière où pour les futurs exploitants ? pense-t-il qu'il n'y a pas besoin de s'adapter ?

- Etudier l'ensemble de ces éléments en fonction des zones cultivées (quelles différences entre les exploitants du secteur nord de la plaine de Caen et du secteur sud ?), du syndicat agricole ou encore des composantes sociales de l'individu (âge, niveau d'étude, expériences d'évènements climatiques défavorables, niveau de sensibilisation au changement climatique, etc.).

Il est difficile de savoir si cet échec de la mise en place d'une enquête malgré les relances est lié à un manque d'intérêt du milieu agricole envers le changement climatique ou bien si le contexte sanitaire (pandémie de la COVID-19 et confinement) en constitue la cause⁸⁰. Nous penchons plutôt pour la seconde cause puisque les syndicats agricoles (FDEA Calvados, Confédération Paysanne du Calvados et de l'Orne) furent demandeurs de communications dans le cadre du GIEC Normand. Nous avons espéré un temps la réaliser quelques mois plus tard, mais le refus de prolongation du contrat doctoral par la région Normandie⁸¹ nous a poussé à abandonner cet axe de recherche.

Pour garder une composante sociale et connaître le point de vue des exploitants agricoles, cette thèse remobilise les entretiens menés en Plaine de Caen lors du mémoire de master 1 auprès de 17 exploitants agricoles et 2 techniciens productions végétales. A ces entretiens il faut ajouter au cours de la thèse, ceux menés avec : Eric Lemarinier (exploitant agricole à Anguerny) le 31 octobre 2018 ainsi que plusieurs fois de façon informelle au cours du cycle 2018-2019 sur la parcelle instrumentée (et jusque dans la moissonneuse lors de la récolte) et le 08 avril 2021 pour observer la phénologie de deux parcelles semées avec 10 jours d'écart pour une même variété ; un représentant FDSEA le 05 juin 2020 ; un technicien production végétale de la Coopérative de Creully (déjà rencontré en 2016) le 09 juin 2020 ; Bernard Bugenne (exploitant agricole à Fierville-Bray) le 26 juin 2020. La même grille d'entretien que pour le master 1 a été appliquée en précisant davantage l'analyse sur les aléas climatiques spécifiques au blé tendre observés à partir des résultats de la thèse. Les résultats de la thèse ont ensuite été exposés à la place de la carte des déficits hydrique. Pour Eric Lemarinier, l'entretien a d'abord été structuré autour de la parcelle (présentation de l'objectif d'instrumenter une parcelle, choix de la parcelle, etc.) avant de suivre le guide d'entretien. Il s'est d'ailleurs ensuite prolongé sur la parcelle. Il en va de même pour Bernard Bugenne dans le cadre de l'ouverture de la fosse pédologique à Fierville-Bray sur une de ses parcelles. Aussi, il convient d'ajouter que plusieurs informations ont été régulièrement remontées⁸² (dates des stades, observations diverses, récolte, ...) en 2^e partie de thèse par Augustin Sallent. Ce dernier d'abord ingénieur d'étude au laboratoire LETG Caen (ce qui explique sa participation aux analyses de terrain) est devenu ensuite ouvrier agricole dans l'exploitation d'Eric Lemarinier.

⁸⁰ Lors des prises différentes prises de contact nous avons pourtant précisé que les entretiens pouvaient avoir lieu par téléphone.

⁸¹ Les thèses impactées par la situation sanitaire pouvaient faire l'objet d'un prolongement de contrat doctoral.

⁸² Il ne s'agit pas ici d'entretiens sociologiques mais de discussions régulières lors de moments amicaux extérieurs au cadre du travail, mais qui indirectement participent à une meilleure connaissance de « l'actualité de la plaine agricole ».

3.5.2. Présentation du protocole de l'enquête de 2016

La prise de contact auprès des agriculteurs s'est déroulée au début du mois de février 2016 par téléphone pour un questionnaire. A l'issue du questionnaire, l'exploitant agricole pouvait poursuivre la démarche sous la forme d'un entretien. L'échantillonnage s'est effectué selon le découpage réalisé par photo-interprétation (cf. chapitre 1). Les coordonnées des exploitants ont été obtenues par les pages jaunes. Trois exploitants ont été contactés en dehors des adresses relevées dans cet annuaire : deux dont le numéro a été communiqué par une connaissance commune et un parce qu'il est une figure locale du syndicalisme agricole. Les 13 autres sont ceux qui ont directement répondu favorablement lors de l'appel téléphonique. Un seul agriculteur dispose d'un siège d'exploitation extérieur à ce découpage (commune de Mittois), cependant les terres qu'il exploite sont situées en Plaine de Caen. 17 exploitants ont été enquêtés (**Tableau 27**). 13 discours ont été récoltés à la fois sous la forme du questionnaire et de l'entretien, deux sous la forme du questionnaire qui s'est directement prolongé en entretien et un seul par questionnaire uniquement. Douze sièges d'exploitations sont situés au nord-ouest de Caen et 5 au sud. Ces agriculteurs exploitent sur 36 communes. Ces informations sont localisables sur la **Figure 104** à laquelle sont ajoutés les 2 sièges d'exploitation et les 7 communes supplémentaires qui y sont associées. Le choix d'enquêter des exploitants sur ces deux secteurs était nécessaire pour comparer les discours entre ces deux zones au contexte biopédoclimatique contrasté. Les terres des exploitants enquêtés, destinées à la grande culture, se répartissent sur 36 communes⁸³ : 24 au nord-ouest de Caen et 12 au Sud. Les entretiens semis-directifs se sont déroulés individuellement, sauf un, ayant regroupé trois agriculteurs (dont deux faisant partie de la même exploitation⁸⁴). L'entretien le plus court a duré 40 minutes et le plus long deux heures (trois heures en intégrant une dernière heure de discussion autour et hors du sujet). Deux techniciens productions végétales (ou cultures) ont également été enquêtés. Le premier fait partie de la Coopérative de Creully (dépôt de Saint-Manvieu-Norrey ; secteur nord-ouest de Caen), dont le numéro a été obtenu par l'intermédiaire d'un agriculteur. Le second (technico-commercial) est salarié au sein de la société Le Picard (dépôt de Fierville-Bray ; secteur sud de Caen) et dont le numéro a été obtenu en contactant le dépôt, pour lequel les coordonnées étaient disponibles sur le site internet du groupe. Ce dernier en plus de son rôle de technicien, est également commercial. Arvalis L'Institut du Végétal et l'antenne Plaine de Caen de la Chambre d'Agriculture du Calvados ont également été contactés mais n'ont pas répondu favorablement. Il en va de même pour un exploitant céréalier converti en agriculture biologique. Enfin, trois autres exploitants dont deux situés en partie sud avaient accepté dans un premier temps en demandant d'être recontacté plus tard. Mais ils se sont finalement désengagés.

Chaque entretien donnait lieu ensuite à une retranscription, résumant l'ensemble du discours et les citations clés. Ils ont été réécoutés et réinterprétés lors de la rédaction de ce manuscrit de thèse. La notation des exploitants rencontrés était fonction de la localisation. La lettre 'N' correspond à la partie Nord et la lettre 'S' à la partie Sud. Une annotation ne respecte pas ce principe. En effet, les lettres 'NS' signifie le fait que l'agriculteur en question exploite des parcelles situées à la fois en partie

⁸³ *Nb* : Les communes pour lesquelles les terres sont destinées à l'élevage au sein des exploitations spécialisées à la fois dans les grandes cultures et l'élevage ne sont pas comptabilisées ici. Une partie des terres d'une exploitation, situées en Plaine de Trun ne le sont également pas. En revanche les communes situées en bordure de la Plaine de Caen sont prises en compte.

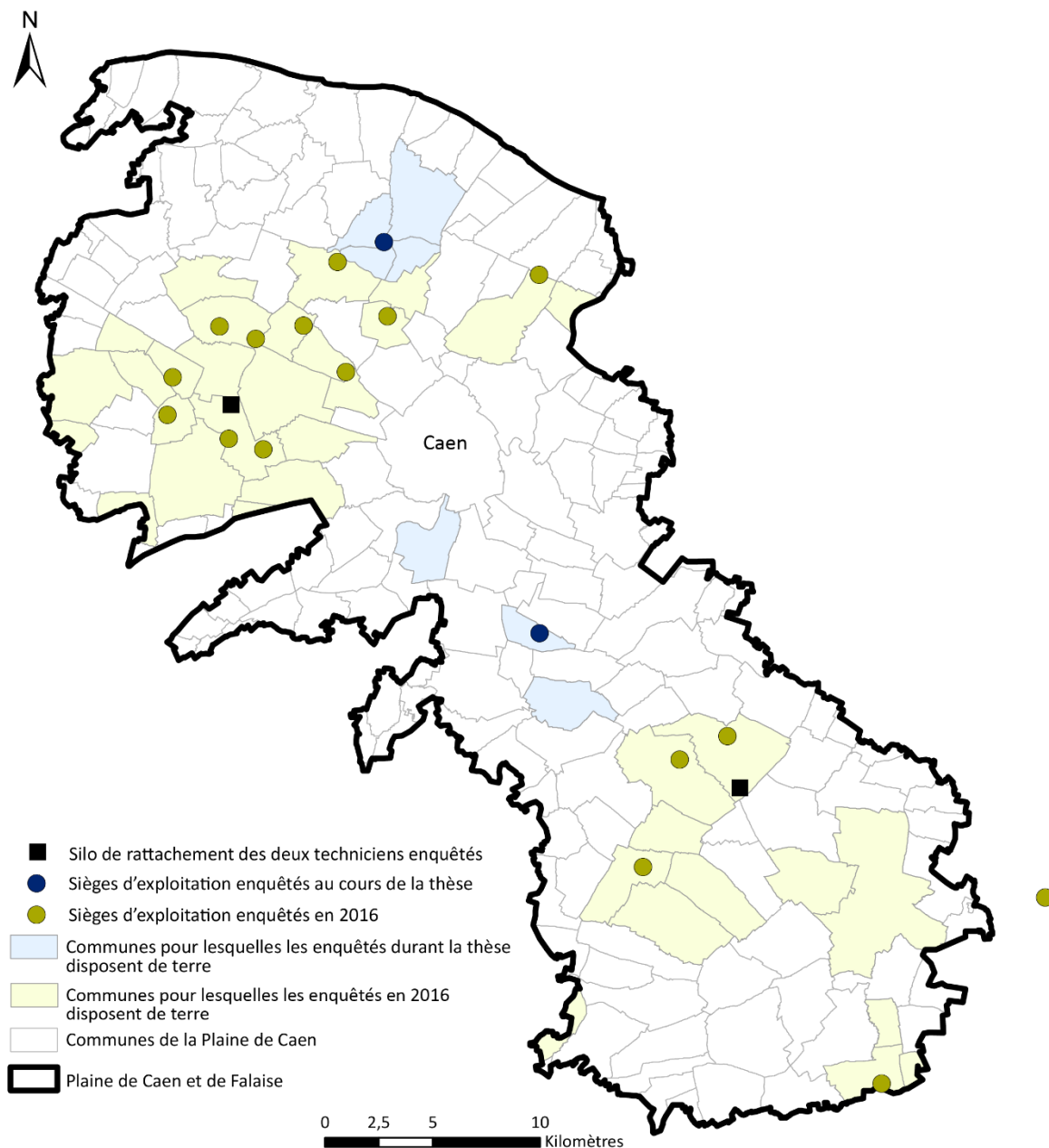
⁸⁴ En réalité 18 exploitants ont été enquêtés, mais dans le cas des deux agriculteurs faisant partis de la même exploitation il s'agit d'un couple que nous avons compté pour un.

Nord et en partie Sud. Cette codification a eu lieu pour ne pas citer les noms car les entretiens ont été enregistrés sous le principe de l'anonymat.

Tableau 27 : Organisation des entretiens effectués lors de l'enquête (la codification des exploitants ne respecte pas l'ordre chronologique des entretiens mais celui relatif à la première prise de contact)

Individu rencontré	Commune	Date
N1	Putot-en-Bessin	Le 4 février 2016
N2	Lasson	Le 2 février 2016 (questionnaire sous forme d'entretien par téléphone) et 22 février 2016 (entretien)
N3	Rosel	Le 3 février 2016
N4	Secqueville-en-Bessin	Le 15 février 2016
N5	Saint-Manvieu-Norrey (questionnaire uniquement)	Le 04 février 2016
N6	Mesnil-Patry	Le 22 février 2016
N7	Saint-Manvieu-Norrey	Le 15 février 2016
N8	Biéville-Beuville	Le 23 février 2016
N9	Thaon	Le 18 février 2016
N10	Villons-les-Buissons	Le 18 février 2016
N11	Thaon	Le 18 février 2016
NS12	Secqueville-en-Bessin	Le 2 mars 2016
S1	Fierville-Bray	Le 8 février 2016
S2	Morteau Couliboef (entretien téléphonique - questionnaire)	Le 9 février 2016
S3	Estrée-la-Campagne (entretien téléphonique - questionnaire)	Le 10 février 2016
S4	Mittois (exploitant en grandes cultures sur Vendevre)	Le 17 février 2016
S5	Saint-Sylvain	Le 23 février 2016
Technicien productions végétales de la Coopérative de Creully	Saint-Manvieu-Norrey	Le 16 février 2016
Technicien productions végétales et commercial au sein de la société Lepicard	Fierville-Bray	Le 11 mars 2015

Figure 104 : Carte de localisation des sièges des exploitations des agriculteurs rencontrés et des communes en lesquelles ils disposent de terres destinées aux grandes cultures en Plaine de Caen



Communes pour lesquelles les enquêtés disposent de terres :
 Anguerny, Anisy, Audrieu, Authie, Barou-en-Auge, Basly, Bénouville, Biéville-Beuville, Bretteville-l'Orgueilleuse, Brouay, Carpiquet, Cheux, Cully, Colomby-sur-Thaon, Douvres-la-Délivrande, Ernes, Estrée-la-Campagne, Fierville-Bray, Lasson, Fleury-sur-Orne, Le Mesnil-Patry, Loucelles, Morteau-Couliboef, Mouen, Ouilly-le-Tesson, Putot-en-Bessin, Rosel, Rots, Rouvres, Saint-Aignant-de-Cramesnil, Saint-Manvieu-Norrey, Saint-Sylvain, Secqueville-en-Bessin, Soignolles, Tessel, Thaon, Tilly-la-Campagne, Tilly-sur-Seulles, Ussy, Vendevre, Verson, Vicques, Villons-les-Buissons.

Réalisation : François Beauvais, 2016 - modifié 2021 (données BD Topo de l'IGN 2009).

Le questionnaire (annexe 9) permet, ici, de prendre un premier contact auprès des exploitants agricoles. En cas de refus de l'entretien il permet d'obtenir une ébauche du discours des exploitants (crédit accordé au changement climatique, changements constatés, stratégies d'adaptations, etc.). Ce questionnaire se justifie également par des connaissances au préalable sur le terrain d'étude (publications sur le contexte biopédoclimatique et sur le changement climatique en Normandie :

Cantat et *al.*, 2009 et 2010 ; Le Gouée et *al.*, 2010) permettant de formuler les hypothèses. Il comporte à la fois des questions ouvertes et fermées selon que l'objectif soit de laisser une liberté de réponse à l'individu. Les individus répondant tous aux mêmes questions, il est également plus facile de quantifier les discours pour analyser les premières grandes tendances qui se dégagent avant l'analyse complète des entretiens. Le recours au questionnaire est d'autant plus légitime que des hypothèses sur le sujet ont pu être établies, excepté pour ce qui concerne les stratégies d'adaptations. Le questionnaire se structure autour d'une première partie permettant de réaliser une sorte de 'carte d'identité' de l'exploitant et de l'exploitation. C'est une mise en contexte permettant de cerner la spécialisation de cette dernière, son fonctionnement, et les enjeux qui y sont liés. Ensuite, sous forme d'une question ouverte, est demandé ce qui peut inquiéter la personne enquêtée quant à son exploitation et l'agriculture dans le futur (sous-entendu à court et long termes), de manière à savoir si le changement climatique lui vient à l'esprit avant même de l'évoquer dans une question suivante. Le reste du questionnaire gravite autour du changement climatique, en demandant si des évolutions ont déjà été remarquées, si cela a affecté l'exploitation et si des stratégies furent mises en place ou si elles sont envisagées, mais également s'il est pris en compte dans le développement de l'exploitation et par quels moyens l'exploitant est informé sur le sujet. Le lien avec les acteurs du monde agricole est évoqué en dernière partie. La majorité des questions sont ouvertes pour ne pas influencer les réponses.

L'entretien a quant à lui l'objectif de rebondir sur le questionnaire. Il est semi-directif en suivant le cheminement du questionnaire et permet d'approfondir les réponses. Le début évoque l'exploitation de l'agriculteur de manière sommaire puisque ces éléments ont déjà été vus au cours du questionnaire mais en allant plus loin pour ce qui concerne le lien entretenu avec les sociétés de fournitures et de collectes. L'entretien continue ensuite à suivre le cheminement du questionnaire. L'agriculteur revient sur les inquiétudes qui concernent l'avenir de son exploitation. Le changement climatique est ensuite introduit. Tout en prenant en compte les conditions locales en lesquelles s'insère l'exploitation et l'adaptation à ces dernières (épaisseur et texture des terres, situation, ...), l'entretien insiste sur les changements remarquables et pouvant être rattachés au changement climatique. Ainsi les dates de récoltes, les conditions de moissons, les semis, l'assolement, les variétés, l'érosion des sols, le manque d'eau, les assurances aléas climatiques, ... furent évoqués. Ces éléments permettent également de revenir sur la gestion de l'exploitation. Le différentiel de terres entre la partie Nord et la partie Sud de la Plaine de Caen est également mis en avant. Les cartes des réserves utiles (actuelles) et des déficits hydriques (prenant en compte l'horizon 2100)⁸⁵ ainsi que le bilan hydrique relatif à la partie Nord et à la partie Sud (pour la normale 1981-2010) sont montrés aux exploitants. Il leur est demandé tout d'abord ce que ces documents leur inspirent, technique déjà utilisé par Pauchard (2011). Ensuite l'exploitant doit se projeter dans plusieurs décennies. Face au constat des documents (stress hydrique plus conséquent notamment), il imagine de possibles stratégies d'adaptation⁸⁶. Le but est aussi de comprendre l'idée qu'il se fait du changement climatique et le crédit qu'il lui accorde. L'entretien a été adapté en fonction de l'exploitant agricole et selon ses autres occupations (élu ou syndicaliste).

Les deux techniciens productions végétales n'ont pas eu à répondre à un questionnaire. Ils ont été rencontrés dans le cadre d'un entretien exploratoire, structuré autour du fonctionnement de leur

⁸⁵ La carte des déficits hydriques fut également utilisée lors de l'enquête relative au mémoire de Laura Pauchard (2011).

⁸⁶ *Nb* : Si l'on part du principe que le changement climatique peut avoir des impacts négatifs sur l'agriculture en Plaine de Caen.

organisme, son implantation en Plaine de Caen et le rapport entretenu avec les agriculteurs. Les types de contrats (stockage, vente à déclencher, ...) pour l'exportation des céréales ont été évoqués. Le technicien revenait ensuite sur son rôle. Le reste de l'entretien était dédié au changement climatique. Les mêmes questions que pour les exploitants ont été posées et les mêmes documents présentés en vue des stratégies d'adaptation et de la différence de potentiel entre la partie Nord et Sud de la Plaine de Caen. Les techniciens productions végétales, en tant que conseillers pour les agriculteurs (types de traitements, variétés, interventions, tours de plaines, ...) ont alors une vue d'ensemble des exploitations du secteur qu'ils supervisent.

3.5.3. Présentation de l'échantillon enquêté

Parmi les agriculteurs rencontrés, 7 ont une exploitation ayant le statut d'individuelle, 6 sont en GAEC (Groupement Agricole d'Exploitations en Commun), et trois sont en EARL (Exploitation Agricole à Responsabilité Limitée). Une seule exploitation est une SARL (Société à Responsabilité Limitée) – (**Figure 105 A**).

Les discours des exploitants peuvent varier d'une personne à l'autre en fonction de plusieurs éléments sociaux qui les caractérisent. A titre d'exemple, la perception des aléas climatiques peut différer entre le plus jeune, qui n'a pas connu la sécheresse de 1976, et le plus ancien. L'âge moyen des 16 exploitants est de 50 ans⁸⁷ au moment de l'enquête. Trois d'entre eux ont moins de 40 ans, six entre 41 et 50 ans, 2 entre 51 et 60 ans et les 2 derniers ont plus de 60 ans. L'individu le plus jeune a 31 ans et le plus vieux 70 ans. Le recul et l'expérience du métier au sein de l'échantillon varie en fonction de l'âge puisqu'il est lié au nombre d'année d'activité. L'ancienneté moyenne est de 25 ans, la plus courte étant de 8 ans et la plus ancienne de 48 ans (**Figure 105 C**). Treize personnes sont de sexe masculin et trois de sexe féminin. Le niveau d'étude des personnes interrogées est variable (**Figure 105 D**) : 7 agriculteurs ont un niveau d'étude inférieur à celui du Baccalauréat (Certificat d'étude, Brevet, Brevet d'Etudes Professionnelles, ...). 4 ont obtenu le Baccalauréat (technologique ou professionnel) et 5 ont poursuivi au-delà de ce dernier, notamment en BTS en rapport ou non avec l'agriculture. Un seul a obtenu un niveau équivalent au BAC +5 puisqu'il est diplômé d'une école d'ingénieur en agronomie. Toutes les personnes enquêtées sont chefs d'exploitations, sauf un, retraité depuis 2008 (mais qui est resté au contact de l'agriculture).

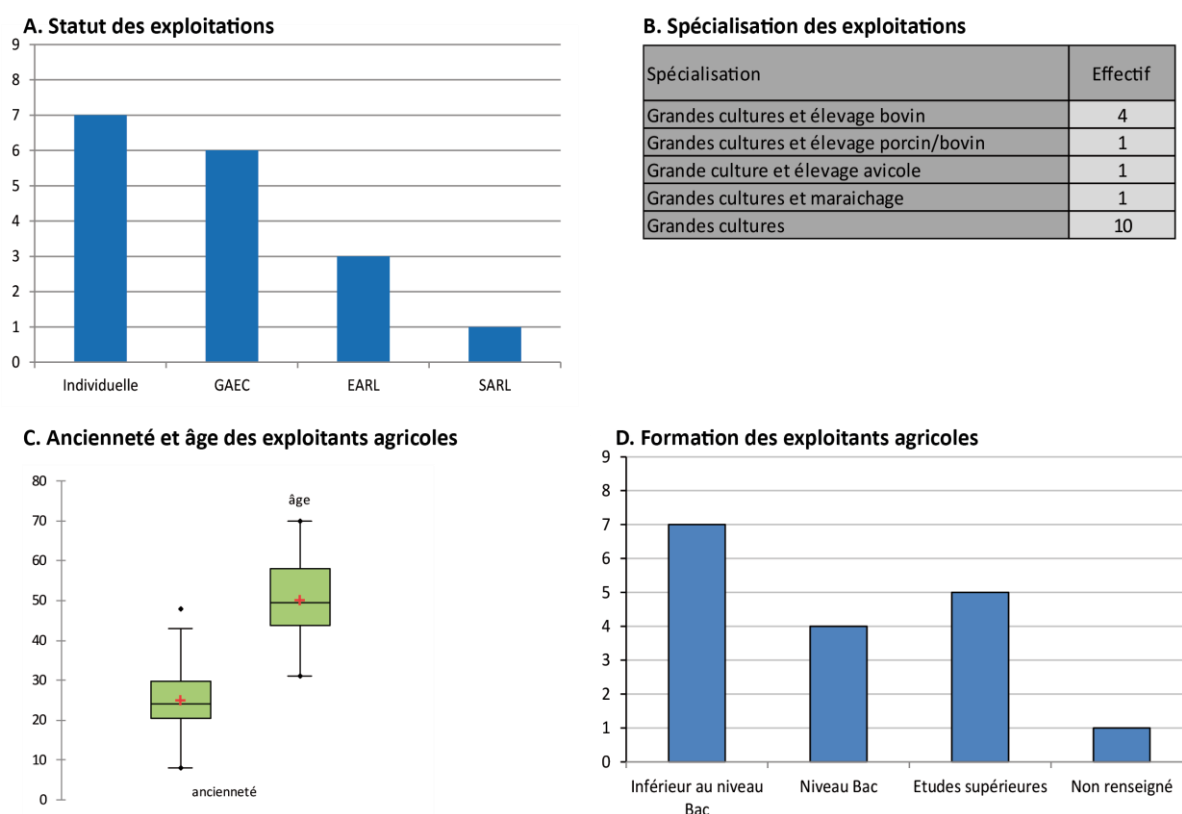
Dix exploitations sont uniquement spécialisées en grandes cultures (**Figure 105 B**). Les cinq autres y associent en plus de l'élevage et une autre des légumes (oignon et céleri). En chiffre d'affaire, les exploitants pratiquant également l'élevage soulignent toutefois que ce sont les grandes cultures qui apportent le plus de valeur ajoutée. Le blé domine l'assolement de toutes les fermes enquêtées. D'autres cultures, toutes exploitations confondues, font partie des rotations culturales : l'orge, le lin, les betteraves sucrières, le colza, les féveroles, le maïs ensilage, l'avoine, les betteraves fourragères, les pois, les pommes de terre, l'oignon et le céleri. Les cultures de printemps se retrouvent en tête d'assolement. Le colza (culture d'hiver) peut en être une aussi.

⁸⁷ Lors de l'entretien collectif ayant réuni trois personnes, l'une d'entre elles est arrivée en cours et n'était pas présente lors des questions relatives au profil de l'enquêté.

La moyenne générale du nombre d'hectares à disposition, principalement pour les grandes cultures⁸⁸ au sein des 16 exploitations est de 166 ha. En partie nord de la plaine cette moyenne est de 157 hectares (9 exploitations) tandis qu'elle est de 183 ha (5 exploitations). Ces moyennes ne sont en revanche pas représentatives car tous les agriculteurs de la Plaine de Caen n'ont pas été enquêtés et un déséquilibre s'opère au sein de l'échantillon entre la partie Nord et la partie Sud. La plus petite exploitation est de 91 ha et la plus grande de 333 ha.

L'échantillon en présence est trop faible pour qu'il soit représentatif et le nombre d'exploitants rencontrés est plus important en partie Nord qu'en partie Sud. Toutefois les exploitations en présence correspondent avec le diagnostic agricole. La majorité des exploitations sont orientées vers les grandes cultures (en y intégrant les cultures industrielles). Le blé y est la culture majoritaire dans l'assolement. Certaines d'entre elles ont en plus une spécialisation dans l'élevage ou le maraîchage. L'échantillon est diversifié, avec des agriculteurs aux profils différents (âge, niveau d'étude, ...).

Figure 105 : Présentation de l'échantillon enquêté



Enfin, le projet d'enquête après la phase de recherche en climatologie n'a pas abouti, probablement en raison de la pandémie de la Covid-19. Le but était alors d'étendre l'enquête réalisée en 2016. Afin de garder une dimension sociale, cette dernière a été remobilisée pour ce travail de thèse. Elle s'appuie d'abord sur un questionnaire, prolongé ensuite sous la forme d'un entretien. Au cours de la thèse cinq entretiens ont été réalisés et viennent compléter cette base de

⁸⁸ Nb : C'est-à-dire en ne comptant pas les hectares consacrés au pâturage (prairies) pour les exploitations pratiquant l'élevage.

données verbales. Au final nous disposons de 24 entretiens (dont plusieurs réalisés de façon informelle lors du suivi du cycle 2018-2019 à Anguerny), auprès d'agriculteurs exploitant sur 43 communes de la Plaine de Caen (et plus de 3000 ha).

3.6. Autres bases de données mobilisées

Aux marges de la modélisation et des informations relevées sur le terrain, d'autres bases de données ont permis de constituer les documents présentés dans le contexte agricole et climatique (chapitre 1 et 2). Elles permettant la mise en œuvre de l'approche conceptuelle géographique en entrée du projet de recherche, la présentation de l'espace d'étude, mais aussi de constituer notamment les cartes de l'ensemble du manuscrit.

3.6.1. Les données agricoles

Les contextes agricoles ont été réalisés à partir des données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) diffusés par l'Agence de Services et de Paiement (ASP) depuis 2007. Cette base de données issue des déclarations de la Politique Agricole Commune (PAC) présente deux principaux intérêts. Tout d'abord elle renseigne le type de culture et les surfaces des îlots agricoles. Aussi, sa mise à jour annuelle « permet d'envisager un suivi à haute fréquence des changements d'usages agricoles des sols, contrairement au recensement agricole qui est mis à jour tous les dix ans en moyenne » (Preux, 2019). Cette base de données est principalement utile dans cette recherche pour localiser les productions agricoles et connaître leur part dans la surface agricole utile, permettant de justifier les zones géographiques étudiées. Les données AGRESTE du service de la statistique et de la prospective du Ministère de l'Agroalimentaire et de la Forêt sont également utiles car elles permettent sur la période 2000-2018 de déterminer les productions à l'échelle départementale, rendements et surfaces des cultures. Enfin FranceAgrimer (Etablissement national des produits de l'agriculture et de la mer) avec l'outil Visionet met à disposition des données sur les collectes, les stocks, les surfaces par variétés, la qualité, etc.

3.6.2. Les autres bases de données

Pour la réalisation de cartes ou de géotraitement sous le logiciel Arcgis, les bases de données de l'IGN (Institut National de l'information Géographique et forestière) sont mobilisées. Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou BDAlti au format ASCII Grid Arc Info permet de mettre en évidence l'élévation des départements français. Cette base de données altimétriques est constituée de points de courbes de niveaux de la BD TOPO complétée par les données ALTI. Les grilles d'altitude pour ce travail sont celles du 25 et 75 m. La BD TOPO est une base de données vectorielles qui couvre le territoire français. Sa précision est métrique et représente le territoire et ses infrastructures : bâti, végétation, cours d'eau, limites communales, etc. Ces données vectorielles sont en Lambert 93 résultent de la digitalisation de la BD ORTHO qui représente le pays à partir de photos aériennes ortho-rectifiées (rectification des déformations liées au terrain, à l'angle de prise de vue et distorsion de l'objectif) et rassemblées les unes aux autres.

Enfin, cette recherche mobilise d'autres données. Il s'agit de celles déjà présentées dans le cadre des simulations bioclimatiques : les relevés de terrain (dates des stades phénologiques, données sols), les informations relatives aux variétés de blé tendre d'hiver pour la modélisation ou encore l'enquête de terrain.

Conclusion du chapitre 3

Pour comprendre la complexité spatiale des espaces agricoles, cette thèse mobilise le concept de l'agrosystème. Elle s'inscrit dans les champs de recherche de la géographie appliquée au changement climatique, où l'approche du géographe-climatologue se situe à l'interface entre les sciences de l'atmosphère et les sciences humaines. Cette thèse en agroclimatologie s'ouvre également vers l'agronomie et l'écophysiologie du végétal, et s'inscrit de ce fait pleinement dans la pluridisciplinarité relative aux recherches menées sur le changement climatique.

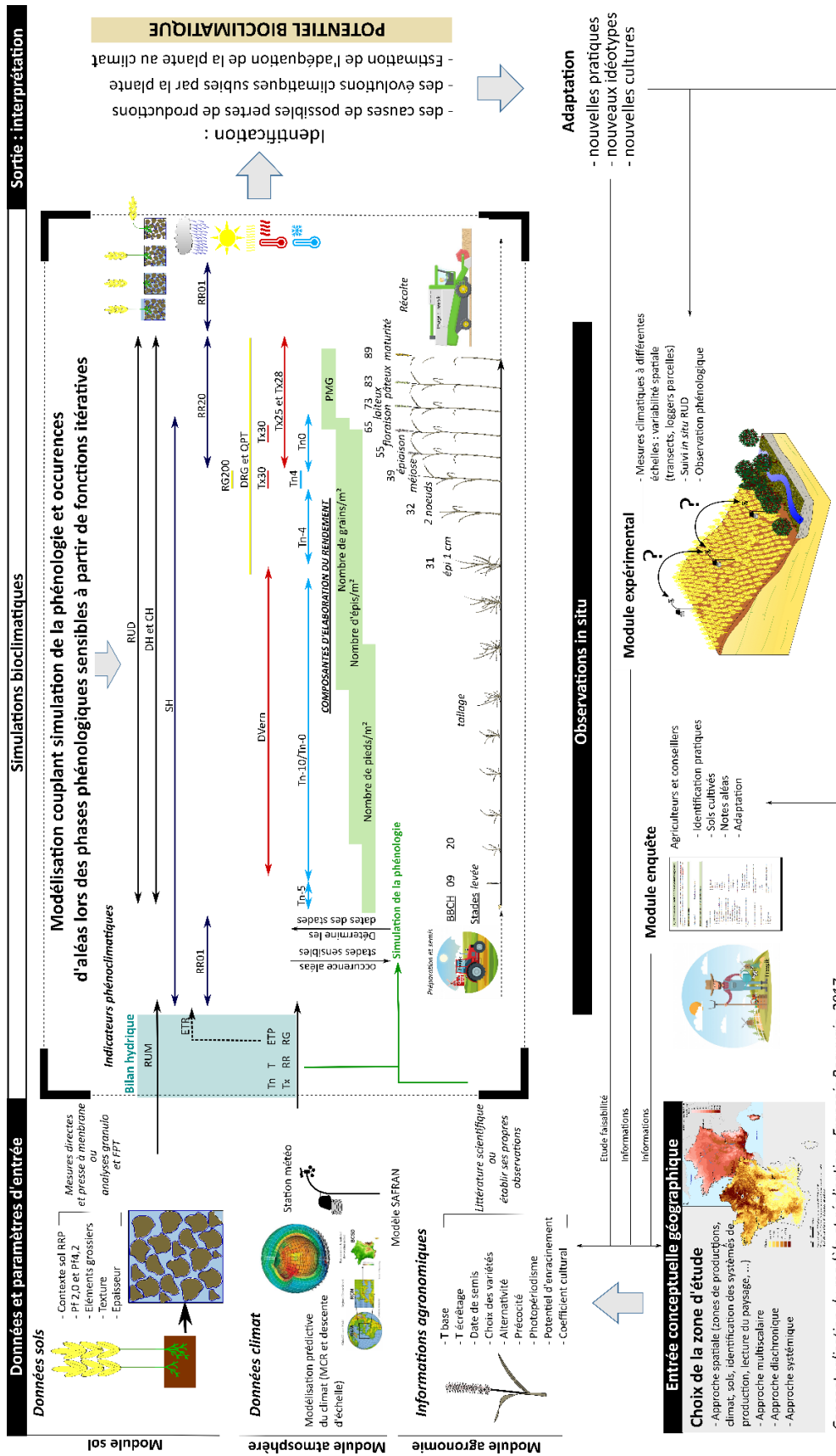
La méthodologie fait appel à des approches quantitatives (traitements de données météorologiques, calculs de bilan d'eau et d'énergie, quantification de la teneur en eau des sols, ...) et qualitatives (observation phénologique, entretiens). Pour caractériser les relations climat/blé, nous avons recours à deux grandes approches :

- La première se fonde sur des indicateurs agroclimatiques définis sur des dates invariantes du calendrier entre lesquelles se déroulent les phases phénologiques du blé tendre d'hiver. L'évolution des paramètres climatiques, ou le dépassement de seuils identifiés sont associés à des pertes de production.
- La seconde mobilise des indicateurs phénoclimatiques. Il s'agit des mêmes paramètres que l'approche précédente, mais calculés en tenant compte de la variabilité interannuelle et des évolutions de la durée des périodes phénologiques – en fonction de la satisfaction des besoins en chaleur, durée d'éclairement et de vernalisation - et donc des dates d'apparition des stades. Autrement dit, les simulations modélisent alors la plante et l'occurrence d'aléas climatiques sur les phases sensibles de sa croissance et de son développement, pouvant affecter les composantes d'élaboration du rendement.

Le modèle s'appuie également sur des relevés de terrains afin d'estimer les besoins en énergie du blé tendre pour satisfaire sa croissance et son développement, déterminer les potentialités pédologiques ou encore valider et discuter de la méthode à échelle fine. Une enquête de terrain permet d'approfondir ces éléments, mais également de déterminer l'adaptation de l'exploitant aux conditions locales et les pratiques associées (assolements, dates de semis, choix des variétés, ...), les aléas climatiques qu'il juge pénalisant ou encore ses craintes relatives au changement climatique.

Ce travail mobilise des données climatiques observées (1950-2020) issu de la station météorologique de Caen-Carpiquet et du modèle SAFRAN. Les données modélisées pour le futur reposent sur un scénario historique (1950-2005) et les scénarios RCP du GIEC (2006-2100) à partir du modèle climatique régional ALADIN-Climat. Lors de l'évaluation de ces données nous avons constaté un biais froid qui concerne la période post-rupture 1987 que nous avons corrigé. Les informations relatives au blé tendre (phénologie, aléas climatiques et dépassement de seuils associés) sont relevées dans la littérature scientifique. Elles sont complétées par les relevés de terrain. L'ensemble de cette démarche est résumé par la **Figure 106** pour l'approche phénoclimatique. Pour l'approche agroclimatique il convient de considérer qu'il s'agit du même raisonnement, à défaut que la phénologie n'est pas simulée.

Figure 106 : Synthèse de la méthode et de l'approche bioclimatique construit dans le cadre de la thèse



Conclusion de la partie 1

Pour comprendre les enjeux du changement climatique sur l'agriculture en Plaine de Caen, il est nécessaire de prendre en compte que de nombreux processus dépassent les limites géographiques de cet espace d'étude. Cela nécessite de s'intéresser aux échelles supérieures pour en cerner les tenants et les aboutissants.

La Plaine de Caen est caractéristique des espaces de grandes cultures en Normandie et plus largement en France. Elle s'inscrit dans une agriculture mondialisée, dans laquelle au-delà de la satisfaction de la demande intérieure, les récoltes sont exportées vers l'étranger. Le système agro-alimentaire des grandes cultures, dominé par le blé tendre, en témoigne puisqu'il révèle une déconnexion entre les productions, la transformation et la consommation.

L'ensemble de ce système, pourrait être bouleversé par le changement climatique. Ce processus d'envergure mondiale est également constaté en France, comme en Normandie où la température a augmenté de $+1,1^{\circ}\text{C}$ en 70 ans. Les vagues de chaleur s'intensifient et deviennent plus nombreuses et l'occurrence des gelées est de plus en plus faible. Dans le cas du scénario le plus pessimiste ces évolutions se poursuivent. La température moyenne à Caen pourrait augmenter de près de 4°C , les nombres de jours de chaleurs seraient multipliés par 4 et les gelées divisées par 3. Le cumul pluviométrique diminuerait de 10 % au printemps et de 30 % en été. Ces perspectives ne sont pas favorables pour la céréaliculture puisque les jours de chaleur et les sécheresses constituent la cause du plafonnement des rendements observés depuis près de 30 ans. Le changement climatique constitue alors une menace pour la viabilité des exploitations agricoles normandes et de toute la filière associée aux productions végétales. Plus largement, si les hauts rendements agricoles des régions les plus productives du monde sont menacés, alors nous pouvons considérer que le risque de non satisfaction de la demande alimentaire mondiale est grandissant. C'est pourquoi les recherches scientifiques sont nécessaires pour anticiper les changements et émettre des pistes d'adaptation afin de rendre les agrosystèmes résilients à différentes échelles.

La revue de littérature expose un besoin de recherches sur les conséquences du changement climatique appliquées à l'agriculture normande, ce qui justifie d'ailleurs cette thèse de doctorat, la première dans ce domaine à l'échelle régionale. Cette étude bioclimatique mobilise des indicateurs dérivés de variables climatiques dont l'évolution ou le dépassement de seuils font échos à des pertes de productions. Ces indicateurs sont d'abord mobilisés dans le cadre d'une approche agroclimatique classique, c'est-à-dire qu'ils sont calculés sur des dates invariantes du calendrier sur lesquelles les phases phénologiques du blé tendre sont susceptibles de se dérouler. Ils sont ensuite retenus dans le cadre d'une approche phénoclimatique, plus précise et recommandée dans plusieurs études scientifiques présentées en état de l'art, qui consiste à simuler la phénologie de la plante selon des besoins en température, en vernalisation et en photopériode pour tenir compte du fait que les stades n'apparaissent pas chaque année à la même date. Les indicateurs sont donc greffés à la phénologie pour s'approcher au plus près des conditions vécues par la plante. Les données climatiques mobilisées sont celles du modèle SAFRAN pour la période historique 1961-2020. Les projections climatiques aux horizons 2050 et 2100 sont extraites du modèle régional ALADIN-

Climat pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 et comparées à un scénario de référence sur la période 1976-2005. Les données des stations Météo-France de la Plaine de Caen sont également retenues dans le cadre d'une discussion de la diversité climatique de l'espace d'étude. Des relevés de terrain et des analyses en laboratoire sont également menés pour déterminer les capacités de rétention en eau des sols en entrée des bilans hydriques. La méthodologie comprend par ailleurs une enquête de terrain pour déterminer auprès des agriculteurs et des techniciens « productions végétales » comment la céréaliculture est adaptée aux conditions locales (climat et sols), les aléas climatiques pénalisant les productions, les évolutions observées ainsi que les craintes et les solutions envisagées face au changement climatique.

Partie 2

Les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre de 1961 à 2100 en Plaine de Caen

Introduction

Même si le climat de la Plaine de Caen est favorable à la culture des céréales, le blé tendre est confronté à des aléas météoclimatiques. On conçoit que le changement climatique contemporain et à venir a pu et pourrait engendrer une évolution de l'occurrence de ces aléas. Pour comprendre comment la filière s'adapte à ce contexte, identifier les évolutions climatiques observées par les agriculteurs et susceptibles d'engendrer des pertes de productions, une phase de terrain paraît essentielle. C'est dans ce but que nous mobilisons les entretiens menés en 2016 auprès de 17 exploitants de la Plaine de Caen. Ces discussions et l'analyse des discours ont permis d'acquérir des connaissances fondamentales sur le milieu céréalier avant de mener l'étude d'impact prospective. Cette dernière se structure autour de deux approches fondées sur des indicateurs dont l'évolution ou le dépassement de seuils engendre des pertes de productions. La première approche mobilise ce que l'on appelle des indicateurs agroclimatiques. Ils sont calculés à dates invariantes pour les périodes de l'année sur lesquelles se déroulent les stades phénologiques. Elle permet de prendre connaissance des évolutions du climat pour l'agriculture. La seconde approche se fonde sur des indicateurs phénoclimatiques, également appelés écoclimatiques. Ils sont rattachés à une technique d'analyse qui consiste à les calculer non plus sur des dates fixes dans le calendrier mais de les coupler à la simulation de la phénologie pour tenir compte de la variabilité interannuelle des dates d'apparition des stades et de la modification de leur durée au cours du temps en raison de l'élévation de la température. Elle permet alors de simuler les conditions météorologiques réellement vécues par la plante au cours de sa croissance. Dans les deux cas, l'analyse est d'abord portée sur la période historique 1961-2020 avant de présenter les résultats de l'étude d'impact prospective aux horizons 2050 et 2100.

Ainsi, le chapitre 4 présente l'adaptation de l'agriculture aux conditions locales, pose la question de l'inquiétude des céréaliers face au changement climatique et présente les évolutions constatées par ces derniers au cours de leur carrière. Le chapitre 5 présente l'évolution des indicateurs agroclimatiques et le chapitre 6 celle des indicateurs phénoclimatiques.

Chapitre 4

Adaptation de l'agriculture aux conditions locales et évolutions climatiques observées par les céréaliers

Introduction

Le climat et le sol constituent les composantes abiotiques auxquels l'agriculteur s'adapte pour cultiver le blé tendre d'hiver. Les conditions météorologiques et pédologiques déterminent la faisabilité de la culture de cette céréale dans le calendrier agricole mais également les conditions et l'organisation du travail. Ces éléments doivent être connus par l'agroclimatologue et sont essentiels pour connaître comment s'effectue l'agriculture en Plaine de Caen. Autrement dit il s'agit d'avoir les connaissances de base sur l'adaptation de certaines composantes de l'itinéraire cultural avant d'envisager de traiter et interpréter les données climatiques appliquées au blé tendre. La phase de terrain est alors essentielle. Il convient également de déterminer si le changement climatique inquiète l'agriculteur, d'une part parce que le degré d'inquiétude peut être révélateur de la vulnérabilité de l'agriculture aux évolutions climatiques et, d'autres part, pour connaître les principaux aléas limitant les productions. Enfin, toujours dans ce même but, il apparaît pertinent de prendre connaissance des évolutions climatiques observées par l'exploitant et des changements de pratiques. L'enquête de 2016 a exploré ces dimensions qui sont exposées dans ce chapitre, complétée par des entretiens avec quelques agriculteurs et un technicien production végétale durant ces dernières années.

Figure 107 : Plaine d'Audrieu le 4 août 2019 après la moisson



Photographie : François Beauvais., le 04 août 2019

4.1. L'adaptation de l'agriculture au sol et au climat

Si le cycle du blé tendre a déjà été présenté dans la première partie, cette sous-partie a pour but d'exposer l'adaptation des exploitants agricoles aux différents contextes pédologiques et climatiques/météorologiques rencontrés en Plaine de Caen.

4.1.1. Le choix des dates de semis du blé

Les dates de semis sont déterminées pour que les stades arrivent à la bonne période. La levée doit avoir lieu en automne ou au début de l'hiver. Le tallage herbacé s'effectue au cours de l'hiver pour être exposé à une période de froid (vernalisation), permettant ensuite au blé de passer d'un état végétatif à reproducteur. La montaison débute au printemps, afin d'écarter le risque de gel d'épis et pour bénéficier d'une durée du jour allongée. Il en va de même pour les stades suivants (mésiose, épisaison, floraison). Le remplissage des grains quant à lui débute entre la fin du printemps et de début de l'été. Par conséquent, des semis trop précoces peuvent engendrer une végétation avancée en sortie d'hiver, exposant le blé au gel et au faible rayonnement. En revanche, trop tardifs, ils exposent la fin du cycle aux chaleurs estivales et au manque d'eau. Pour gérer les dates de semis, l'agriculteur tient compte de la précocité des variétés de blé. Celles au cycle court (précoces) sont semées en premier et celles au cycle plus long (tardives) sont semées en dernier.

Les dates moyennes de semis entre le nord et le sud de la Plaine de Caen diffèrent. En plaine septentrionale, sur les dix dernières années, la date idéale est autour du 20-25 octobre. En plaine méridionale, les semis débutent à partir du 10 octobre. Les températures hivernales dans le secteur sud sont plus froides qu'en partie nord, en raison de l'éloignement à la mer. Dans le cas d'une variété de même précocité, le blé semé entre Caen et Falaise aura cumulé moins de chaleur à la sortie de l'hiver que s'il était cultivé entre Caen et la mer. Les semis de la partie sud sont donc anticipés pour compenser ce déficit de douceur. Dans d'autres plaines agricoles de la région, plus continentales, les semis peuvent même débuter début octobre. Toutefois, il convient de préciser, que les variétés précoces ne sont pas toutes semées aussi tôt, sans quoi elles seraient trop avancées en sortie d'hiver.

« Sur Caen sud c'est plutôt 10-15 octobre ... nous l'idéal ici [secteur nord] euh j'dirais que c'est plutôt 20-25 octobre » (Technicien productions végétales de la Coopérative de Creully, le 09 juin 2020).

« Par ici [secteur sud de Caen] on commence à semer vers le 10 octobre » (Exploitant représentant FDSEA, le 05 juin 2020).

Actuellement, la fin de la culture des betteraves (arrachées en automne) en Plaine de Caen favorise les semis du blé tendre d'hiver en octobre. Les plus tardifs ne devraient plus s'étendre au-delà du 20 novembre excepté dans le cas où le précédent cultural est un maïs⁸⁹. Mais il convient de considérer que d'autres variables peuvent entrer en compte. Deux stratégies sont identifiées par le technicien agricole. Il s'agit d'un évitement du risque de pucerons ou encore la sécurisation des semis dès la première période de jours secs en octobre :

⁸⁹ Il s'agit à la fois du maïs grain et du maïs ensilage. Ce dernier n'est pas expédié dans les régions agricoles voisines spécialisées dans l'élevage. Il s'agit de l'autoconsommation pour les quelques exploitations ayant des bovins.

- Le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully, précise qu'en 2016 les exploitations n'ayant pas eu recours aux insecticides néonicotinoïdes, protégeant le blé des pucerons jusqu'au stade 3-4 feuilles ont connu des pertes de rendement de 20 à 25 %. Désormais ces produits sont interdits. Les semis précoces en automne favorisent les attaques de pucerons en raison des températures plus élevées qui leurs sont favorables. Semer plus tard, à une période plus fraîche, pourrait alors être une alternative et cette question se pose depuis deux années. C'est d'ailleurs ce que l'exploitant S1, pourtant situé au sud de Caen, pratique depuis quelques années en retardant les semis jusqu'à mi-novembre/décembre ;
- Néanmoins, lorsque nous le rencontrons en 2020, il expose que les agriculteurs ne sont pas tous favorables à cette option en raison du risque de conditions trop humides qui ne sont pas propices pour semer le blé et lui permettre de lever dans de bonnes conditions. Ce constat fait suite à l'automne 2019, particulièrement pluvieux, à tel point que la seule fenêtre météorologique idéale pour semer comprenait seulement sur 3 jours secs en octobre. Par conséquent, les semis de nombreuses parcelles ont été repoussés à des dates qui ne convenaient plus à la précocité des variétés achetées par les agriculteurs. Les semis précoces pourraient alors être privilégiés en dépit du risque de pucerons. Pour cela l'exploitant doit tenir compte de l'alternativité de la plante en choisissant des variétés d'hiver. Si le besoin en température pour la montaison est satisfait à cause du semis précoce, la plante n'entamera pas ce processus tant que le nombre de jours de vernalisation n'est pas satisfait.

Dans tous les cas, que le semis soit effectué en octobre ou en décembre, l'exploitant tient compte de la précocité de la variété pour éviter certains aléas climatiques. Les variétés tardives, au cycle long, sont semées mi-octobre et fin octobre pour respectivement les zones sud et nord de la Plaine. Les variétés précoces quant à elles sont semées plus tard dans la saison, en novembre. Une variété précoce ne peut être semée tôt que si elle nécessite des besoins en vernalisation et en photopériode permettant de bloquer le départ de la montaison.

4.1.2. Le choix des variétés selon le contexte pédoclimatique et le risque d'échaudage

Les caractéristiques des variétés sont disponibles dans les catalogues de la profession (semenciers, Arvalis-L'Institut du Végétal, Chambre d'Agriculture, revues agricoles) ou bien à partir d'outils d'aide à la décision tels que celui proposé sur le site internet d'Arvalis : <https://choix-des-varietes.arvalis-infos.fr/bletendre/> (Figure 108). L'exploitant peut renseigner la localisation, le type de sol et les dates de semis envisagées. Pour chaque cultivar sont notamment renseignés :

- Les dates de semis préconisées ;
- La précocité montaison et épiaison (de précoce à tardif) ;
- La classe de qualité (améliorant ou de force, panifiables supérieurs, panifiables, biscuitiers, autre utilisation) ;
- Le poids spécifique ;
- La teneur en protéines ;
- La résistance aux maladies et à la verse ;
- Le risque de ravageurs ;
- La tolérance au chlortoluron (produit phytosanitaire).

Figure 108 : Caractéristiques des variétés de blé tendre disponibles sur le site d'Arvalis (exemple de la variété Chevignon)



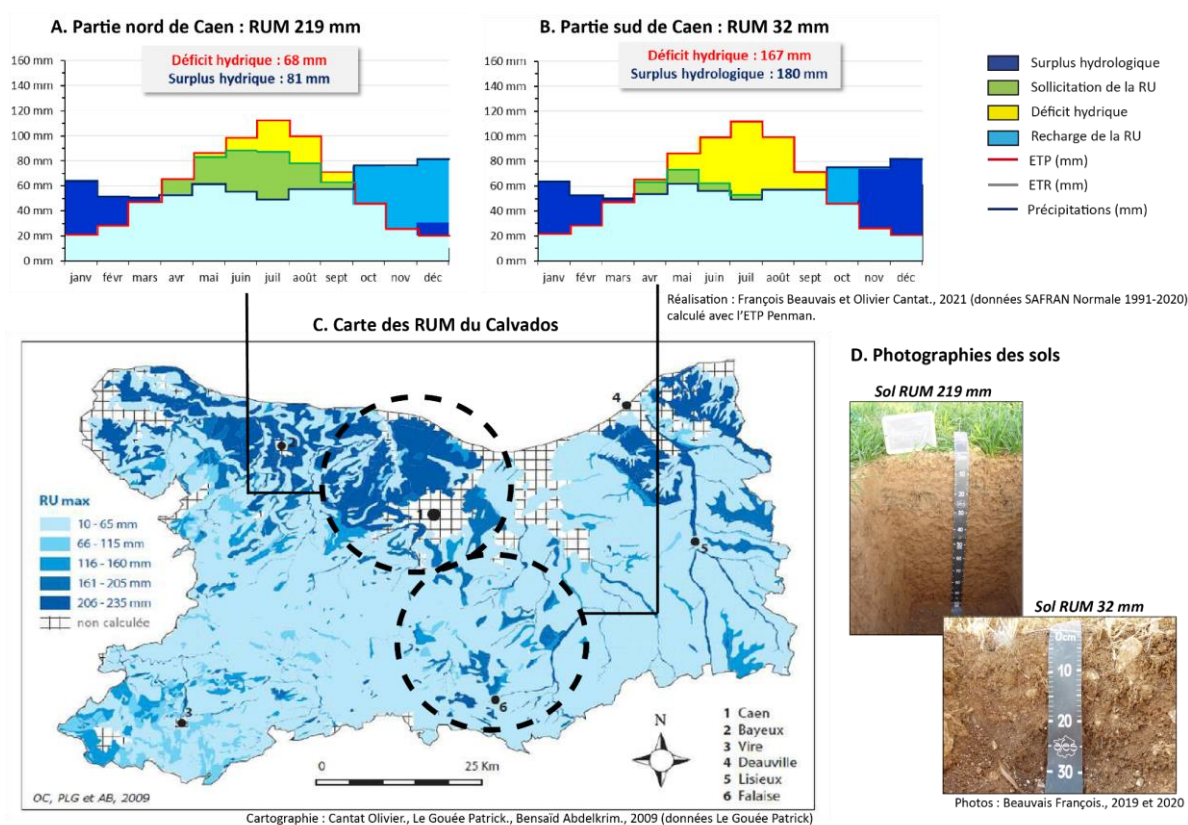
Pour choisir les variétés, l'exploitant agricole peut aussi s'appuyer sur l'expertise du technicien production végétale des sociétés de collecte et d'approvisionnement. Pour le technicien de la Coopérative de Creully, conseiller pour environ 80 à 100 adhérents de la Coopérative de Creully, les variétés proposées par les semenciers doivent d'abord s'adapter au contexte de marché. Pour cela, il s'agit de retenir des variétés garantissant des taux de protéines et de valeurs boulangères élevées. D'ailleurs, les sociétés de collecte et d'approvisionnement pratiquent souvent des remises sur les prix de ces variétés de façon à inciter les exploitants à les acheter et ainsi orienter et garantir les débouchés, tant pour la demande intérieure que pour l'exportation. Les cultivars doivent également être résistants aux maladies.

Mais le choix des variétés dépend également du sol et des aléas climatiques susceptibles d'intervenir au cours du cycle de la plante. Le blé cultivé sur les sols épais au nord-ouest de Caen, dotés de bonnes réserves en eau, est moins vulnérable au stress hydrique que sur les sols minces du sud de la Plaine⁹⁰. Sur ces derniers, le manque d'eau peut apparaître dès les mois de mars et avril (**Figure**

⁹⁰ Si le nord est surtout doté de sols épais sans charge en éléments grossiers, des petits sols sont tout de même présents sur les versants de vallées ou dans certaines dépressions topographiques. Au sud de l'agglomération de Caen, certains secteurs disposent de sols plus épais, même si la majorité des parcelles reposent sur des sols minces et caillouteux (cf. partie 1).

109). A partir du mois de juin, les journées échaudantes peuvent survenir, surtout à mesure que l'on se dirige vers le sud de la Plaine de Caen-Falaise du fait de l'éloignement à la mer (cf. partie 3). Si elles ont lieu en même temps qu'un stress hydrique, les pertes de production sont alors beaucoup plus importantes. Au sud de Caen, la pluviométrie du mois de juin est scrutée par les exploitants agricoles. Les sols minces n'ayant plus de réserve en eau, le remplissage des grains est alors dépendant de précipitations régulières et suffisamment abondantes. Au nord, les mois de juin trop humides sont au contraire redoutés étant donné que les précipitations autour de la floraison peuvent favoriser les maladies⁹¹.

Figure 109 : Contraste biopédoclimatique entre le nord et le sud de la Plaine de Caen



Pour s'adapter à ces aléas, l'exploitant agricole peut semer des variétés précoces, au cycle plus court, sur les sols minces de façon à anticiper la fin du cycle pour esquiver en partie le manque d'eau et les jours de chaleur. D'après les deux techniciens rencontrés, l'un pour le secteur nord et l'autre pour le secteur sud, la différence entre une variété précoce et tardive est de l'ordre de 15 jours à la maturité. Elles sont au même stade en sortie d'hiver, mais elles se distinguent à la montaison puisque les précoces épiant plus vite et murissent plus rapidement. Sur les 16 exploitants rencontrés en 2016, 13 disent adapter les variétés aux types de terres en présence. Les trois autres n'évoquent pas cet élément. Pour l'un d'entre eux, seul le questionnaire a été réalisé et le choix des variétés n'a pas été abordé. Les deux autres quant à eux ne précisent pas adapter la précocité des variétés en fonction des sols puisqu'ils ne disposent pas de sols de faible épaisseur. Les cinq agriculteurs de la partie sud de Caen disposent de « petits sols » et précisent systématiquement semer les variétés

⁹¹ Le risque de maladies est également présent au sud de Caen mais les conséquences d'un mois de sec semblent être encore plus redoutées.

tardives sur les bonnes terres et les précoces sur les plus défavorables. Une agricultrice sur le secteur de Morteau-Couliboeuf (à l'est de Falaise), réputé pour des sols très squelettiques dit même ne pas pouvoir semer de variétés tardives sur l'ensemble de son exploitation. Deux exploitants (S3 et S5) précisent tout de même avoir observé que les rendements des variétés précoces sont certes convenables, mais inférieurs aux variétés tardives (également constaté par des exploitants du secteur nord) pour des conditions météorologiques et pédologiques égales. Ce point est également précisé par l'exploitant S1 en 2020 lors de l'ouverture de la fosse à Fierville-Bray. Le cycle plus court limite alors le temps d'élaboration du rendement. Mais dans le cas de sols très minces, que la variété soit précoce ou tardive, le manque d'eau est tellement conséquent qu'une variété précoce ne fait finalement pas mieux qu'une tardive. Concernant les critères de qualité, les agriculteurs n'observent pas de différences selon la précocité de la variété.

Entretien avec l'exploitant « S1 » le 09 février 2016 :

« Éviter ce fameux mois de juin ... ici c'est un peu le mois de tous les dangers ... dès qu'il fait trop sec c'est catastrophique ... donc on essaye de décaler le problème pour avoir une maturité ... pour qui si il y a un problème au mois de juin ce soit moins catastrophique ».

Entretien avec le technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2016 :

Enquêteur : *« Donc sur une exploitation, ayant par exemple des types de sols assez filtrants puisque c'est c'qu'il y a pas mal au sud justement ... »*

Enquêté : *Plaine sud effectivement, contrairement au nord de Caen vous avez des sols plus superficiels.*

Enquêteur : *Et donc justement vous mettez des variétés plutôt au cycle court.*

Enquêté : *Oui plutôt plus précoces. Ouais c'est ça !*

Enquêteur : *D'accord.*

Enquêté : *Qui sont en général semées un p'tit peu plus tard et qu'on récolte un p'tit peu plus tôt. Ce qui leur permet d'être arrivées au stade euh ... à maturité ... comme on dit ... avant le déficit hydrique mais normalement ici ça peut arriver dès maintenant le déficit hydrique !*

Enquêteur : *Ab oui vous considérez dès maintenant que ...*

Enquêté : *Enfin je dis ça j'connais pas le contexte de 2016 sinon j'serais pas ici hein si j'avais une boule de cristal aussi précise mais ça peut arriver qu'on ait un mois de mal avril sans eau. C'est déjà arrivé.*

Enquêteur : *Et donc pour des cultures comme le blé ça peut déjà provoquer ...*

Enquêté : *Ici oui plaine sud oui tout à fait ... si vous avez deux mois sans eau effectivement Plaine sud on va commencer à grincer des dents.*

Enquêteur : *Et justement est-ce que vous trouvez que ça arrive de manière récurrente ce manque d'eau ?*

Enquêté : *Oui plaine sud dès qu'on a plus de 3 semaine sans eau ça y est on a des plantes qui sont tout de suite en stress en plaine sud.*

Enquêteur : *Oui hum oui ...*

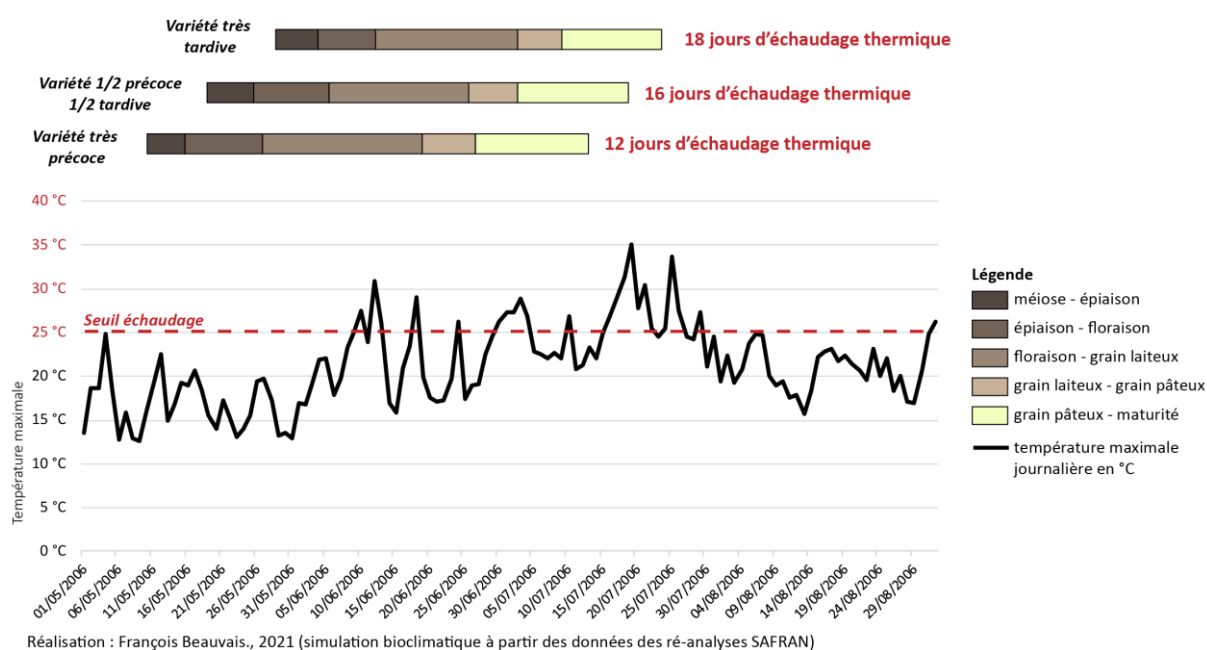
Enquêté : *Mais par contre la Plaine sud est quand même assez hétérogène en type de terre. On a des secteurs qui ressemblent au nord de Caen, type j'ai une commune qui me vient en tête Magny-la-Campagne, là ces terres-là sont des terres assez profondes, mais vous avez des terres comme tout ce qui est autour du site où on est aujourd'hui vous avez trois semaines sans eau ça y est vous avez des céréales qui commencent à tourner la tête et ça y est un stress qui est déjà installé. Ici il faut au moins ... j'dirais qu'il faudrait de l'eau tous les quinze jours ... autour du site [Fierville-Bray / Saint-Sylvain] ... vous avez des endroits il y a ça de terres [il montre une épaisseur d'environ quinze à vingt centimètres] c'est du caillou ».*

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« Caen Sud on dit c'est le mois de juin qui fait la récolte [...] c'est-à-dire que si on a un coup de stress hydrique au mois de juin euh les quintaux sont perdus. L'année dernière ils ont fait une excellente ... des excellents rendements parce qu'il a plu j'sais plus ... 60 ou 80 mm au mois de juin il y a eu une grosse pluviométrie et c'est en pleine période de remplissage et en fin de compte il y a certains stades où il y a des choses qu'il ne faut pas louper dans ces terrains-là alors qu'ici en limons les années qu'ils n'aiment pas c'est quand il pleut de trop. Ils disent c'est pire que bien. Ici [nord de Caen] ils disent année de sécheresse année de richesse ».

Pour illustrer l'exposition différentielle aux aléas selon la précocité de la variété, prenons l'exemple de la campagne 2005-2006 en considérant l'échaudage thermique (**Figure 110**). Pour une même date de semis, les stades se déroulent plus tôt selon la précocité de la variété. La maturité arrive 11 et 6 jours plus tôt que les variétés tardives et intermédiaires (1/2 précoce 1/2 tardive). La variété précoce est exposée à 12 jours d'échaudage thermique tandis que les deux autres en rencontrent 16 et 18 jours. Le blé précoce rencontre alors 6 jours de chaleur de moins que le blé tardif, ce qui peut théoriquement expliquer un écart de plus de 9 q/ha. En effet, la variété précoce clôture son cycle le 13 juillet, soit juste avant la vague de chaleur qui intervient à Caen du 15 au 29 juillet, évitant ainsi la température maximale absolue de 33,6 °C du 25 juillet. En revanche, les variétés intermédiaires et tardives terminent leur maturation en même temps que surviennent ces excès thermiques.

Figure 110 : Exposition différentielle à l'échaudage thermique en Plaine de Caen pour différentes précocités de blé tendre d'hiver - exemple de l'année 2006



Sur la Normale 1991-2020, le déficit hydrique et le nombre de jours d'échaudage thermique sont en moyenne plus faibles à mesure que la durée du cycle est précoce, et ce, à la fois pour un semis précoce et tardif (**Tableau 28**). Ainsi, le manque d'eau pour la plante selon la date de semis, est de 110 à 124 mm pour un cultivar très précoce tandis qu'il est de 143 à 160 mm pour un très tardif. Les jours de chaleurs rencontrés sont en moyenne de 5 à 7 jours pour le premier et de 7 à 9 jours pour le second. Enfin, un même cultivar semé plus tôt est moins exposé.

Tableau 28 : Déficit hydrique moyen et nombre de jours d'échaudage thermique pour le blé tendre en Plaine de Caen selon différentes précocités sur la Normale 1991-2020 pour un sol mince

Précocité Variété	Déficit hydrique (mm)		Echaudage thermique (j)	
	Semis 15/11	Semis 25/10	Semis 15/11	Semis 25/10
Très précoce	124	110	7,1	5
1/2 précoce 1/2 tardive	143	127	8	6,3
Très tardive	160	143	9,3	7,2

Réalisation : François Beauvais (données SAFRAN 1991-2020 ; RUM 32 mm)

Enfin, l'exploitant peut semer des variétés de différentes précocités en fonction des rotations culturales et de la gestion du calendrier agricole. Les dates d'arrachage des betteraves et de récolte du maïs retardent les semis de blé au mois de novembre. L'agriculteur sème dans ce cas une variété au cycle plus court de façon à ce que les stades phénologiques arrivent à une date cohérente.

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« Des betteraves ou du maïs grain se libèrent plus tard dans la saison, octobre/novembre, on a plutôt tendance à semer plus tard donc on va choisir des variétés plus précoces qui ont un cycle plus rapide [...] parce que le but c'est quoi ? C'est que ... en ... enfin dans notre région c'est qu'au mois de juin c'est le coup de stress hydrique donc il faut qu'à certains stades ... il faut que les cultures soient à un certain stade sinon si tu fais du blé au mois d'avril, au mois de juin un coup de chaud t'auras rien dans les champs ».

Ce point est également valable pour la gestion des semis de l'ensemble des parcelles de l'exploitation. En semant des cultivars de différentes précocités, l'exploitant s'assure de ne pas devoir tous les semer au même moment. Admettons par exemple qu'il dispose de variétés devant être semées entre le 15 et le 30 octobre, mais que les surfaces sont importantes et que dans le même temps ces 15 jours sont marqués par des précipitations, alors l'exploitant ne pourra pas tout semer dans les temps. Disposer de variétés précoces et tardives permet de mieux gérer les travaux de semis⁹². C'est également valable pour les travaux de récolte. En recourant à différentes précocités, les blés n'arrivent pas tous à maturité en même temps ce qui permet à l'exploitant d'étaler les moissons et de ne pas devoir tout récolter en même temps. Par ailleurs, si les stades n'ont pas tous lieu en même temps c'est une stratégie pour éviter que tous les blés de l'exploitation soient confrontés à un même stress météorologique. Néanmoins, ces stratégies sont surtout valables pour les exploitations disposant de sols épais ou variés puisque celles composées principalement de petits sols ne peuvent pas semer de variétés tardives.

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« On gère en risque d'exploitation c'est-à-dire qu'une exploitation ne fera jamais que du blé tardif à 100 % ou que du blé précoce parce que en panachant on va dire ... on ne met pas tous ses oeufs dans le même panier ... parce que il y a des années où les tardives vont mieux sortir et des années où les précoces vont mieux sortir [...] donc quand ont fait un assolement ont va dire que c'est moitié-moitié en panachant ».

Enfin, au-delà de l'adaptation des variétés au type de sol, c'est parfois directement l'assolement de l'ensemble des cultures qu'il est nécessaire de gérer comme le suggèrent exploitants et techniciens lors d'entretiens :

⁹² Cet élément peut toutefois être discuté si les variétés ont un besoin important en vernalisation bloquant le début de la montaison. Il est alors possible dans ce cas de semer plus tôt, dès la première période de sec pour assurer les travaux de semis.

Entretien avec l'exploitant « N3 » le 03 février 2016 :

« Si je fais du blé là-bas [en parlant des petites terres], j'ai pas fait du blé tardif, si j'ai fait ... j'ai plutôt fait de l'orge, de l'avoine, j'ai fait du colza, des cultures qui arrivent beaucoup plus vite ... des betteraves là-bas j'en fais pas ... du lin c'est pareil j'en fais très rarement [...] j'ai fait des variétés beaucoup plus précoces [...] le problème c'est la date qu'on va avoir ... c'est que l'coup de sécheresse on sait pas quand on va l'avoir, on peut l'avoir au mois d'avril, on peut l'avoir au mois de mai, on peut l'avoir au mois de juin ... bon si c'est au mois de juin on fait une précoce moins ça souffre car les blés sont d'jà avancés ».

Entretien avec le technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2016 :

« Le climat est primordial parce que si vous conseillez euh ... j'vous prends un exemple ... euh ... un maïs dans une parcelle qu'est autour du silo avec j'vous disais 15 cm de terre et du caillou et vous n'avez pas d'eau pendant un mois ou un mois et demi on sait que le maïs est une plante très gourmande en eau ... effectivement ça risque de compromettre très fortement la culture. On conseille dans les sols plutôt déficitaires en eau, on privilégie plutôt des cultures d'automne parce que la culture a plus de temps pour se mettre en place et d'se faire un enracinement correct pour résister du mieux au déficit hydrique du printemps parce qu'on sait qu'en Basse-Normandie on a quand même de l'eau à l'automne, en général ... à l'automne et en hiver. Le déficit hydrique c'est plutôt au printemps mars avril mai juin. C'est là où on peut craindre, enfin ce n'est pas tous les ans pareils mais on peut craindre une année avec un peu moins d'eau » (technicien société Lepicard).

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« Enquêteur : « Donc il y a des cultures que vous ne pouvez pas faire, enfin que vous vous interdisez par exemple ?

Enquêté : *Oui alors essentiellement ... on fait de la betterave sucrière mais on ne peut pas faire ça sur toute l'exploitation. Il y a une partie ce n'est pas possible. Déjà mécaniquement on ne peut pas les récupérer parce que il y a trop de cailloux. Euh ... le lin on ne fait pas d'lin, on ne fait pas de pommes de terres ... on ne peut pas faire de légumes c'est clair ».*

Ainsi, la différence de sol entre le nord et le sud de Caen met en avant une vulnérabilité différentielle des cultures au déficit hydrique. D'après les exploitants agricoles et les techniciens, la différence de rendement entre les deux zones géographiques est de l'ordre de 30 q/ha (100 à 115 q/ha au nord et 70 à 80 q/ha au sud). Pour cela les exploitants adaptent la précocité de la plante à la terre en présence. C'est aussi une façon d'éviter l'échaudage thermique, d'autant plus contraignant lorsqu'il est associé au manque d'eau. Ces variétés ne doivent toutefois pas être trop précoces à la montaison pour éviter le risque de gel d'épis. La durée du cycle peut également constituer une stratégie pour l'organisation des travaux (semis et récoltes) et diversifier les dates d'apparition des stades entre les parcelles dans le cas de la survenue de stress climatiques, néanmoins, les agriculteurs ayant des sols épais disposent d'une plus grande flexibilité dans le choix variétal. Enfin, la date de semis peut également constituer un levier d'adaptation aux conditions locales.

4.1.3. L'irrigation est-elle pratiquée en Plaine de Caen pour compenser les faibles RUM ?

Pour lutter contre le déficit hydrique dans les secteurs de petits sols, certains exploitants ont recours à l'irrigation. Dans les espaces de sols minces, les rouleaux d'irrigation sont observables dès le mois d'avril dans le cas de printemps secs (**Figure 111**). D'après le recensement agricole de 2010, la part des surfaces agricoles irriguées est inférieure à 1 % dans les cantons du nord de Caen, à l'exception de celui de Douvres-la-Délivrande (2,5 %), ce qui peut s'expliquer par la présence d'exploitations maraîchères. En plaine sud, la part des surfaces agricoles irriguées est un peu plus importante mais elles restent faibles, entre 2 et 3 % selon les cantons, à l'exception de celui de Morteaux-Couliboeuf où l'arrosage est un peu plus pratiqué (7,3 %).

Sur l'ensemble des agriculteurs enquêtés, seulement deux utilisent cette technique : l'un exploite sur le secteur de Lasson (nord-ouest de Caen) et l'autre de Morteaux-Couliboeuf (est de Falaise).

Le premier irrigue d'abord les légumes et en fait profiter plus rarement les autres cultures si elles en ont besoin telles que le blé, le lin ou les betteraves. En effet, si le nord-ouest de Caen est principalement doté de « bons sols », certains secteurs sont constitués de « petits sols » et c'est le cas sur son exploitation.

Entretien avec l'exploitant « N2 » le 22 février 2016 :

« C'est vrai qu'en 2010, 2011 j'ai irrigué des cultures que je n'irrigue pas d'habitude, du blé, du lin. Euh ... J'ai irrigué un tout p'tit peu les betteraves à la levée l'année dernière mais en 2015 mais parce que c'était semé dans d'pas très bonnes conditions mais c'était pas vraiment dû au manque d'eau ... c'était dû aux mauvaises combinaisons du labour, la terre se travaillait mal, donc les betteraves étaient semées dans de mauvaises conditions. Les betteraves en théorie quand on les sème bien elles peuvent lever sans qu'il pleuve. On sème dans la terre humide et ça suffit. Bon et bien là c'était moins bien fait donc j'ai irrigué un peu mais autrement le manque d'eau dans la nappe non il y a eu des hivers secs dans les années 90 mais depuis il n'y en a plus ».

« En 2010 j'ai dû beaucoup irriguer parce que justement j'avais des parties en cailloux. J'irriguais un peu d'céréales ».

Cet agriculteur a pratiqué également l'irrigation du lin en 2020 puisque l'arrosage de cette culture était observable en Plaine de Lasson à la fin du mois de mai (**Figure 111**).

Figure 111 : Irrigation du lin de printemps le 20 mai 2020 à Lasson



Photographie : François Beauvais, le 20 mai 2020

Il ne s'agit pas seulement d'arroser pour compléter le manque d'eau de la plante afin de limiter le stress hydrique mais également de favoriser la valorisation de l'azote au printemps qui a besoin d'eau pour pénétrer dans le sol. Si la pluie n'arrive pas au bon moment, alors l'irrigation prend le relais.

Entretien avec l'exploitant « N2 » le 22 février 2016 :

« Enquêté : *Et puis aussi parfois j'irrigue c'est pas par manque d'eau [déficit hydrique pour la plante]. C'est parce qu'on a de nouvelles stratégies sur l'azote. Pour économiser l'azote on le met moins tôt et si le met trop tard et bah si il ne pleut pas c'est comme si on en avait pas mis*

Enquêteur : *Ah oui pour que ça pénètre !*

Enquêté : *Voilà. Il y a assez d'eau dans le sol mais si on a mis l'azote après la pluie c'est comme si il y en avait pas donc c'est très très mauvais. Avant le risque était plus faible parce qu'on mettait l'azote plus tôt. On gérait moins bien mais alors maintenant on gère mieux mais on prend plus de risque par rapport à ça.*

Enquêteur : *Ah oui d'accord. En fait ...*

Enquêté : *C'est pas tellement qu'il pleut moins mais si on met plus tard bah la probabilité qu'il pleuve suffisamment avant la date limite où ça sera trop tard bah si je le mets une semaine ou deux ce que je faisais avant bah il y a plus de probabilité qu'il ne pleuve pas jusqu'au moment critique où c'est trop tard pour l'azote quoi. C'est plus probable que ça arrive donc ça arrive plus souvent. Et moi bon de temps en temps ça m'est arrivé mais dans certaines parcelles les années super sèches bah j'avais mis de l'azote et j'ai irrigué un p'tit peu mais surtout pour ça. Le blé ne souffrait pas encore vraiment mais c'était pour faire pénétrer l'azote parce qu'il allait souffrir du manque d'azote.*

Enquêteur : *Mais c'est plus ...*

Enquêté : *C'est lié à une autre stratégie, qu'on change la stratégie d'apport d'azote ».*

Aussi, le blé peut être irrigué lors des journées d'échaudage thermique pour contenir les dégâts et ainsi éviter de cumuler stress thermique et hydrique.

L'exploitante agricole de Morteaux-Couliboeuf quant à elle irrigue les cultures de pois, betteraves et le maïs grain. La commune se situe en contre-bas du versant sud-est des Monts d'Eraines (environ 115 m de dénivelé) et elle constate que ce relief engendre des précipitations plus faibles sur ses terres de sols minces. Le blé est également arrosé, mais plus rarement : « *C'est exceptionnel car on ne peut pas irriguer toute une ferme* » (S2, le 09 février 2016).

Ces deux exploitants précisent que l'irrigation est nécessaire et qu'elle est rentable puisqu'elle limite les pertes de productions : « *ça ne permet pas de gagner plus, mais ça permet de ne pas en perdre* » (S2, le 09 février 2016).

Les autres agriculteurs de l'échantillon n'irriguent pas. Ceux disposant de sols épais précisent que ce n'est pas nécessaire puisque la plante ne souffre pas assez du manque d'eau. De plus, en année normale où l'eau ne manque pas, l'irrigation engendrerait un excès d'humidité favorable au développement de pathogènes : « *Les céréales, plus on les arrose, plus on leur fout des maladies* » (N3, le 03 février 2016).

Quatre exploitants précisent que l'irrigation pourrait leur être bénéfique mais ils sont confrontés à des terres éparpillées ou au fait que les autorisations départementales sont désormais refusées. L'un situé à Bieville-Beuville (N8) au nord de Caen, souhaiterait irriguer ses pommes de terres et les autres cultures en cas de besoin s'il disposait de l'installation. Un autre au sud de Caen à Fierville-Bray (S1) pense que cela permettrait de sauver ses productions sur sols très minces lors des années de sécheresse. Deux autres-dans le même type de configuration, devraient s'arranger entre voisins ou remembrer pour que la technique soit rentable. Mais l'un d'entre eux précise que l'irrigation ne serait rentable que dans le cas de cultures à forte valeur ajoutée (pommes de terres, oignons, carottes) car l'arrosage du seul blé ne vaudrait pas le coût. Un élément confirmé par un autre agriculteur de la Plaine sud-est (S4).

Entretien avec l'exploitant « S1 » le 08 février 2016 :

« ça coûte très cher mais si vous voulez ... comment si vous voulez sauver une année sèche, si vous pouvez sauver une culture par exemple, si au lieu de faire quarante quintaux vous en faites le double c'est énorme [...] en trois mauvaises années vous aurez amorti et en général c'est des investissements que tu fais pour une carrière ».

Entretien avec l'exploitant « S3 » le 10 février 2016 :

« Faudrait faire les voisins ou remembrer [...] J'ai des terres 10 km d'un côté et 10 km de l'autre ».

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« J'ai pas une ferme qui soit suffisamment structurée pour irriguer. Pour irriguer faut avoir tout bien regroupé et moi j'ai ... j'suis autour, des petites parcelles ou réparties autour de la commune donc c'est très compliqué pour irriguer [...] il faudrait pouvoir tous se regrouper d'un côté ».

Finalement, la grande majorité des agriculteurs ne pratiquent pas l'irrigation en Plaine de Caen. Seuls deux irrigants ont été enquêtés, ce qui peut s'expliquer en raison du faible effectif du panel enquêté, notamment en partie sud. Ces deux agriculteurs précisent que les céréales sont arrosées parce que les dispositifs sont déjà disponibles pour d'autres cultures.

4.1.4. Le non labour et l'apport de matière organique pour retenir l'eau des sols

Les agriculteurs portent un regard attentif sur leurs sols puisqu'il s'agit de leur support de travail. Deux d'entre eux dont le siège de l'exploitation se situe en partie sud, ont précisé ne plus pratiquer le labour profond et favoriser les apports en matière organique pour lutter contre les sécheresses, les excès d'eau en surface du sol et son érosion.

Entretien avec l'exploitant « S1 » le 08 février 2016 :

« Ce que j'ai fait aussi pour éviter dans ces petites terres les problèmes de ... on ne laboure plus maintenant ... on s'est aperçu ... enfin de meilleures rétentions d'eau en ayant arrêté le labour. Les terres se comportent mieux quand c'est sec. [...] On les travaille de façon superficielle. Je ne sais pas, la matière organique s'accumule peut-être mieux sur les 20 premiers centimètres et j'pense du fait qu'il y ait une meilleure ... enfin qu'il y ait plus de matière organique au-dessus du sol, peut-être qu'il y a des meilleures rétentions d'eau. Et m'étant aperçu de ça, aujourd'hui je fais beaucoup d'échanges de fumier avec les agriculteurs ... on est tout près du Pays d'Auge. J'essaie de m'arranger avec des agriculteurs je leur donne de la paille en échange ils me donnent du fumier ».

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

*« **Enquêté :** On a des terres qui sont relativement filtrantes et le fait de ne plus labourer, on a des terres qui vivent mieux et l'eau s'infiltre naturellement par les galeries de vers de terre tout ça ... et il y a sans doute moins d'érosion ... bon il n'y a pas beaucoup de pente mais le fait de ne pas labourer et de laisser les résidus en surface ça limite l'érosion ça c'est sûr [...] C'est de l'agronomie ça ... pour moi un sol faut le travailler le moins possible. Un sol ça doit vivre tout seul ça les anciens j'pense que ils avaient peut-être pas les moyens qu'on a aujourd'hui, le matériel nous permet peut-être de ne plus labourer plus facilement qu'il y a trente ou quarante ans ... il y a trente ou quarante ans le labour c'était un ... un moyen de désberber ... aujourd'hui le moyen de désberber on a la chimie, après je dis pas que c'est mieux hein, la chimie ça nous permet de moins travailler le sol et ... et on a des sols qui vivent bien quand on les laisse ... quand on les laisse travailler nous-mêmes [...] On fait des couverts végétaux qui ... une racine travaillera toujours mieux qu'un outil ça c'est sûr [...] Un sol qui vit mieux bah il retient mieux l'eau et les phénomènes climatiques coup de chaleur ou excès d'eau le sol tamponne mieux qu'un labour. Quand il pleut le labour il se referme et ça y est ça vit plus il y a de l'érosion ... c'est mort quoi ... une terre qui est labourée pour moi elle vit beaucoup moins bien, elle vit mal. Après c'est choix que j'ai fait. Bon après c'est pas un choix que j'ai fait par rapport au changement climatique c'est un choix qu'ai fait parce que j'pense qu'ça améliore le sol ... un sol qui vit mieux ... bah la plante qu'est dessus elle s'implante mieux, vit mieux et résiste mieux aux impacts climatiques.*

***Enquêteur :** Et vous mettez de la matière organique ?*

Des effluents d'élevage tous les deux trois quatre ans quoi en moyenne tous les trois ans.

***Enquêteur :** Et vous laissez votre paille ?*

Enquêté : *Oui quasiment toutes les pailles sont là, incorporées, enfouies. C'est sur le long terme qu'on verra la différence j'pense.*

Enquêteur : *D'accord.*

Un sol ça se nourri (rigole). Mais bon tout ça c'est pas par rapport au changement climatique mais bon j'suis persuadé que ça peut aider.

Enquêteur : *ah oui ... pour avoir une meilleure rétention en eau ?*

Enquêté : *Ouais c'est ça c'est sûr. On voit bien les gars qui enlèvent tout depuis x années, qu'apportent jamais de matière organique ... ils ont des cultures qui au moindre problème climatique la culture elle accuse le coup plus rapidement que ... enfin moi je trouve après je peux me tromper ».*

Lors des entretiens informels réalisés avec Eric Lemarnier en Plaine nord à Anguerny, ce dernier précise également éviter le labour profond, destructurant et tassant le sol, ce qui favorise l'érosion et le ruissellement. La plante peut également connaître des difficultés à la levée, pour s'enraciner et satisfaire ses besoins en eau dans la mesure où l'eau précipitée ne pénètre pas dans le sol. Selon lui, le labour profond pourrait par ailleurs favoriser le retour de mauvaises herbes. Si des graines sont enfouies dans le sol par le labour, elles peuvent revenir en surface les années suivantes lorsque la terre est à nouveau retournée. En 2020, l'exploitant S1 informe qu'il ajoute désormais de l'engrais vert sur ses parcelles avec des effets bénéfiques pour l'orge. L'exploitant NS12 disposant de parcelles au nord et au sud de Caen, précise mettre du compost avant les betteraves, le colza et l'orge. Dans la partie sud il laisse les résidus de paille (après broyage) sur les parcelles. Un exploitant (N6) met également en avant que les couverts végétaux en intercultures, obligatoires l'hiver pour piéger les nitrates, permettent de limiter l'érosion et d'apporter de la matière organique.

Entretien avec l'exploitant « N6 » le 22 février 2016 :

« Faut y voir un bon sens agronomique parce que toute cette partie végétale qui se développe en cours d'hiver on la ... on la réinjecte dans le sol au printemps quand on recasse la culture ça reste dans le sol et inévitablement c'est de l'engrais vert » (N6).

4.1.5. Prise en compte des sols et de la météo pour les interventions dans la parcelle

L'exploitant tient compte de la météo pour réaliser les travaux de semis : généralement une période où le sol est ressuyé avec plusieurs jours secs. Ces conditions météorologiques lors des semis et de la période semis-levée sont importantes pour garantir de bons rendements comme le soulignent certains exploitants enquêtés :

Entretien avec l'exploitant « N4 » le 15 février 2016 :

« Si c'est semé en bonnes conditions qui va pas trop pleuvoir derrière ... que la levée sera facile... La répartition sera régulière [en évoquant le nombre de pieds dans la parcelle] ... et à partir de là ça vaut un semis de précision [...] ça compte beaucoup ce qui suit ... ce qui suit si on a la chance qu'il fasse deux jours de beau derrière que la terre blanchisse ... et bien elle se, elle s'endurcit un peu et quand la graine est prête ... quand la plante est prête et bien tout lève facilement, que s'il y en a qui crèvent dessous et là [ce sera] moins bien réparti ».

Entretien avec l'exploitant « N1 » le 04 février 2016 :

« 80 % de son rendement se fait au semis, si il est semé dans d'bonnes conditions vous aurez certainement une bonne récolte, si vous l'omez dans d'la boue y aura d'mauvaises levées et vous aurez de mauvais rendements ».

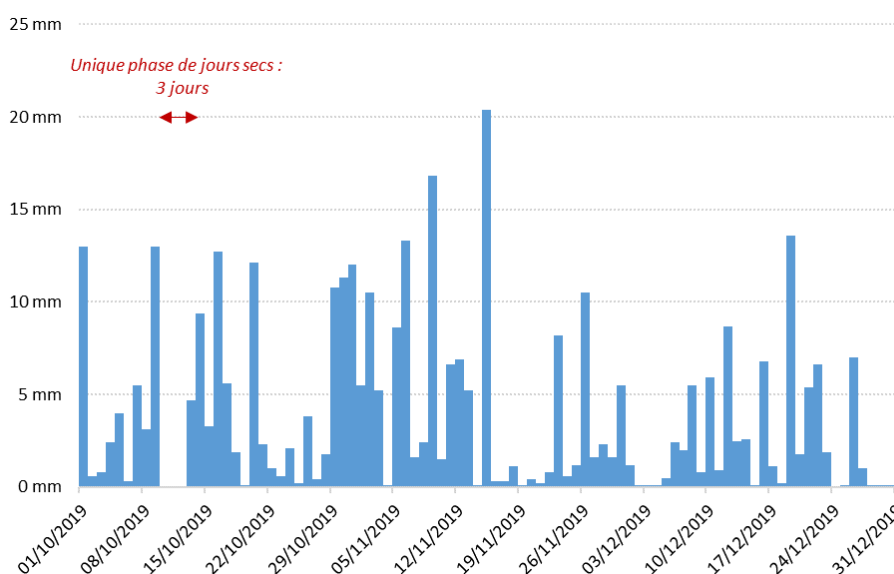
D'ailleurs, l'automne 2019 constitue un exemple remarquable de la dépendance de l'agriculteur à la météo pour semer le blé tendre d'hiver. Du 1^{er} octobre au 31 décembre, ce qui correspond à 92 jours, 59 jours de précipitations significatives ($RR \geq 1$ mm) sont relevés (64 %). Mais si l'on tient compte des jours où les précipitations sont inférieures à 1 mm, il n'y a eu seulement que 4 jours de véritablement secs (**Figure 112**). Les agriculteurs ne disposaient réellement que des 10, 11 et 12

octobre pour semer. Les jours de pluie se sont ensuite succédés, les sols ont atteint la capacité au champ jusqu'à se trouver en surplus hydrologique et rendant impossible les semis. Les dates de recommandations pour les variétés déjà achetées par les exploitants furent dépassées. Certaines parcelles déjà semées n'ont pas pu profiter de conditions de ressuyage pour favoriser la levée de la plante, avec parfois de l'eau stagnante asphyxiant le végétal.

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 09 juin 2020 :

« Tu prends un automne comme l'année dernière où rien n'a été semé avant le 15 octobre. Et bah t'en as qui n'ont pas pu semer un hectare. J'exagère mais il y en a qu'on semé péniblement, octobre, novembre, décembre, janvier, qu'on re-semé qu'on recasé trois fois, qu'on changé les variétés⁹³ [...] y en a à la fin en mars ils ont semés du blé de printemps [...]. Là cette année 10-15 octobre quand il va faire beau y vont dégainer parce que y vont assurer ».

Figure 112 : Les précipitations journalières entre le 1^{er} octobre 2019 et le 31 décembre 2019 à Caen



La couverture pédologique est également une variable à prendre en compte. Les sols épais mettent plus de temps à se recharger en eau que les sols minces lorsque l'ETP devient inférieure aux précipitations. Par conséquent le surplus hydrologique arrive plus tardivement. La texture du sol engendre aussi des conditions de semis différentes. Une parcelle argileuse est plus pénible à travailler. Les semis tardifs de blé, en novembre par exemple, ne sont pas envisageables puisque le sol est moins filtrant qu'un limon. Par conséquent, la terre devient collante, ce qui engendre des difficultés d'accès aux parcelles et le matériel qui peut endommager la structure des sols (tassement). Ces difficultés peuvent aussi être rencontrées pour les semis de printemps :

⁹³ Dans le cas de semis trop tardifs, les dates de préconisation pour semer les variétés initialement achetées étaient dépassées. Les exploitants ont donc acheté de nouvelles variétés correspondant à la période à laquelle les semis ont été reportés. Cette solution a pu aussi être envisagée pour les parcelles n'ayant pas levé.

Entretien avec l'exploitant « N4 » le 15 février 2016 :

« Elles absorbent beaucoup moins [l'eau] et elles restent beaucoup plus longtemps humides ».

Entretien avec l'exploitant « N1 » le 04 février 2016 :

« Si on récolte nos betteraves au mois d'octobre on risque d'y rester avec le matériel donc on évite d'y aller avec ces cultures-là [...] faut bien calculer son coup, c'est pareil on ne peut pas y aller trop tard on va s'emer du blé là-bas au mois d'octobre, de novembre c'est prendre un risque donc on essaye de semer au plus tôt et on fait souvent des cultures de blé sur blé, voire blé, après un blé de l'orge et après un blé de l'avoine, et quand on est obligé de faire une culture de printemps on essaye de faire du lin mais c'est pas l'hop non plus parce que c'est de la terre superficielle. On fait des féveroles et du colza ».

Entretien avec l'exploitant « N7 » le 15 février 2016 :

« [Il faut faire attention] à la préparation des terres, à la façon de les cultiver [...] on va faire attention à la date de labour ... on va faire attention que les terres ne sèchent pas trop au printemps et par exemple de rouler pour bien garder la fraîcheur [...] choisir les dates de semis ... pas trop travailler les terres ... enfin ce sont des terres argileuses y aller au bon moment ».

« Vous allez faire des rates, la terre ça va coller au semoir, ça va pas être des bonnes conditions de semis ».

A contrario dans le cas de sols minces et filtrants, comme au sud de Caen, ces contraintes ne sont pas évoquées par les agriculteurs. Les terres seraient même plus faciles à travailler.

Entretien avec l'exploitant « S1 » le 08 février 2016 :

« Chez nous les terres superficielles se travaillent toutes seules parce que elles ne sont pas tirantes du fait qu'il y a beaucoup de cailloux (rives) et beaucoup de ... de ... enfin pas de sable mais de terres légères, elles sont faciles à travailler. Et les cailloux c'est pas du silex c'est du caillou calcaire et ça engendre pas de casse au niveau du matériel. Donc non au contraire elles sont plus faciles à travailler que les bonnes terres ».

L'exploitante N7 explique que les sols ne se réchauffent pas à la même vitesse et dit en tenir compte pour choisir les dates de semis. Les parcelles argileuses et profondes sont plus froides. L'exploitant S4 ayant des sols minces au sud de Caen constate quant à lui que les petites terres se réchauffent plus vite. Aussi les sols de texture argileuse favorisent la croûte de battance lors des précipitations, ce qui empêche ensuite l'eau de pénétrer dans le sol et réalimenter la réserve utile.

Entretien avec l'exploitant « N7 » le 15 février 2016 :

« On a des très bonnes terres sur Cheux où tu peux creuser trois mètres tu ne vas pas trouver un mètre de cailloux. Mais ce sont des terres plus froides. Donc euh ... on va jamais commencer par Cheux parce qu'on sait que c'est plus froid, faut attendre ... par exemple au printemps on sait qu'il va falloir la travailler après d'autres ... faut attendre ... Par exemple au printemps on sait qu'il va falloir aller la travailler après d'autres. Il faut être patient parce que ça va s'battre [évoque la croûte de battance], si y pleut ça va ... le sol va devenir tout lisse ... après ça va devenir comme du cailloux dès que ça sèche [...] ce n'est pas du tout la même qualité de terre » (N7).

Entretien avec l'exploitant « S4 » le 17 février 2016 :

« Le réchauffement du sol se fait beaucoup plus vite en petite terre qu'en grosse terre » (S4).

Les interventions sur les exploitations s'effectuent donc en lien avec les conditions météorologiques : trop d'humidité pour les labours et les semis limitent l'accès aux parcelles. Ces mêmes conditions sont prises en compte pour les apports en azote (de février à avril), en produits phytosanitaires (fongicides de février à juin ; insecticides en novembre, mais et juin ; régulateurs de croissance en mars ou avril) ou encore les récoltes.

Entretien avec l'exploitant « N4 » le 15 février 2016 :

« Est-ce que l'intervention qu'on fait va être bien liée à la météo qui va y avoir derrière, liée ou même d'anticiper avant quoi lorsqu'on est en passe de faire un semi, faire une intervention que la météo nous crée problème ».

Entretien avec l'exploitant « N7 » le 15 février 2016 :

« Au moment des semis nous on regarde la météo dix fois par jour ».

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« On prend la météo comme elle vient et on essaye d'adapter nos stratégies pour travailler dans les champs » (S5).

En définitive, les exploitants agricoles retiennent les variétés les plus adaptées à leurs sols et au climat. Le choix de la date de semis intervient également dans cette adaptation mais tout en tenant compte des préconisations techniques relatives aux variétés. L'irrigation est pratiquée par deux exploitants de l'échantillon pour compenser le déficit pluvial sur les petits sols. Le non labour et l'apport de matière organique sont également pratiqués pour favoriser la rétention en eau des sols. Enfin, que ce soit pour l'organisation des semis, des récoltes ou pour les différentes interventions au cours du cycle (fertilisation azotée, produits phytosanitaires), les conditions météorologiques sont scrutées par les exploitants.

4.2. Le changement climatique : une inquiétude ?

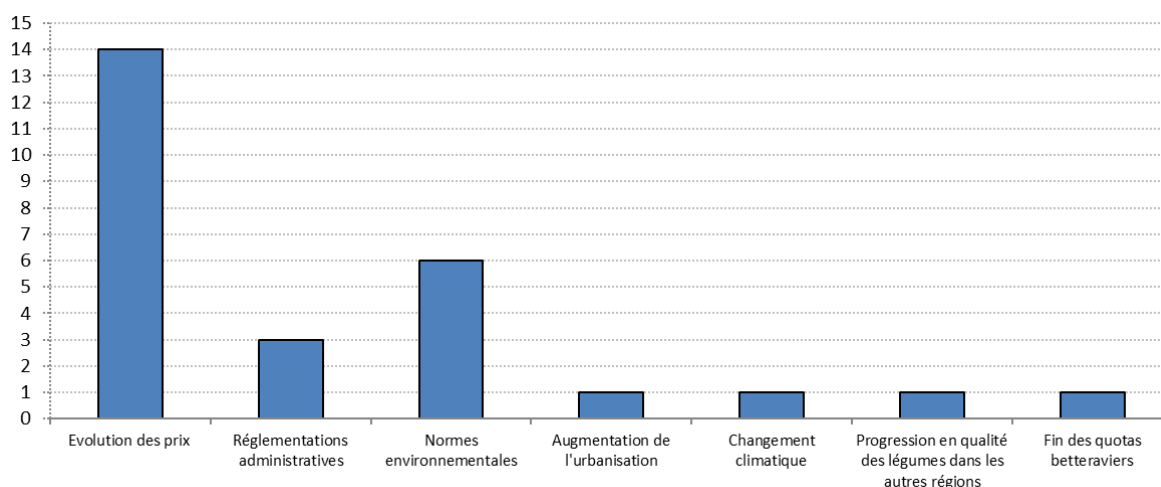
Les sous-parties précédentes montrent que l'agriculteur adapte sa façon de cultiver en fonction des sols et du climat. Par conséquent, le changement climatique pourrait constituer une inquiétude que tente de vérifier l'enquête auprès des exploitants rencontrés.

4.2.1. Les inquiétudes immédiates

La question ouverte 10a aborde les éléments d'inquiétude des céréaliers concernant l'avenir de leur exploitation. Sans information préalable des enquêtés du thème de l'étude, l'objectif est d'apprécier la prise en considération des effets du changement climatique sur la gestion de leur exploitation.

Très loin devant les préoccupations liées au climat, l'évolution des prix des productions agricoles semble constituer la principale inquiétude des exploitants enquêtés, d'autant que les cours du blé étaient en baisse au moment de l'enquête en 2016 (**Figure 113**). Ils sont 14 à évoquer la volatilité des prix. Elle engendre des fluctuations de trésorerie qui engendrent des difficultés pour le remboursement des prêts bancaires. En partie sud de Caen, où les sols sont minces, la concomitance entre une sécheresse (engendrant de faibles rendements) et une baisse des prix est particulièrement crainte. L'exploitante de Morteaux-Couliboeuf témoigne qu'il lui est déjà arrivé d'emprunter lorsque le blé était vendu en dessous de 150 €/t en même temps qu'une année à faible rendement (**Figure 114**).

Figure 113 : Les inquiétudes des céréaliers (question ouverte 10a)



Réalisation : François Beauvais., 2016

Entretien avec l'exploitant « N8 » le 23 février 2016 :

« Les matières premières [c'est-à-dire les cultures qu'il produit] sont soumises un peu aux éléments mondiaux économiques donc c'est un p'tit peu l'inquiétude pour l'avenir du métier ».

Entretien avec l'exploitant « S1 » le 08 février 2016 :

« La variation des prix en ce moment c'est assez impressionnant quand même ... euh ça peut varier de plus de 200 euros à ... enfin depuis que j'me suis installé le blé ... le plus bas que j'ai vendu c'était 90 euros et le plus haut que j'ai vendu c'était 250 euros la tonne [...] l'amplitude de prix ... ça te fait des variations au niveau trésorerie ».

Entretien avec l'exploitant « S4 » le 17 février 2016 :

« Nous la problématique dans nos terres c'est le rendement en fin de compte parce que c'est très ... vraiment ... hétérogène on peut très bien faire de très bons rendements une année même quelque soit le prix on fait une bonne marge et puis l'année d'après un peu de sécheresse et voilà de l'eau au mauvais moment et puis on chute énormément ... donc voilà donc c'est surtout au niveau

du prix ... faudrait avoir un prix comme on a pu avoir il y a deux trois ans assez ... autour de 200 euros ... bon là ça va donc comme actuellement il est autour de 130/120 voilà ça fait pas la même chose ».

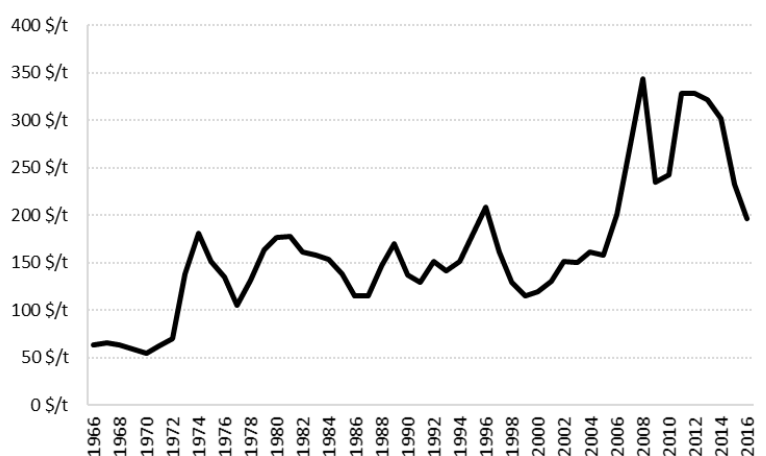
Entretien avec l'exploitant « NS12 » le 02 mars 2016 :

« Tant qu'on arrive à avoir des rendements corrects ça va même si le revenu baisse, mais faut pas tomber sur une mauvaise année sinon y aurait de la casse ».

Entretien avec l'exploitant « N6 » le 22 février 2016 :

« La volatilité j'pense que le système français ... euh ... y est pas adapté et y est pas prêt du tout ... euh ... moi je veux bien entendre qu'il faut qu'ont puisse faire face à la volatilité des cours sauf que de l'autre côté j'ai entre autres des engagements financiers et bancaires et mon banquier est pas prêt à la flexibilité des cours ... quand je vends un blé 100 euros et quand je le vend 180 j'ai pas du tout la même rentrée d'argent pour autant j'suis en annuités constantes donc mon degré d'annuités est le même donc faudrait que je puisse dire à mon banquier 'bah écoute là mon blé est descendu à 100 euros bah ... on ... atténue le montant des remboursements ou là qu'il est à 180 on augmente le montant des remboursements sauf qu'aujourd'hui on est dans un système ... bah je sais pas si c'est que français mais pour c'qu'on connaît chez nous qu'est vachement réglementé avec des prêts bonifiés entre autre quand on est jeune agriculteur, des jeunes installés où c'est assez figé et on peut ... on a pas cette souplesse-là donc c'est un peu problématique et faut trouver d'autres solutions [...] parce que aujourd'hui tu fais un bon résultat parce que les prix sont là tu vas te faire taper en MSA et en impôts et ce qui ... si l'année d'après les cours chutent tu paies ton impôt ... enfin ta MSA sur les trois exercices précédents ... l'assiette de calculs ... donc si cette année 2016 les prix s'effondrent pour autant si les trois années précédentes ont été meilleures on a augmenté l'assiette de revenus donc là on va augmenter la MSA au moment où la trésorerie est au plus bas c'est pas ça dont on a besoin ... ce qu'on a besoin c'est à la rigueur avoir des leviers incitatifs sur ces bonnes années-là pour engranger de la trésorerie sans se faire taper sur la tronche fiscalement et pouvoir la redégager quand on en a besoin les années comme ça ... mais ça c'est tout un système, une réglementation ».

Figure 114 : Evolution du prix annuel du blé de 1966 à 2016



Réalisation : François BEAUVAIS (données UNCTADSTAT - Nations Unies ; Etats-Unis FAB Golfe du Mexique)

Six agriculteurs ont cité les normes environnementales jugées trop contraignantes au moment de la publication du plan Ecophyto (octobre 2015) confirmant l'objectif de réduire de 50 % les produits phytosanitaires à l'horizon 2025. Les traitements devront être remplacés par les interventions mécaniques telles que les ratissages mais dont l'efficacité est moindre. En Plaine de Caen, les terres très fertiles qui favorisent les adventices sont éliminées avec des produits phytosanitaires pour éviter des pertes d'environ 20 à 25 %. Cette inquiétude est confirmée par le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully en 2020 pour les agriculteurs du secteur du nord de Caen. Un céréalier témoigne d'ailleurs que dans le cas d'une interdiction de ces protections contre les mauvaises herbes, les conditions de travail et les rendements l'inciteraient à revoir son assolement et à privilégier l'élevage.

« L'intervention mécanique, déjà quand on bouge la terre on provoque de la germination et de la levée de mauvaises herbes, plus d'une part, et faut pouvoir intervenir de manière, de manière judicieuse vis-à-vis de la météo et ça, ça peut être un gros inconvénient. De toute façon en efficacité de désherbage on peut pas être mieux qu'avec un désherbant ... après concernant effectivement l'environnement c'est sûr que ce serait mieux ... si on avait la chance d'avoir des périodes de sec assez longues et des périodes concentrées en humidité ce serait facile de passer entre deux et de faire du bon boulot ».

« Le désherbage mécanique ne permet pas de tout enlever [...] sur les entre deux on laisse des plans ».

Je veux bien [que les traitements soient réduits] mais faut qu'on arrive à gagner notre croûte aussi ... et puis bon tout ce qu'est engrais azote tout ça on en a de plus en plus de contraintes ... on est ... on est en zone de captage nous en plus ... donc bon on ne fait pas ce qu'on veut il y a des restrictions ».

« Moi j'pense que la problématique ça va être ça. Le climat moi c'est pas ça qu'j'ai plus peur c'est les dés herbages. Chez nous on a des terres trop fertiles pour dés herber mécaniquement. Alors peut-être que si le climat change qu'il devient plus sec, peut-être qu'on pourra dés herber avec des herces à étris [...] Quand on fait du binage moi j'les bine mes betteraves par exemple pour éviter le dés herbage ... j'ai une ratisseuse toute neuve que j'ai achetée cette année, là qui passe entre les rangs parce que les betteraves sont semées tous les 45 donc on peut dés herber c'est pas comme du blé c'est semé en ligne. Mais si tu bines et que le lendemain y pleut, c'est mort. Bah c'est comme un jardin quand l'enlève ... ça repique, ça repart, l'eau ... c'est foutu, à la main faut bien mettre les racines en l'air mais des fois, si t'arrache l'herbe si jamais y pleut ça r'part. Donc il y a des régions en France c'est beaucoup plus facile tu peux faire du blé bio parce que ils ont des périodes beaucoup plus sèches ... le climat est beaucoup plus sec que nous c'est très fertile. J'pense que chez nous ça va être compliqué. Moi si faut que je passe en bio j'met tout herbe ... que des prairies avec des animaux là ça marche. Mais faire des céréales en bio ... Moi j'ai un peu peur dans nos terres ».

Nb : compte-tenu du sujet sensible, les codes des exploitants ne sont pas spécifiés.

Les réglementations administratives trop contraignantes sont citées à trois reprises. Il s'agit des trois exploitants dont l'entretien a été collectif. Bien que la réponse de l'un peut influencer celle de l'autre, ces trois individus sont unanimes. L'exploitante (S2) affirme aussi que les réglementations administratives sont des sources d'inquiétude⁹⁴.

Entretien avec les exploitants « N9, N10 et N11 » le 18 février 2016 :

« **Enquêteur :** Et alors sinon est-ce qu'il y a des éléments qui vous inquiètent pour l'avenir de votre exploitation ?

N11 : La réglementation

N10 : Bah oui la réglementation

N11 : Faut qu'ils arrêtent

Enquêteur : La réglementation dans quel ordre ?

N10 et N11 en même temps : dans tout en général !

N11 : Ne serait-ce que pour la PAC

N9 : Ils disent qu'il faut de moins en moins de papiers mais ils n'arrêtent pas ils nous demandent des trucs sans arrêt

N10 : C'est de pire en pire !

N9 : Le pire c'est que c'est eux [l'administration] qui font des erreurs et après c'est l'agriculteur qui doit corriger. On les voit à la TV ils sont nerveux en ce moment mais y a de quoi péter un câble quand tu reçois des trucs comme tu as reçu l'autre jour là ... [...] Les règlements, les normes, les mises aux normes, pffff ... »

« On a à faire à une gestapo administrative » (S2).

Trois autres inquiétudes évoquées par le même agriculteur (N2) sont citées : la suppression des quotas betteraviers qu'il associe à de futures crises de surproduction et de baisse des prix, l'essor de l'urbanisation pour la perte de terres agricoles et enfin la moindre qualité des légumes par rapport à d'autres régions. Le changement climatique constitue pour lui une inquiétude, mais pour

⁹⁴ Cet élément n'entre pas en compte dans la question 10a puisqu'elle l'évoque plus tard au cours de l'entretien (entretien téléphonique dans le cadre du questionnaire).

l'agriculture en générale et à long terme. Il précise qu'à l'échelle de sa carrière il ne sera certainement pas affecté. En 2016, le changement climatique n'était donc pas une inquiétude clairement énoncée pour les exploitants enquêtés en Plaine de Caen.

4.2.2. Des réactions partagées lors de l'évocation du changement climatique

Sur l'ensemble de l'échantillon, seulement 7 exploitants sur 16 expriment une inquiétude face au changement climatique (question 11⁹⁵). La majorité des agriculteurs, quelle que soit la localisation du siège d'exploitation ne sont donc pas inquiets, même si la faible représentativité de l'échantillon ne permet pas de généraliser ce résultat.

En partie nord de la Plaine de Caen, certains évoquent une inquiétude pour l'agriculture, mais pas pour leur carrière. Deux agriculteurs ayant répondu "non" à la question 11 du questionnaire, reviennent sur leur position lors de l'entretien. L'un (N2) incrédule face au changement climatique, concède qu'il peut être problématique à plus long terme pour le lin. Il dit en revanche que sa situation en partie nord de la Plaine de Caen lui permet de tenir ce discours. Un autre (N6) dit ne pas être inquiet : « *Aujourd'hui ça ne me préoccupe pas plus que ça, c'est pas pour autant que je fais tout et n'importe quoi sur mon exploitation* ». Il ajoute toutefois que cela peut être préoccupant 'demain' mais s'interroge surtout sur les véritables effets du changement climatique sur son métier et les exploitations. Pour une agricultrice (N7), il n'est pas la principale préoccupation à l'heure actuelle, mais elle ajoute qu'il peut être préoccupant et qu'il faudra s'adapter. Un autre, agriculteur à Biéville-Beuville (N8), justifie sa réponse en disant qu'il est inquiétant dans le sens où le climat constitue le principal allié ou ennemi de l'agriculture. Un exploitant de Secqueville-en-Bessin (NS12), ayant aussi des terres en partie sud, est directement inquiet par rapport à un constat qu'il associe au changement climatique, à savoir les étés plus humides perturbant les récoltes. Un agriculteur à la retraite de Secqueville-en-Bessin (N4) est davantage préoccupé pour le Sud de la France et la Plaine de Falaise. C'est pourquoi il a répondu 'oui'. Néanmoins, il pense que les conséquences seront moins fâcheuses en bordure littorale. Au contraire, un exploitant de Putot-en-Bessin (N1), évoque des aspects positifs du changement climatique pour la partie septentrionale de la Plaine de Caen : « *Plus y fait sec et plus les rendements augmentent* ». Néanmoins, il ne se sent pas concerné en précisant qu'il sera en retraite d'ici que le climat change. Le technicien de la Coopérative de Creully, confirme également ce constat. Pour lui les sols épais et la proximité de la mer permettent de contrer le manque d'eau et l'échaudage thermique. Les exploitants qu'il conseille s'adaptent aux conditions locales connues mais n'intègrent pas encore le changement climatique dans la gestion de leurs exploitations. Les inquiétudes sont plutôt relatives aux prix des cultures et aux réglementations associées à l'objectif de réduction de l'usage des produits phytosanitaires. Cependant, il précise que si le changement climatique devait inquiéter les agriculteurs du secteur, ce serait plutôt par rapport au risque de ravageurs et de maladies. Entre 2018 et 2021, Eric Lemarinier est revenu plusieurs fois sur ces questions au cours des entretiens informels. Pour lui, les échaudages thermiques et les fortes chaleurs observées ces dernières années sont des facteurs limitants et engendrent des pertes de production, mais les sols épais et la proximité de la mer atténuant la chaleur, lui permettant de garder un potentiel de production très élevé. Quatre exploitants ne sont pas inquiets et trois d'entre

⁹⁵ Un agriculteur (N3) a répondu « oui » au questionnaire pour le lin. En revanche à l'entretien il révèle son point de vue : il ne croit pas au changement climatique et n'est pas inquiet. Il est donc comptabilisé dans les « non ».

eux pensent que le changement climatique n'existe pas : « *Il n'y a pas de changement climatique c'est encore un coup ... c'est d'la politique ... j'suis en train de lire moi ... euh ... d'un météorologue ... et bah dit donc ... vous les jeunes faut le lire ... ça vaut le coup ... faut le lire celui-là ... il y a eu dix fois pire que ce qu'on a depuis dix ans là ça n'a rien à voir du tout il y a eu des choses atroces ... des choses pas possibles* » (N10).

En partie sud de la Plaine de Caen, deux individus évoquent leur inquiétude. L'agricultrice S2 de Morteaux-Couliboeuf précise qu'elle est inquiète car les évolutions climatiques perturbent les conditions de travail et souligne des difficultés à maîtriser la météo (notamment au moment des moissons). L'agriculteur S3 à Estrées-la-Campagne accordait peu de crédit auparavant mais a changé d'avis sans toutefois donner des éléments précis sur l'impact pour son métier. Les trois autres répondent non, en considérant que cela n'impactera pas la suite de leur carrière.

Enfin, pour le technicien de la société Lepicard, en 2016, les prix constituaient également la première inquiétude, loin devant le changement climatique pas encore perçu et évoquant une adaptation de la filière. En 2020, l'exploitant S1 exprime désormais son inquiétude tout comme plusieurs de ses collègues sur le secteur sud, car les cultures comme le lin ou le colza sont maintenant très pénalisées sur les sols minces. C'est également problématique pour le blé. Les leviers sont restreints car les céréaliers ne peuvent pas faire d'autres cultures comme les pommes de terre ou l'oignon dépendantes de l'irrigation. Les productions végétales possibles sont limitées à l'orge, le blé, le lin, le colza, l'escourgeon. Il envisage de développer la luzerne, plante qui se comporte bien en "petites terres" et qui pourrait être une alternative au soja (au même titre, selon lui, que le recours aux graines de lin pour l'alimentation de porcs – exemple d'une exploitation de Seine-Maritime). L'exploitant représentant FDSEA précise également en 2020, être inquiet et que cette inquiétude concerne désormais une majorité des exploitants agricoles du sud de Caen. Cela nous a été confirmé lors d'un conseil d'administration en septembre 2021 durant lequel nous présentons le changement climatique en Normandie et ses impacts sur l'agriculture.

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« Pas une inquiétude parce que en Normandie on a quand même pas les ... les grosses catastrophes ... on va dire on a pas les gros coups de gel qui détruisent les cultures comme dans les pays de l'Est on a un climat quand même assez tempéré un climat conti ... [il se reprend] un climat océanique donc on est sous l'influence du climat océanique donc pour l'agriculture, pour le secteur c'est quand même favorable, on s'aperçoit depuis deux-trois ans qu'on a des étés qui ne sont pas forcément plus chauds que d'autres ... plutôt on a peut-être des étés plus humides qu'avant ... et par contre les hivers sont moins marqués les saisons sont moins marquées je trouve ... bon après ça veut rien dire ».

Entretien avec l'exploitant « S3 » le 23 février 2016 :

« Au début je me disais c'est du pipo, sauf que maintenant on voit des catastrophes. Il y a des cycles de chaleur, de sécheresse ... ce n'est plus la même Normandie d'avant. Et c'est inquiétant car la France réfléchit toujours sur le tard ».

« Le climat change on le sait, on s'adaptera et puis c'est tout ... après qu'il fasse plus chaud ou plus froid effectivement ça peut être inquiétant par rapport aux stades mais j pense qu'on s'adaptera ou la génétique s'adaptera à l'évolution du climat »

La question 11 confirme le fait que le changement climatique n'inquiète pas véritablement les exploitants de la Plaine de Caen. Il n'y a pas de tendance relative à la localisation de la personne enquêtée, même si les discours des agriculteurs de la partie sud en 2020 mériteraient une enquête plus approfondie (en gardant à l'esprit qu'ils peuvent faire suite au déficit hydrique et à la canicule de 2019 sur les petits sols). Il n'y a également pas de généralité possible en fonction de l'âge et du

niveau d'étude de l'agriculteur interrogé⁹⁶. Enfin, on constate que les exploitants ont plutôt tendance à associer le changement climatique au long terme et non pas comme un processus en cours.

L'agriculteur s'adapte donc aux conditions locales qui regroupent les sols, le climat et ses aléas connus pouvant survenir au cours du cycle de la plante, les conditions météorologiques à court terme et l'incertitude associée. C'est dans ce but que les variétés semées sont différentes selon les contextes, notamment entre la partie nord-ouest et sud-est de l'agglomération caennaise. Aussi, l'exploitant détermine les dates et les modes d'intervention les plus appropriés. Le changement climatique qui pourrait modifier ces conditions locales ne semble pas constituer une inquiétude pour les agriculteurs de la Plaine.

⁹⁶ Pour ce qui concerne l'inquiétude ou non par rapport à l'âge, il est possible de penser que les plus jeunes pourraient être plus inquiets que les plus anciens, plus proches de la retraite. Cependant, l'âge moyen des exploitants ayant répondu 'oui' à la question 11 est de 52 ans contre près de 49 ans pour ceux ayant répondu 'non'. Sur les trois agriculteurs de moins de 40 ans, deux sur les trois se disent inquiets. Sur les quatre agriculteurs de plus de 60 ans, trois sont inquiets. Celui qui ne l'est pas a 70 ans. Sur les sept agriculteurs ayant entre 40 et 59 ans, seulement deux sur sept disent être inquiets. Toutefois, ce n'est pas parce qu'un agriculteur est inquiet qu'il a remarqué des changements au cours de sa carrière pouvant être rattachés au changement climatique. Des éléments tels que les discours ambiants relatifs aux médias et à la profession sur les catastrophes naturelles, les politiques publiques (interdiction d'irriguer par exemple), sa position face à ces discours ... peuvent influencer la perception que l'individu se fait du changement climatique et des risques que l'agriculture encoure.

Le niveau d'étude ne met pas également en avant une plus forte inquiétude liée au changement climatique. L'agriculteur semblant être le plus inquiet face à ce dernier est détenteur d'un diplôme d'ingénieur en agronomie (BAC + 5). Toutefois, sur les cinq agriculteurs ayant un niveau d'étude plus élevé que le Baccalauréat, ils ne sont que deux à être inquiets.

4.3. Evolutions climatiques constatées par les exploitants agricoles

L'enquête auprès de la filière agricole s'est intéressée aux évolutions climatiques constatées par les exploitants qui permettent de mettre en évidence des aléas ou des conditions météo-climatiques défavorables pour les productions.

4.3.1. Des évolutions constatées par les exploitants agricoles

Sur les 16 personnes interrogées⁹⁷ en 2016, 8 constatent des évolutions climatiques au cours de leur carrière (Tableau 29). Ces individus les rattachent au changement climatique lors de la question 13a du questionnaire. Mais en intégrant les discours relatifs à l'entretien, deux exploitants reviennent sur leur première position et expliquent avoir constaté un changement. L'ancienneté dans la profession et la moyenne d'âge de ces agriculteurs est de 25 et 50 ans (médiane de 24 et 49,5 ans). Pour ceux répondant « non », elles sont respectivement de 32 et 55 ans. Sur les 3 exploitants ayant moins de 40 ans, 2 répondent « oui » ; même réponse pour 2 des plus de 60 ans (sur 4) et pour 5 des 9 agriculteurs de 40 à 60 ans. Il est difficile de dégager une relation entre l'âge et la réponse à la question, d'autant plus que l'échantillon est petit, mais on constate que la réponse « oui » regroupe des individus plus jeunes que ceux répondant « non ».

Tableau 29 : Réponse des exploitants agricoles de la Plaine de Caen à la question 13 du questionnaire

Code enquêté	Ancienneté (ans)	Age (ans)	13. Avez-vous remarqué des changements liés à votre activité qui peuvent y être rattachés [au CC] ?
N1	24	49	Oui
N2	22	49	Oui
N3	24	52	Non
N4	43	65	Non
N5	24	50	Non
N6	8	40	Non
N7	38	57	Non
N8	9	31	Oui
N9	16	38	Non
N10	48	70	Non
NS12	8	37	Oui
S1	23	45	Oui
S2	40	61	Oui
S3	27	64	Oui
S4	25	50	Non
S5	22	45	Oui

Mais quelles sont les évolutions constatées ? Quatre évoquent des semis plus précoces. Cinq constatent des étés plus humides. Les hivers plus doux reviennent cinq fois également. Les moissons avancées sont constatées à trois reprises, tout comme les longues périodes de pluies

⁹⁷ Ici on comptabilise le couple N9-N11 comme une seule personne.

suivies de longues périodes de sec et qui interviennent au mauvais moment. Ces réponses spontanées sont affinées au cours de l'entretien, (**Tableau 30**). Finalement ils sont neuf à constater que les hivers sont plus doux. Parfois l'exploitant le précise directement en répondant à la question, ou bien l'évoque après réflexion. Pour la suite de l'analyse nous retiendrons les évolutions constatées à la fois au cours du questionnaire et de l'entretien, que l'exploitant l'évoque de lui-même ou bien en répondant à une question.

Tableau 30 : Synthèse des évolutions constatées par les exploitants agricoles enquêtés au cours des questionnaires et entretiens (2016)

N°enquêté	Dates de semis avancées	Hivers doux	Avancée des récoltes	Etés humides (récolte)	Précipitations moins régulières	Stress hydrique	Hausse de l'échaudage	Modification assolement	Ancienneté
7	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	24
N2	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	22
N3	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	24
N4	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	43
N5	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	24
N6	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	8
N7	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	38
N8	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	9
N9	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	16
N10	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	48
NS12	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	8
S1	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	23
S2	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	40
S3	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	27
S4	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	25
S5	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	22

Quatre exploitants ne constatent aucune évolution d'ordre climatique. N4 ne remet pas en cause le changement climatique et dit faire confiance aux scientifiques. Toutefois, il ne le constate pas pour l'agriculture en Plaine de Caen.

Entretien avec l'exploitant « N4 » le 15 février 2016 :

« Moi j'ai pas un énorme ressenti par rapport à ça [le changement climatique] ici. Après ailleurs on n'y est pas » (N4).

N5 pour lequel nous disposons uniquement du questionnaire, n'a pas accepté d'effectuer l'entretien en précisant qu'il n'en voyait pas l'utilité compte tenu qu'il ne constatait aucune évolution et ne croyait pas au changement climatique. C'est le même constat pour N10 et N9⁹⁸ à la différence qu'ils ont accepté l'entretien. Des évolutions sont constatées mais elles sont rattachées à la variabilité interannuelle du climat en précisant notamment que les événements météo-climatiques que certains interprètent comme des évolutions ont déjà eu lieu dans le passé (sécheresse de 1976 par exemple). Les changements seraient aussi causés par l'évolution des variétés et/ou des pratiques. Mais ce raisonnement a pu être influencé par la lecture d'un ouvrage évoquant le climat du passé puisqu'il précise « qu'il y a eu pire dans le passé »⁹⁹, ce qui le rassure sur le fait qu'il n'y aurait pas de changement climatique.

Le technicien production végétale de la société Lepicard ne constate également pas d'évolutions perceptibles dans la Plaine de Caen. Les événements météo-climatiques sont également rattachés à la variabilité du climat. Pour le technicien de la Coopérative de Creully, l'agriculteur ne perçoit pas

⁹⁸ Les entretiens ayant été effectués ensemble, N10 a pu influencer N9.

⁹⁹ Cette personne ne maîtrisant probablement pas les causes des variations à l'échelle des temps géologiques ni même les temporalités associées à ces changements.

le changement climatique en raison des progrès de la recherche agronomique pour certaines cultures (sans évoquer le blé).

Entretien avec un technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2016 :

« Le changement climatique on l'a pas perçu si vous voulez parce que tous les ans ça revient à peu près à la même chose ... nous tous les quelques degrés qu'on nous annonce tous les ans qu'on perd, nous reflété sur le terrain, c'est pas ressenti si vous voulez ... on a pas vu d'impact encore aujourd'hui ».

« Ok on a peut-être gagné des degrés et \times degrés par an comme on peut l'entendre avec des hivers plus ou moins doux mais aujourd'hui ... on dit que la nature est bien faite c'est-à-dire, je m'explique. On a pas eu d'hivers par exemple ... on a pas eu d'hiver cet hiver donc on disait que les cultures étaient très en avance mais aujourd'hui vous avez un mois de février froid, un mois de mars froid et puis ça y est on a rattrapé l'avance qu'on avait et on aura plus on va arriver dans des stades d'intervention dans des périodes entre guillemets normales, comme à l'habitude donc c'est pour ça que vous répondez comme ça est-ce que vous avez vu et observé le changement climatique dans les parcelles ... euh non pour l'instant on a pas ... oui il y a un changement climatique parce qu'on l'entend ok mais voir le constat à la parcelle ... non on a pas vu de choses fondamentales quoi ».

Entretien avec un technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« Le problème pour notre zone ... on ne peut pas parler de réchauffement climatique ... j pense que l'agriculteur ne s'en aperçoit pas j'sais si dans tes enquêtes si ... mais ils s'en aperçoivent pas j pense pas qu'ils s'en aperçoivent parce que ... d'un côté il y a le changement climatique et d'un autre côté il y a tout ce qui est recherche agronomique et je pense que l'évolution de la recherche agronomique est supérieure [...] Si tu prends, nous on regarde les rendements moyens. Les rendements moyens évoluent, enfin augmentent chaque année ... en lin la recherche variétale est vachement importante, par exemple en lin euh tous les ans toutes les variétés parce que y a de grosses recherches. Tous les ans y croissent des variétés. En lin le rendement filasse on va dire, augmente en moyenne tous les ans. Le pire c'est la betterave on a augmenté le rendement de 50 ou 60 % en peu de temps, le rendement sucre à l'hectare et tout ça c'est de la recherche variétale et aussi technique ».

Enfin on peut supposer que les durées des carrières des exploitants sont trop courtes pour constater des différences marquantes bien que certains comparent avec l'expérience de leurs parents. Par ailleurs il est difficile de percevoir des évolutions de paramètres climatiques sujets à la variabilité interannuelle, comme en témoignent deux exploitants :

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« A notre niveau nous on ne peut pas juger ... les données scientifiques elles sont là on les analyse comme tout le monde mais nous sur le terrain on a rien de révolutionné en 30 ans y a pas eu de révolutions par rapport au climat, c'est pas vrai. Même si ça a augmenté d'un degré en moyenne à notre niveau un degré de plus ou de moins ça ne se voit pas ... sincèrement ... y a toujours eu des périodes de sèches ... en 1976 il a eu une grosse sécheresse bon ça fait 40 ans maintenant c'est pas ... en 2001 il y a eu beaucoup d'eau, énormément d'eau ... bon après est-ce que c'est dû au réchauffement climatique ? [...] Vu ce qu'on entend dans tous les médias, c'est vrai qu'on voit les images de la banquise qui font, bon c'est certains, ou quand on va à la montagne, chez nous, les gens avec qui on discute qui sont à la montagne depuis longtemps y voient bien que les glaciers y sont de plus en plus haut. Donc eux ils s'en rendent compte plus facilement que nous ... mais bon ... [...] Mon système n'a pas évolué par rapport au changement climatique hein, mon système ... ou inconsciemment je l'ai fait évoluer mais y a pas eu de révolutions en 20 ans quoi ... ».

Entretien avec l'exploitant « N1 » le 04 février 2016 :

« Pour la température c'est facile à voir parce que ça varie pas autant que la pluie ... la pluie y pleut y pleut pas ... euh arriver à faire une moyenne dans sa tête c'est pas évident ... c'est pas évident de faire des moyennes ... mais la température, la date de semis ça on sait ».

4.3.2. Anticipation des dates de semis

Neuf exploitants agricoles constatent que les blés sont semés plus tôt qu'à l'époque de leurs parents (ou au début de sa carrière pour le plus ancien). Cette évolution ne serait pas rattachée au changement climatique mais au recours à des variétés différentes :

Entretien avec l'exploitant « N7 » le 15 février 2016 :

« On sème plus vite que nos parents semaient [...] nos parents y semaient plus euh novembre décembre quoi parfois janvier février tandis que nous ... Bruno serait là il te dirait nous on commence à semer le 6 octobre parce que le 6 octobre c'est la Saint-Bruno ... je ne sais pas pourquoi mais bon disons début d'octobre on commence à semer ».

Entretien avec l'exploitant « N8 » le 23 février 2016 :

« On a tendance à semer un p'tit peu plus tôt ... bah j'vois mon père qu'était avant mon frère et moi il avait tendance à semer un peu plus tard, il y avait plus d'hiver c'était différent¹⁰⁰ quoi ».

Entretien avec l'exploitant « S4 » le 17 février 2016 :

« Est-ce que c'est lié au climat ou est-ce que c'est lié à la génétique et aux cultures ... enfin aux semences ... parce que c'est vrai qu'en 87 quand je suis revenu sur l'exploitation avec mes parents on semait jusqu'au 5 décembre alors que maintenant au 1^{er} novembre on a tout fini donc est-ce que c'est lié au climat ou est-ce que c'est lié à la génétique je ne sais pas trop ... j'penserais plutôt que c'est les semences qui ont beaucoup évoluées qui permettent de semer un peu plus tôt ».

Entretien avec l'exploitant « N6 » le 22 février 2016 :

« Une chose est sûre après liée au climat ou pas j'en sais rien mais les travaux de semis ou de récoltes, au moins de semis sont plus précoces, peut-être parce que on a des variétés qui sont travaillées techniquement qui nous permettent de réaliser des travaux plus vite et aussi la mécanisation qu'il y avait pas autrefois et peut-être de la surmécanisation qui permet des fois d'aller plus vite voir d'aller trop vite ».

Ce constat est également effectué lors de l'entretien ayant rassemblé trois exploitants agricoles. L'un d'entre eux évoque les dates de semis plus précoces avant de se faire couper la parole par les deux autres évoquant les variétés comme raison de cette évolution :

Entretien avec les exploitants « N9, N10 et N11 » le 18 février 2016 :

« Enquêteur : Alors par rapport à votre activité est-ce que vous avez remarqué des changements qui peuvent être liés au changement climatique ? Par exemple dans l'assolement, les dates de récoltes ou ... »

Enquêté N9 : Bah il y a un truc qui me fait c'est qu'on sème de plus en plus vite alors j'sais pas si c'est

Enquêté N10 : Nan c'est le variétal ça !

Enquêté N11 : C'est le variétal !

Enquêté N10 : Ouais ouais ouais ouais là c'est faux pourquoi ? Il y en a encore bien qui vont aller raconter ces conneries là ... nan c'est faux ! Le colza euh ... depuis dix ans faut le semer de très bonne heure ... bon ben on le sème ... depuis nous encore qu'on s'calme ... mais y en a qui ont semé le colza de plus en plus vite que c'est pas le même climat. Bah oui cette année c'est l'inverse. Celui qui l'a semé trop vite il a à peu près sûr qu'il aura pas d'colza.

Enquêté N9 : Parce que il est en train de fleurir

Enquêté N10 : ça va mal on est au mois de février l'colza il est en train de fleurir, il est perdu ... premier p'tit coup d'gelé toc terminé ... moi j'vois pas beaucoup de changements ».

Selon les deux techniciens productions végétales rencontrés, l'agrandissement des exploitations agricoles pourrait aussi influencer les dates de semis. L'exploitant anticipe les travaux dès la première période de sec pour s'assurer de pouvoir semer toutes les surfaces de son exploitation, comme en témoigne une agricultrice :

¹⁰⁰ On peut supposer ici une référence aux hivers doux engendrant moins de jours de vernalisation. Il ne faut pas semer trop tard sinon la variété n'aura pas cumulé assez de jours de froid. En effet, cet agriculteur rattache cette avancée des semis au changement climatique.

Entretien avec les exploitants « N7 » le 15 février 2016 :

« Les blés sont mieux implantés ... alors déjà, on a souvent, au mois d'octobre, si on va semer on sème ... bah déjà on se dit on a l'temps puisque c'est le début donc quand on sème, on y va que si la terre vraiment est top quoi sinon on attend 15 jours, on est pas pressé tandis que quand t'arrives ... si tu commences au mois de décembre puis tu te dis là maintenant faut que j'sème mais là le temps il est pas trop beau mais tant pis je sème quand même donc tu prends plus de risques, tandis que là on essaie d'faire que les implantations si les semis sont réussis c'est déjà ... j'veux dire que la récolte est déjà gagnée ».

Les semis des cultures de printemps seraient également anticipés. Un exploitant (N2) constate que le mois de mars serait plus sec et permettrait une fenêtre climatique à cette période.

Néanmoins, pour juger d'une réelle avancée des dates de semis il conviendrait d'enquêter plus en profondeur le milieu agricole. Les exploitants commencent à semer en octobre mais tous les semis n'ont pas lieu au cours de ce mois puisque ces travaux débordent sur novembre. Il existe certainement une variabilité des dates de semis en fonction du secteur, mais également des stratégies de l'exploitant. En effet, l'exploitant S1 (au sud) sème parfois en novembre-décembre alors que les semis débutent en général mi-octobre pour le secteur. Et l'exploitante N7 commence les semis vers le 6 octobre alors qu'ils sont en moyenne fin octobre pour son secteur (cf. sous-partie précédente).

4.3.3. Douceur hivernale : risque de maladies et avancée de la végétation

Neuf exploitants constatent des hivers plus doux (enquête 2016). L'exploitant représentant à la FDSEA rencontré en 2020 et Eric Lemarinier font le même constat. Quatre précisent que les saisons sont moins marquées. Les températures sont plus douces et le gel se raréfie. L'augmentation des températures hivernales engendre une avancée de la végétation. Le stade épi 1 cm arrive plus tôt dans l'année. D'après l'exploitant représentant FDSEA, ce stade apparaissait début avril y a une vingtaine d'années, alors qu'il apparaît autour du 15 mars désormais. Lorsque l'hiver est très doux ce stade peut même être atteint au début du mois de mars... ou même en cours d'hiver, ce qui démontrerait par ailleurs que certaines variétés sont insensibles au photopériodisme. Par conséquent, les variétés précoces ne doivent pas être semées trop vite, sans quoi la montaison débute trop tôt et pourrait être exposée aux gelées. D'ailleurs un exploitant (N2) met en avant qu'on peut désormais semer plus tard puisqu'il fait plus chaud l'hiver, ce qui permet de contrer dans le même temps l'avancée de la végétation au début du printemps mais également de la mauvaise herbe favorisée par les températures plus douces. Deux agriculteurs précisent également que cette douceur hivernale, associée à l'humidité qui caractérise cette saison, favorise l'apparition de maladies. Les entretiens étant réalisés à la fin de l'hiver 2016, caractérisé par des températures élevées, les discours ont pu être influencés. C'est une des causes, associées à un printemps humide, de la chute historique des rendements en raison de l'apparition de pathogènes.

Entretien avec les exploitants « S2 » le 09 février 2016 :

« Il n'y a plus d'hiver, il n'y a plus le ralentissement de la végétation ».

Entretien avec les exploitants « S4 » le 17 février 2016 :

« Au niveau des prairies on voit bien que vous avez la saison d'herbe qui est plus allongée qu'elle n'a pu être jusque-là [...] c'est-à-dire en termes de temps vous avez de l'herbe jusqu'au 15 avril 15 novembre on s'est aperçu que jusqu'au 1^{er} janvier l'herbe poussait tout le temps ... on a eu des animaux jusqu'au 15 janvier ... donc j'sais pas si c'est l'impact du réchauffement mais on voit bien qu'on a plus d'années comme ça qu'on en avait avant ».

Entretien avec les exploitants « S5 » le 23 février 2016 :

« On a tendance à mettre des variétés qui mûrissent plus vite dans les petites terres ... et les variétés qui mûrissent plus vite faut pas non plus les semer trop vite parce qu'il y a des risques de gèle ... au stade épi ... à ce stade-là, quand le blé commence à monter au stade un noeud ou quoi on peut avoir si il y a des gelées tardives ça peut nous griller des cultures aussi donc faut pas non plus avoir des blés trop avancés en sortie d'hiver ... [Intervention de l'enquêteur : Donc une année comme celle là si il y a un coup de froid...] ... une année comme ça c'est ce qu'est à craindre, dans quinze jours [soit fin février ou début mars] si on a un gros coup de froid on peut être pénalisé ».

Entretien avec les exploitants « N6 » le 22 février 2016 :

« Ca c'est un souci un gros souci à plusieurs niveaux sur l'aspect d'un végétal et animal donc aussi humain parce que pas de gelées donc on tue pas les microbismes et le problème faut gérer les pathologies différemment quand la nature les régule elle-même, par de la gelée ça se passe bien euh ... quand c'est pas l'cas c'est du recours, si je prends ma partie exploitation c'est du recours à des produits véto ... euh ... donc qu'ont un impact inévitablement sur l'environnement parce que c'est des animaux qu'on consomme et c'est aussi de la production pour ces produits là et pour l'aspect végétal c'est pareil, une plante qui ne souffre pas par le froid elle est plus malade aussi ... il y a des espèces qui se développent davantage : mauvaise herbe ou autre qui peuvent être ... qui peuvent entre guillemets se trouver grillées l'hiver quand il y a du gel ... [...] J'ai 40 ans pour autant quand j'étais gamin je me rappelle quand mon père m'emmenait à l'école en tracteur parce qu'y avait 10 ou 20 cm de neige au mois de janvier ou au mois de février si on prend l'hiver de c't'année si il a gelé à -3 pendant deux jours c'est pas mal ».

Entretien avec les exploitants « NS12 » le 02 mars 2016 :

« Depuis deux ans en maladies en céréales mais ça c'est dû en partie à cause de l'hiver on n'a pas d'hiver, la maladie se propage beaucoup plus vite et se déclenche beaucoup plus vite [...] On a des blés beaucoup plus forts donc plus c'est fort plus c'est risque à maladie [selon lui les blés talent plus, ils ont plus de feuillage, donc les feuilles peuvent être attaquées par les maladies] [...] Là déjà on voit des symptômes de maladies qu'on n'avait pas forcément après un bon hiver, un hiver bien froid ».

« **Enquêté NS12 :** Bah l'hiver plus doux, l'hiver dernier, cette année encore [2016] ... pour les cultures que ce soit pour les colzas ou les blés on a besoin d'un hiver ... que ça bloque les cultures que là ça a poussé tout l'hiver. Nous faut qu'ça descende en dessous de 7°C pour pas qu'ça pousse.

Enquêteur : Oui pour pas que ça prenne trop d'avance

Enquêté NS12 : Ouais, là on a trop d'avance

Enquêteur : Et alors justement par rapport aux hivers plus doux est-ce que vous avez adapté les variétés en disant faut pas

Enquêté NS12 : Bah on prend des variétés qui montent un peu moins vite, qui décollent un peu moins vite au niveau de l'épi ... mais après malheureusement quand l'hiver est trop doux comme ça [2016] euh ... pffff ... au mois de décembre on avait des stades proches du mois de février-mars.

Enquêté NS12 : Ah oui !

Enquêté : Donc c'est un peu ça qu'est ... après y a pas forcément de solutions ».

Entretien avec les exploitants « N2 » le 22 février 2016 :

« Bah des changements, déjà cet hiver ... bon ... c'est l'hiver le plus chaud depuis toujours, depuis 100 ans enfin depuis les relevés donc c'est obligé c'est lié au changement climatique c'est forcé. Y en aura p'être un plus froid l'hiver prochain mais n'empêche que si il est si chaud que ça c'est ... [...] C'est évident on sait bien qu'est l'hiver qu'est chaud peut-être plus le réchauffement climatique ça fait l'hiver le plus chaud de tous les temps ... de tous les temps de mesure. [...] Le blé cet hiver il a poussé il est à un stade très avancé là ... très très avancé là ... il est au stade [épi] 1 cm. Bon il y a eu des printemps ... arf c'est entre autre le changement climatique ... bon il y a printemps froid aussi où le blé il arrive au stade 1 cm au mois d'avril, bon là y va y être euh ... le 1^{er} mars ... beaucoup de blés vont y être le 1^{er} mars alors qu'autre fois on disait 15 mars ... alors c'est une année c'est peut-être exceptionnel là je suppose mais en moyenne il fait plus chaud plus tôt ».

4.3.4. Anticipation de la date de récolte

Trois agriculteurs ayant constaté des hivers plus doux n'ont pas remarqué une avancée des moissons. Ils mettent en avant la variabilité interannuelle qui ne permet pas de dégager de tendance dans la mesure où ils n'ont pas noté les dates auxquelles leur blé est récoltable. Cinq autres exploitants ne constatent pas d'évolution. La variabilité est également mise en avant en rappelant que des moissons précoces ont pu avoir lieu dans le passé. La mécanisation, permettant de récolter

plus vite, est également une cause identifiée mais la date de maturité quant à elle n'aurait pas changé. L'agriculteur N3 pense que les sommes de températures sont quasi-équivalentes car l'augmentation de la température au cours de sa carrière est trop faible pour s'en rendre compte. En revanche il émet l'hypothèse que cela est peut-être davantage perceptible dans les régions plus chaudes du sud de la France.

Entretien avec les exploitants « N6 » le 22 février 2016 :

« Non c'est sensiblement les mêmes [dates de récolte] euh ... d'une année à l'autre on va p'être avancer un peu mais globalement pour moi globalement on est toujours sur les mêmes périodes de récoltes ... à peu près ... j'dis pas que ça avance pas ... mais maintenant ... honnêtement ... pour moi c'est pas suffisamment significatif pour l'avoir remarqué sur mon exploitation ».

Mais ils sont tout de même huit à avoir constaté une avancée de la date de récolte. Ils ne sont que trois à avancer (NS12 et S5) un ordre de grandeur, qui d'ailleurs est équivalent : l'élévation de la température aurait engendré une avancée de 10 jours. Cet ordre de grandeur est également donné par Eric Lemarinier en 2019 et l'exploitant représentant à la FDSEA en 2020 (en précisant même 10 à 15 jours en considérant une même variété de précocité intermédiaire). Désormais, les moissons se clôturent à la date où elles commençaient il y a 20-30 ans, passant de la 1^{ère} quinzaine d'août à la 2^e quinzaine de juillet. L'exploitant représentant FDSEA a également mis en avant l'avancée générale des stades. Lorsqu'il a repris l'exploitation, les blés n'épiaient pas en mai alors que sur les 5 dernières années l'épiaison apparaît le 15 mai, voire fin avril pour les plus précoces en 2020.

Entretien avec les exploitants « S1 » le 08 février 2016 :

« Enquêteur : Donc ça veut dire que vos dates de récoltes ont changé au cours de votre carrière ?

Enquêté S1 : Ça au niveau des dates de récolte, le changement climatique on le voit. On s'aperçoit qu'on récolte de façon plus précoce

Enquêteur : Ça c'est un ressenti ou est-ce que vous avez noté par exemple ... vous avez pu le voir ?

Enquêté S1 : C'est euh ... moi j'marque pas spécialement toutes mes récoltes enfin la date de mes récoltes mais euh ... moissonner du blé au mois de juillet on le faisait jamais dans les années 90-2000 c'était quelque chose qui nous arrivait jamais, aujourd'hui c'est pratiquement devenu la règle.

Enquêteur : D'accord.

Enquêté S1 : A partir du 20-25 ... entre le 20 et 30 juillet souvent on est dans les blés chose qu'avant quand j'me suis installé c'était rare qu'on y arrive avant le mois d'août ».

Entretien avec les exploitants « NS12 » le 02 mars 2016 :

« Enquêteur : Est-ce que justement vous avez remarqué des changements au cours de votre activité qui peuvent être rattachés au changement climatique ?

Enquêté NS12 : Bah c'est plus, on voit depuis 15-20 ans l'avancée des cultures. On moissonne de plus en plus tôt. On sème de plus en plus tôt aussi, mais c'est vrai qu'avant on moissonnait jamais ... il y a 25 ans on commençait que mi-août par ici à moissonner.

Enquêteur : Ah ouais !

Enquêté NS12 : Maintenant au mois de juillet on est dedans !

Enquêteur : Et pour vous c'est directement rattaché au

Enquêté NS12 : Ah oui oui oui j pense oui.

Enquêteur : Et alors justement il y a d'autres agriculteurs qui disaient que ça pouvait être dû aux variétés ... au changement de variétés.

Enquêté NS12 : Bah il y a des variétés plus précoces mais j pense que les conditions comme là on a pas d'hiver le blé a poussé tout l'temps on sait qu'on a de l'avance. On est en avance là.

Enquêteur : Et par rapport à vos variétés d'une année à une autre c'est plus ou moins les mêmes ou ?

Enquêté NS12 : Oui oui ça varie pas beaucoup. Moi je reste toujours avec le même genre de variétés [il fait des variétés fermières, il resème chaque année une partie de ses productions].

Enquêteur : Et au final même avec ces variétés là ça a avancé ?

Enquêté NS12 : Ouais ouais ça avance toujours un peu ouais.

Enquêteur : Et ça a avancé de combien de jours à peu près pour un même type de variétés ?

Enquêté NS12 : Par rapport à la récolte en 20 ans j' pense que ça a avancé d'une dizaine de jours

Enquêteur : Ah ouais d'accord.

Enquêté NS12 : Ah ouais ouais.

Enquêteur : Et c'est pour l'ensemble des cultures ou juste pour certaines ?

Enquêté NS12 : Ah ouais ouais ouais l'ensemble des cultures ».

Entretien avec les exploitants « N2 » le 22 février 2016 :

« Enquêteur : Et sinon est-ce que vous avez remarqué une avancée ... enfin pour les céréales une avancée des dates de récoltes ?

Enquêté N2 : De maturité ?

Enquêteur : Ouais ou en comptant le premier jour de la date de récolte parce que la durée au final ça peut changer avec la mécanisation.

Enquêté N2 : Peut-être mais là ... faudrait regarder des données objectives, moi j'ai pas vraiment remarqué.

Enquêteur : Vous avez pas noté par exemple ?

Enquêté N2 : Les variétés sont un peu différentes que ... c'est ... là c'est pas facile faudrait faire la moyenne de la précocité des variétés ... bon c'est pas évident ... mais c'est obligé. Si la date n'a pas bougé c'est que les variétés sont légèrement plus tardives. On sait que le climat se réchauffe ... y a pas de ... c'est sûr donc c'est obligé qu'si on prenait les mêmes variétés ou la même précocité, semées la même date il arrive avant. J'ai pas observé par'qu'on a pas les mêmes variétés chaque année est différente mais en moyenne c'est obligé ... le climat c'est plus chaud donc ça le ferait forcément ».

Trois exploitants constatent une avancée des dates de récoltes. Elles ne seraient pas liées au réchauffement climatique mais aux variétés qui changent au cours du temps, au matériel permettant de récolter plus vite ou encore aux protections fongicides permettant à la plante de ne pas être malade pour mûrir plus vite.

Entretien avec les exploitants « N4 » le 15 février 2016 :

« Les dates de récoltes varient ça c'est incontestable ... avoir l'impression qu'elles varient toutes dans le même sens non ... euh ... j'serais même tenté de penser que on récolte un peu plus vite, mais plus vite aussi parce qu'il y a des moyens ... au nombre d'hectares par journée il n'y a rien de comparable. Maintenant c'est plus performant qu'à l'époque. La maturité de la culture en règle générale par rapport de c'qui est des céréales se situe ici à partir du 22-25 juillet jusqu'au 5 août [...] de mémoire j'me souviens pas avoir été choqué par les dates de récoltes ... euh par exemple les débuts de dates de récoltes où celui qui voulait pouvait presque programmer une semaine de vacances ... démarrer avant le 20 juillet le battage de la moisson c'est exceptionnel. Alors il y a aussi les fameuses terres, où faut qu'on sème des variétés précoces dans ces terres là donc c'est logique qu'on récolte en premier. C'est là qu'on peut démarrer le 20, mais dans des terres normales on peut commencer une semaine plus tard ».

Entretien avec les exploitants « N7 » le 15 février 2016 :

« Enquêté N7 : On moissonne de plus en plus ... enfin bon c'est peut-être aussi le fait qu'avant je me souviens de mes parents ils faisaient beaucoup de semences fermières quoi ... des semences ... ils prenaient du blé du grenier qu'ils re-semaient quoi, c'était ça. Donc il y avait moins de recherche au niveau des variétés ... que maintenant on a des variétés suivant les terres, suivant les parcelles ... euh ... suivant le précédent on choisit telle ou telle variété ça rentre en ligne de compte ... et bah je vois mes parents au 15 août ils étaient toujours en train de moissonner c'est sûr tandis que nous ... alors on a pas le même matériel non plus ... mais au 05 août on est quitte

Enquêteur : Mais alors justement est-ce que les récoltes commencent au même moment ?

Enquêté N7 : Nan elles commencent plus vite, un peu plus vite

Enquêteur : Donc euh le nombre de jours de moisson diminue grâce au matériel mais ...

Enquêté N7 : Plus vite mais on sème plus vite que nos parents semaient ... ».

Entretien avec les exploitants « S5 » le 23 février 2016 :

« Enquêteur : Et est-ce que vous avez remarqué une avancée des dates de récoltes ?

Enquêté S5 : En moyenne oui on a p'être gagné une dizaine de jours mais j' pense aussi qu'est dû aux variétés puis à la protection fongicide. Le fait que les plantes soient bien protégées au niveau sanitaire j' pense qu'elles mûrissent plus vite à la fin

... je pense. Une plante qu'est malade elles va toujours tenter de résister ... elle va toujours être ... qu'une plante qu'est ... quand elle a fini son cycle la plante elle mûrit vite fait et puis voilà quoi.

Enquêteur : D'accord

Enquêté S5 : Une plante qu'est malade elle mûrit moins vite qu'une plante qui n'est pas malade ça c'est sûr. Donc l'effet fongicide ... des fongicides ont pu avancer un peu les dates de semis et puis y a l'effet variétés, l'effet dates de semis on sème de plus en plus tôt ... voilà il y a ces trois facteurs là qui fait qu'on a avancé p'être d'une dizaine de jours en 30 ans les dates de récoltes

Enquêteur : Ah oui

Enquêté S5 : A peu près hein

Enquêteur : D'accord

Enquêté S5 : Mais bon est-ce que c'est dû au réchauffement climatique j'vous dis y a l'effet variétés, dates de semis, l'effet sanitaire qui entrent en compte quoi. Bon y a pas eu de révolution quoi. Y a pas eu de changement radical

Enquêteur : Et justement ces dates de récoltes c'est un ressenti ou est-ce que vous avez adapté

Enquêté S5 : Et bah y a quelques années quand on finissait la moisson pour le 15 août ... euh ... souvent on finissait autour du 15 août maintenant c'est surtout autour du 7-8 août

Enquêteur : Et le premier jour justement aussi

Enquêté S5 : On commence plus vite avant on commençait peut-être début août les récoltes et puis maintenant on commence plutôt vers la vingtaine de juillet

Enquêteur : Ah oui d'accord

Enquêté S5 : Mais bon après j'suis pas assez vieux hein ... il aurait fallu (rires)

Enquêteur : J'en ai rencontré des plus âgés justement

Enquêté S5 : J'suis pas tout jeune mais j'suis pas non plus tout vieux (rires) ... faudrait demander à des anciens qu'on 60-70 ans.

Enquêteur : J'en ai vu

Enquêté S5 : C'est eux qu'on p'être plus ... mais j pense qu'ils vont dire à peu près la même chose que nous.

Enquêteur : Ils se posaient la question si c'était pas les variétés aussi

Enquêté S5 : J pense qu'on s'est adapté inconsciemment aussi et puis nous ... on ... plus on a de chances de récolter tôt plus on a de chances de récolter une meilleure qualité aussi. Entre récolter 20 juillet et après la 15 août ... après le 15 août euh au niveau humidité tout ça c'est d'ja plus pareil

Enquêteur : Parce qu'ils y a moins de jours de disponibles pour la récolte ?

Enquêté S5 : Les jours sont moins longs ... y a moins de jours de disponibles

Enquêteur : Ah oui donc les étés qui sont de plus en plus humides justement vous le ressentez comme un problème pour la récolte ?

Enquêté S5 : Bah ça peut devenir un problème ouais niveau qualité puis ça a un impact sur l'investissement parce qu'aujourd'hui faut avoir du matériel pour récolter plus rapidement quoi. Si on était sûr d'avoir deux mois de beau temps juillet-août on aurait pas le matériel qu'on a, on aurait des plus p'tites moissonneuses. Si on disait on a l temps d récolter, que des fois une année comme l'année dernière faudrait, en 7-8 jours fallait tout récolter quoi. Avant c'était pas mûr et puis après la qualité « fytute » (mimique faisant signe que c'est pas terrible), les qualités ça chute vite hein. Quand on s prend 8-10 jours de pluie sur une récolte qu'est à maturité ... la qualité n'est pas la même ... on peut tout de suite perdre 15-20 euros de la tonne en commercialisation. Donc ça ça a un impact aussi.

Enquêteur : Et ces étés plus humides vous avez l'impression que c'est depuis quand à peu près ?

Enquêté S5 : (souffle) depuis trois-quatre ans c'est sûr qu'on a des étés plus humides, bon après ... ça s trouve cette année on va avoir un été très sec et puis on s rappellera plus des étés humides ».

4.3.5. Des étés plus humides perturbant les récoltes

Huit exploitants constatent des étés plus arrosés et font surtout référence aux dernières années. Certains soulignent la persistance de mois de juin secs et chauds accélérant la maturité du blé, suivis de précipitations qui interviennent lorsque le blé est récoltable. Dans ce cas, si l'intervention est retardée, l'agriculteur craint une germination sur pieds des grains et une augmentation de leur teneur en humidité. Dans ce cas la qualité des grains est dégradée. Une agricultrice précise quant à elle que

la réduction des jours secs l'été, l'inquiète car le report de la moisson engendre des frais supplémentaires pour la location de la moissonneuse. Ils sont quatre à rattacher cette évolution au changement climatique qui « *détraque le régime des précipitations* ». Il y aurait alors de « *plus longues périodes de sec et de plus longues périodes de pluie* », perturbant les pratiques agricoles.

Entretien avec l'exploitant « N6 » le 22 février 2016 :

« Sur la fenêtre de tir pour la récolte euh bah ça s'est fait aujourd'hui une moisson en 10 jours on a fait beaucoup d'boulot ! parce que le machinisme s'est développé pour et ensuite parc'qu'on s'aperçoit qu'les fenêtres de tirs sont d'plus en plus courtes quand même par ce problème de temps [météo]. Et on sait pertinemment qu'un blé qu'est arrivé à maturité pour la récolte, un lin qu'est arrivé, faut les récolter sinon ça peut être la catastrophe, sinon ça peut être du tout ou rien. On a eu ça en 92 ... c'est la dernière qui m'reste, il y en a eu en 2007 aussi ... 92 une année où on était ... on a eu beau temps début août ça a duré huit ou dix jours après on a eu d'la flotte jusqu'au mois de septembre on a fini par récolter des blés germés, des parcelles de lin qui n'ont jamais été récoltées donc voilà quoi c'est des pertes très sèches [...] je relève la pluviométrie moi depuis 2004. On est à peu près constant en pluviométrie annuelle ... on est autour de 710 mm d'eau par an à peu près sur le secteur. Par contre des grandes hétérogénéités entre les saisons où effectivement on aurait tendance à prendre davantage d'eau maintenant sur août et septembre plutôt que sur des mois de janvier et février comme on pouvait les avoir autrefois ».

Entretien avec l'exploitant « N8 » le 23 février 2016 :

« Avant c'est vrai qu'on avait des beaux étés et puis maintenant bah souvent ... euh ... souvent ... on va prendre l'exemple de l'été dernier le mois de juin a été très beau et après ça s'est détraqué, juillet à peu près beau et puis après août on a fini vraiment in extrémis pour tout c'est récoltes céréales, par contre pour le lin c'était plus embêtant on a dû jongler, bon on a dû attendre d't'façon que la pluie cesse pour pouvoir récolter le lin et on a eu une perte de qualité, mais bon, ça c'est tous les ans y a soit un déficit hydrique ou alors un excès d'eau ça dépend, c'est, après voilà ça fait partie de notre métier, la météo on la subit d't'façon faut l'accepter telle qu'elle est et puis voilà [...] Il y a plus de longues périodes de pluies suivies de longues périodes de sec donc c'est beaucoup plus ... c'est beaucoup plus instable qu'avant quoi je trouve » (N8).

Entretien avec l'exploitant « NS12 » le 02 mars 2016 :

« L'été 2014, c'était assez catastrophique on a commencé au mois de juillet on a fini au mois de septembre [...] Depuis trois quatre ans ... à part l'année dernière où on a eu 8-10 jours de beau temps, c'est la première année depuis j'crois 4-5 ans qu'on a pu travailler en 8 jours donc ça a remis un peu les pendules à l'heure l'année dernière j'pense mais les autres années comme 2014 c'était inquiétant on se demandait comment on allait récolter ... et quand on commence, bah nous avec la Plaine Sud on commence début juillet, même fin juin dans les orges, au mois de septembre on était encore dans le blé ».

Entretien avec l'exploitant « S2 » le 09 février 2016 :

« Les conditions de travail sont devenues anarchiques. Des fois la météo ne permet pas pendant 15 jours de faire la récolte ce qui pose problème car mon mari doit commencer la moisson tôt pour la faire sur les autres [prestation de service] pour financer la location de la moissonneuse ».

Deux exploitants émettent quant à eux une réserve et s'interrogent sur le fait que les étés plus humides puissent être rattachés au changement climatique. D'ailleurs, les mois d'août 2014 et 2015 ayant été particulièrement pluvieux, ils peuvent influencer la perception de l'individu comme en témoigne S5 :

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« Depuis trois quatre ans c'est sûr qu'on a des étés plus humides, bon après euh ... ça se trouve cette année il y aura un été très sec et on se rappellera plus des étés humides » (S5).

L'interprétation des événements météorologiques dans la climatologie agricole est également propre à chaque individu. Par exemple l'exploitant de Rosel (N3) ne constate aucune évolution climatique depuis son début de carrière. Il relève tout de même des étés humides, mais il cite celui de 1992 pour montrer que ce type d'évènement météorologique avait déjà lieu dans le passé. Au contraire, l'agriculteur du Mesnil-Patry (N6) constatant lui aussi davantage de pluie l'été, considère

celui de 1992 comme un évènement attestant du changement climatique. Autrement dit, pour l'un les évènements qui ont eu lieu 25 ans auparavant constituent des références repères pour juger du changement climatique, alors que pour l'autre ce même évènement est déjà une manifestation du changement climatique. La perception peut aussi être influencée par la concomitance entre la date à partir de laquelle le blé est récoltable et la probabilité que la pluie survienne. Certains exploitants considèrent que 2015 fut un été difficile pour récolter, contrairement à l'exploitant NS12 qui lui considère qu'elle a permis de contrebalancer les années précédentes défavorables car ses blés étaient récoltables au moment du beau temps. A l'inverse des autres, il ne compte pas l'été 2015 comme humide.

Ils sont sept à ne pas constater d'évolution et cinq d'entre eux précisent que les étés pluvieux avaient déjà lieu dans le passé, sans en faire d'explication, quand d'autres démontrent qu'il s'agit de la variabilité du climat et « *qu'une année ne fait pas l'autre* ».

Entretien avec les exploitants « N9, N10 et N11 » le 18 février 2016 :

N10 : *L'année dernière on a eu 10 jours pour faire la moisson et ce qu'était pas fini en 10 jours on aurait perdu tout. On a rien perdu. Mais à deux jours prêts c'était le pépin ! Vraiment la tuile complète ! Mais on a eu ça c'est l'année, mais on a eu des récoltes exceptionnelles ...*

N9 : *Il y a 3 ans on a fait une moisson tranquille*

N11 : *Bah oui on ne sait jamais d'une année à l'autre*

N10 : *Moi j'vois pas beaucoup d changement là d'dans moi*

N9 : *Nan ça dépend d'une année à l'autre ça peut très bien s'passer comme ... y a une année on a bien rentré le lin en juillet alors que d'habitude c'est plutôt en septembre, ça s'est jamais reproduit depuis mais ...*

N10 : *Celui qui va t'dire euh l'climat on n'retrouve plus les saisons j'crois qu'il est en train d'se [tromper] ...*

4.3.6. Une accentuation des déficits hydriques ?

Six exploitants constatent une intensification du manque d'eau pour leur culture au cours de leur carrière. Néanmoins, les entretiens nuancent les réponses.

En partie nord, les exploitants N2, N8 et N7 constatent des printemps plus secs. Le premier constate un manque d'eau en mars après avoir répandu l'azote sur les parcelles de blé. Dans ce cas il ne peut pas pénétrer dans le sol pour que la plante puisse en bénéficier. Pour économiser cet engrais, l'épandage se fait plus tard, à un moment de l'année où il y a moins de précipitations. En revanche, il ne constate pas d'augmentation du déficit hydrique pour les plantes, malgré des phases plus longues de périodes de sec suivies de longues périodes de pluies. Le deuxième exploitant fait ce même constat. L'exploitante N7 constate en revanche une augmentation du manque d'eau pour le lin, les betteraves et les prairies. Le blé n'est selon elle pas pénalisé.

En partie sud, l'exploitant de Fierville-Bray relève une augmentation du déficit hydrique qui se serait notamment matérialisée par des sécheresses dans les années 2000-2010. Mais il précise que les précipitations ont été régulières lors des trois années précédant l'entretien (2016). L'exploitante S2 et l'exploitant S3 précisent également que le manque d'eau pour les cultures est plus récurrent dans le cadre de plus longues périodes de sec et de plus longues périodes de pluie. Contrairement à la partie nord disposant de sols profonds, les longues périodes sans pluie engendrent des sécheresses pédologiques pour les petits sols du sud.

Au total ils sont quatre à constater des précipitations moins régulières. En tenant compte des discours ils ne sont que quatre à constater un manque d'eau plus important pour la plante (sécheresse pédologique).

Onze exploitants répondent non à cette question mais ils sont en réalité 13 en incluant les deux personnes ayant répondu oui mais dont les discours montrent qu'ils ne l'ont pas constaté (N2 et N8). Trois d'entre eux précisent que les cultures ne manquent jamais d'eau. Les autres n'ont pas constaté d'augmentation du déficit hydrique et les années de sécheresse font parties intégrantes des caractéristiques du (pédo)climat de la Plaine de Caen. Un exploitant prend du recul par rapport à son impression et précise que pour répondre à la question il faudrait analyser les données météo.

Entretien avec l'exploitant « S5 » le 23 février 2016 :

« Non ... non [...] ça a toujours existé les périodes de sécheresses... c'est pas depuis le réchauffement climatique [...] non j'ai pas remarqué ça [...] faut voir par rapport aux données statistiques météo ... je sais pas ... météo c'est ça qu'il faut analyser ... nous après le ressenti ... c'est pas évident hein ... j'suis incapable de dire ... on m'dirait y a pas de réchauffement climatique ... moi j'le vois pas ... moi le réchauffement j'le vois pas à mon niveau c'est sûr que nan¹⁰¹ ».

« Il y a toujours eu des périodes de sèches ... des périodes de sécheresses en 76 il y a eu une grosse sécheresse bon ça fait ... ça fait quarante ans maintenant quoi c'est pas ... ».

Entretien avec l'exploitant « N10 » le 18 février 2016 :

« Le restant la nature fait les choses ... ça fait trente ... 76 ça fait 25 ... ça fait 40 ans euh on a eu une année pendant six mois il est pas tombé une goutte d'eau on parlait pas du climat ... on disait c'est une chose qui peut arriver ... c'est dans l'air du temps » (N10).

Lorsque le déficit hydrique a lieu en même temps que l'échaudage thermique, les pertes sont plus prononcées. Un seul exploitant (S1) dit constater une augmentation de ces jours de chaleur.

4.3.7. Absence de changement d'occupation du sol

Huit exploitants ont modifié l'assolement de leur exploitation au cours de leur carrière. Quatre ont arrêté de produire des pois fourragers en raison d'une chute des rendements, passant de plus de 60 à 45 q/ha en 20 ans. Dans un contexte de chute des prix, cette culture n'était plus rentable. Plusieurs causes sont identifiées par les agriculteurs, qu'il conviendrait d'approfondir : occurrences de maladies, précipitations à la floraison, à la récolte (juste après la maturité), nouvelles variétés peu adaptées au contexte local et aux maladies. Les féveroles ont été introduites dans les assolements de certaines exploitations, mais il s'agirait d'une opportunité économique avec l'ouverture d'un nouveau débouché par la Coopérative de Creully pour l'alimentation humaine en Egypte. Néanmoins, cette culture n'a pas donné les résultats escomptés au sud de Caen puisqu'elle effectue son cycle au cours de l'été alors même qu'elle est vulnérable aux conditions de sécheresse et de chaleur.

¹⁰¹ Sans pour autant le remettre en cause puisqu'il cite ensuite lors de l'entretien la fonte de la banquise et le recul des glaciers.

Entretien avec les exploitants « N4 » le 15 février 2016 :

« En incitant les pois fourragers qui étaient devenus une culture importante ici avec des rendements réguliers ... l'aphanomyces on s'est demandé pourquoi c'était intervenu mais comme je le disais tout de suite on a triché sur les dates de semis déjà si on avait tous respecté les 7 ans on en serait sans doute pas là ! Bon après d'un autre côté vu étant donné que ça pouvait provoquer à la machine, aux machines ça devenait délicat quand même ».

Entretien avec les exploitants « N8 » le 23 février 2016 :

« C'est toujours plus ou moins le même [assolement] bon on a eu les pommes de terre qui sont entrées y a 6 ans dans l'assolement euh après les féveroles aussi il y a 5-6 ans euh c'est plus des opportunités ... euh on a eu l'opportunité de rentrer dans un groupe avec la coopérative de Creully de faire des pommes de terre ... on s'est mis à faire des pommes de terre parce qu'on sait qu'on a le terroir pour les féveroles c'est pareil ».

Entretien avec les exploitants « S1 » le 08 février 2016 :

« Au début on faisait beaucoup de protéagineux ... beaucoup de pois protéagineux et euh ... bah p'être qu'on en a trop fait et moi personnellement j'ai eu des problèmes d'aphanomyces, c'est une maladie qui s'installe dans les terrains et qui engendre des rendements catastrophiques donc du coup j'ai abandonné la culture de protéagineux et de plus au niveau marge c'était pas terrible du tout ».

Entretien avec les exploitants « N7 » le 15 février 2016 :

« **Enquêté N7 :** On faisait beaucoup de pois avant ... des pois euh secs ... et bon on a abandonné parce que pffff ... y a des moments ont faisait des très bons rendements ... y a des années on avait des rendements vraiment médiocres c'était plus difficile à conduire comme culture quoi et puis ça dépend des années où il pleuvait beaucoup au moment de la floraison la pourriture des pétales de fleurs sur les feuilles faisait qu'on avait des maladies.

Enquêteur : Mais alors est-ce que ça ne serait pas dû par exemple plusieurs ... euh par exemple est-ce qu'il y aurait eu pois sur pois et ...

Enquêté N7 : Ah bah nan parce qu'on y faisait très attention à ça car autrement si on y revenait trop souvent y a des maladies.

Enquêteur : Parce que justement j'avais entendu deux agriculteurs qu'on dit ça euh bah ils se posaient la question si c'est pas parce qu'ils en avaient fait trop et après ils s'r'trouvaient à ne plus pouvoir en faire

Enquêté N7 : Oui et puis euh quand on fait du colza aussi euh on r'trouve le même problème quoi donc y avait colza et pois il y avait certains champignons

Enquêteur : Ah oui en fait si quelqu'un décide de faire pois sur colza ça fait pareil qui si ils faisaient pois sur pois ... presque ?

Enquêté N7 : Bah même s'il y avait une culture de blé entre deux parce qu'après le colza tu refaisais du blé et après des pois mais tu as des maladies qui ... ça favorisait certaines maladies

Enquêteur : Mais ça ne serait pas du climat le fait d'avoir arrêté le pois ?

Bah ça dépend ... des fois quand on avait des été shumides difficile à récolter le pois puisque c'est une culture qu'est à même le sol. On les ramasse quand ils sont secs mais ils sont vraiment à même le sol ...

Enquêteur : Ah oui donc ils sont au contact de l'eau dès que le sol est imbibé

Enquêté N7 : Oui oui

Enquêteur : Donc c'est à la fois par euh le fait qu'il y vait les maldies et la contrainte du climat

Enquêté N7 : Et puis les prix qui étaient plus non plus bein ... donc c'était plus rentable ! Là depuis quelques années on essaie de faire un peu de féveroles pour remplacer ... ».

Entretien avec les exploitants « S5 » le 23 février 2016 :

« **Enquêté S5 :** Moi j'suis resté à peu près régulier. Y a juste une chose que je ne fais quasiment plus c'est les protéagineux, les pois parce que les rendements y a 20 ans j'avais des rendements entre 60-70 quintaux à peu près et ... euh ... depuis ces dernières années j'atteins péniblement 50-45 quintaux on a perdu 10-15 quintaux ... avec en plus un coût de protection sanitaire plus élevé, alors est-ce que ce sont des variétés qui sont plus adaptées à notre secteur, niveau génétique ça n'a pas évolué ou alors est-ce que c'est le réchauffement climatique sur les protéagineux qui a un impact ?

Enquêteur : Alors j'ai entendu certains agriculteurs disent qu'ils ont peut-être trop entre guillemet triché sur les années de retour

Enquêté S5 : Peut-être peut-être à un moment donné c'est certain qu'il faut un certain nombre d'années entre deux protéagineux mais bon il y a des parcelles que j'ai pas eu de pois depuis une dizaine d'années j'en ai refait et les rendements c'était pas terrible

... ou alors il y a un champignon qui s'est installé dans le sol ... j'sais pas j'en sais rien au niveau agronomie peut-être qu'il y a eu des évolutions on s'en rend pas compte je ne sais pas ... J'ai essayé la féverole une année mais c'est pas convainquant j'pense que la féverole dès qu'on a une année de chaleur on est tout de suite pénalisé donc en bordure maritime j'pense que c'est jouable mais nous déjà un peu plus dans les terres c'est plus compliqué ... bon y a la disponibilité en eau faut des terres vraiment plus profondes et puis c'est les coups de chaleur quand il ya des gros coups de chaleurs où fin juin euh la féverole elle aime pas ça ... autant un pois un gros coup de chaleur le cycle est fini avant mais la féverole c'est une plante d'été donc le cycle il se termine fin août il y a toujours un coup de chaleur qui pénalise ».

4.2.8. La souscription des assurances témoin des risques climatiques en Plaine de Caen ?

Douze exploitants assurent leurs cultures face aux aléas climatiques susceptibles d'intervenir en Plaine de Caen. L'aléa le plus redouté est la grêle, principalement sur le colza. Mais certains évoquent également des conséquences sur le lin, le blé, l'orge, les pommes de terre et les betteraves. Une exploitante (N7) signale des dégâts importants, comme en 2002 où toutes les cultures furent grêlées. Le lin, brûlé, était inexploitable et les 10 q/ha de rendement pour l'orge ont mis à mal les trésoreries. L'exploitant NS12 fait le même constat suite à un évènement similaire lorsque ses parents exploitaient. Un autre (S5) évoque qu'il a assuré ses productions pour sécuriser ses revenus au cas où une sécheresse similaire à 1976 se reproduirait. L'assurance a déjà fonctionné pour quatre d'entre eux. N8 en a même bénéficié à 4 reprises en 6 ans en raison d'impacts de grêles sur le colza et d'une sécheresse pour le lin et les pommes de terre. Deux exploitants disent que les subventions de la PAC les ont encouragés à souscrire une assurance. Toutefois ils sont trois à avoir prolongé leur contrat car ils n'ont subi aucun dommage et deux autres agriculteurs hésitent à prolonger en raison des frais élevés liés au fait que l'assurance doit désormais être prise sur presque toutes les cultures.

Entretien avec les exploitants « N7 » le 15 février 2016 :

« Nous on a toujours été assuré l'assurance grêle car on est une région où ça nous ait arrivé d'avoir euh ... en 2002 on a eu de la grêle au mois de juin et toutes ... enfin sur Saint-Mamvieu et Cheux toutes nos cultures avaient été grêlées ... ouais ... mais alors tout, le blé, le lin, le colza [...] Le lin on n'a rien ramassé on a tout brûlé ... euh le blé je sais plus combien on en avait perdu, mais bon c'était au mois de juin, c'était le 02 juin alors il y a eu moins d'impacts mais sur l'orge tous les épis étaient par terre. Quand on a moissonné ça faisait 10 quintaux et restait plus que 10 quintaux dans les épis et invendable ! Et heureusement qu'on avait l'assurance grêle parce que le colza ... [...] ça peut arriver ... on peut être tranquille 15 ans et puis d'un seul coup ... après c'est dur à se relever quoi. Alors est-ce qu'on peut se permettre de prendre le risque ? On avait un voisin qu'avait pas cette fameuse assurance grêle quand c'est arrivé en 2002 il avait deux exploitations une où ça avait été grêlée et pas l'autre et il disait qu'il avait mis plus de 15 ans à remonter ... alors ça peut coûter cher ... après tout dépend comment sont tes terres, ton exploitation aussi. Si c'est morcelé ou si tout est dans le même couloir, nous ça fait comme un couloir ».

Pour l'essentiel des agriculteurs, l'assurance est souscrite par rapport au risque climatique connu en Plaine de Caen et ne rattache pas cette décision au changement climatique. Une seule exploitante (N7) témoigne du lien assurance-changement climatique. Les hivers doux avancent la végétation et l'exposent à un risque de gel pouvant survenir à la fin de l'hiver ou au début du printemps. Elle évoque d'ailleurs l'épisode de neige en mars 2013 qui montre qu'une période de froid peut survenir tardivement dans la saison. Dans le cas de gelées en début de montaison, l'assurance est une sécurité.

Certains exploitants agricoles de la Plaine de Caen constatent des évolutions. La température hivernale s'élève ce qui peut favoriser le développement de maladies sur la plante ou engendrer une avancée de la phénologie et rendre la plante vulnérable aux gelées tardives. Les moissons ont lieu plus tôt dans l'été, ce qui pourrait être lié à l'avancée des dates de semis, aux variétés ou à l'élévation de la température. Néanmoins, elles sont perturbées par des précipitations estivales qui auraient tendance à augmenter. Les agriculteurs ne constatent pas de hausse du déficit hydrique pour la plante, mais les pluies seraient moins régulières. Certains exploitants ont retiré les pois de leur assolement parce que cette culture ne devenait plus rentable. Les individus enquêtés ayant assuré leurs productions par rapport au risque climatique, précisent avoir effectué ce choix en connaissance des aléas pouvant survenir en Plaine de Caen, sans se préoccuper du changement climatique.

4.4. Les agriculteurs de la Plaine de Caen envisagent-ils l'adaptation au changement climatique ?

Les sous-parties précédentes montrent que les exploitants agricoles ne semblent pas inquiets par le changement climatique. Ils ont constaté des évolutions, mais elles ne remettent pas en cause leurs productions. Désormais il convient de se demander comment ils imaginent le climat du futur et l'adaptation de l'agriculture à ces évolutions.

4.4.1. Le climat du futur en Plaine de Caen imaginé par les exploitants agricoles

Nous avons demandé aux exploitants agricoles comment ces derniers imaginent le climat de la Plaine de Caen dans les prochaines décennies. A ce stade de l'entretien aucun document ne leur a été présenté. Par conséquent, il s'agit donc uniquement de l'idée qu'ils s'en font à partir de leurs connaissances sur ce sujet (observations, journaux et documentaires, lectures personnelles sujet, etc.), bien que la partie précédente de l'entretien les ait déjà mis en conditions puisqu'ils évoquent les évolutions observées sur leur exploitation. Sur les 17 exploitants, 10 prononcent comment ils imaginent le climat du futur.

Ils sont six à supposer que le changement climatique va s'accroître et qu'il sera perceptible par la variabilité du climat et particulièrement l'occurrence d'épisodes extrêmes, tels que des tempêtes, des tornades, des précipitations intenses, des orages de grêle et l'apparition de parasites, qui pourraient perturber les rendements dans un contexte de réduction des produits phytosanitaires. Nous pouvons supposer que ces extrêmes du climat font référence aux catastrophes naturelles observées et dont les images marquantes sont présentées dans les journaux télévisés. Ils sont deux à citer des saisons moins marquées, ce qui correspond avec ce qu'ils observent depuis le début de leur carrière. Un seul exploitant suppose que les étés pourraient être plus secs. Les autres agriculteurs ne citent pas les sécheresses, aléa qui n'est pas évoqué en raison des étés humides auxquels ils sont confrontés ?

Deux exploitants émettent l'hypothèse que le changement climatique pourrait constituer une opportunité. Si les conditions climatiques sont défavorables dans certaines régions, les cultures seront vendues plus chères, mais l'un précise que ce n'est pas souhaitable car cela pourrait occasionner des problèmes sociétaux.

4.4.2. L'absence actuelle d'adaptation au changement climatique

Sur les 16 exploitants enquêtés, 14 disent ne pas prendre en compte le changement climatique dans le développement de leur exploitation (question 18 du questionnaire). En revanche ils sont trois à répondre qu'ils prennent en compte le changement climatique dans le développement de leur exploitation. L'un précise le prendre en compte indirectement en dans la mesure où il suit les variétés qui se développent et les intègre à son assolement. Un autre précise ne pas faire certaines cultures dans les parcelles à faible réserve hydrique. Mais finalement, le recours à des nouvelles variétés ainsi que l'adaptation de l'assolement aux sols font partie de l'adaptation aux conditions locales comme le font les autres individus enquêtés, ce qui nous amène à nous poser la question

suivante : les agriculteurs s'adaptent-ils sans s'en rendre compte ? Le signal est-il masqué par le turn-over régulier des variétés et l'adaptation aux conditions locales ? Enfin le dernier, retraité, précise qu'il le prendrait désormais en compte s'il était toujours agriculteur. Les techniciens « productions végétales » de la Coopérative de Creully et de la société Lepicard confirment également ce constat. Ces sociétés n'ont pas encore envisagé l'adaptation et les conseils prodigués n'intègrent pas le changement climatique.

Entretien avec un technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2015 :

« Non aujourd'hui ... euh ... le changement climatique j'vous dis on attend de voir effectivement en quoi ... en quoi ça va changer exactement la face des choses sur ... sur notre métier de conseiller ... est-ce qui faudra proposer ... nous on attend un p'tit peu ce qu'on va nous proposer en terme de ... de produits ou semences ou autre ... ce qu'on va devoir conseiller, construire ou inventer, ou trouver demain quoi, après voilà comme on le disait les chercheurs si ils nous trouvent, une variété qui pousse toute seule, sans eau, sans produits, sans rien, effectivement ça va prendre tout de suite mais aujourd'hui il n'y en a pas ou je ne la connais pas ... voilà après est-ce que la stratégie par rapport au changement climatique va changer ? Pour l'instant non il n'y a pas de changements plus que ça puisqu'on est un p'tit peu dans l'inconnu, le changement climatique c'est un vaste débat et une vaste question ».

Ces réponses sont cohérentes par rapport au fait que plusieurs d'entre eux pensent que le changement climatique concerne plutôt l'avenir et non pas leur carrière d'agriculteur puisqu'ils n'observent pas d'évolutions radicales. On peut aussi supposer compte-tenu de la moyenne d'ancienneté, que la plupart des agriculteurs rencontrés sont arrivés au moment de la stagnation des rendements. Autrement-dit, peut-être n'ont-ils pas perçu le ralentissement de la progression de la productivité. Aussi, bien qu'il y ait cette stagnation, les rendements ne déclinent pas et sont maintenus à un haut niveau, ce qui ne nécessite pas pour l'instant la mise en place d'une planification de l'adaptation. Par ailleurs, même si elle doit être anticipée, plusieurs exploitants agricoles ont plutôt tendance à imaginer le changement climatique comme la succession d'événements extrêmes, ce qui ne les aideraient peut-être pas à prendre conscience des évolutions plus lentes mais qui peuvent être dommageables. Attendront-ils d'être confrontés à une situation extrême pour envisager l'adaptation ?

Toutefois, il convient de se demander si les autres organismes de l'agrosystème, ayant un rôle dans la gestion de l'agriculture intègrent ces problématiques.

Les chambres d'agriculture anticipent le changement climatique puisqu'elles développent l'observatoire ORACLE pour diffuser la connaissance du changement climatique observé jusqu'à présent. Toutefois le conseil ne semble pas encore concrètement tourné sur la mise en place d'une adaptation. Pourtant, si la céréaliculture de la Plaine de Caen pourrait paraître relativement épargnée jusqu'à présent, ce n'est pas le cas pour d'autres productions agricoles. En effet, le Président Pascal Ferey de la chambre d'agriculture de la Manche nous précise en juin 2021, lors d'une présentation des résultats de thèse aux horizons 2050 et 2100 pour le compte du GIEC Normand, que des éleveurs sont désormais de plus en plus confrontés à un déficit de fourrage à cause des sécheresses. Une autre communication, auprès de la FDSEA du Calvados, rassemblant une trentaine d'agriculteurs, va dans le même sens. Ils estiment rencontrer depuis quelques années des pertes de productions. Certains céréaliers évoquent d'ailleurs que l'augmentation de la température engendre une avancée de la végétation. La moisson débute plus tôt et devient exposée aux gelées tardives, ce qui fut particulièrement le cas en avril 2021. Quelques-uns d'entre eux évoquent de trop basses

températures lors de la méiose¹⁰². Pour l'instant, la filière céréalière locale semble en attente de résultats sur les conséquences à venir du changement climatique, ainsi que les échéances auxquels des aléas dommageables pourraient survenir, afin d'envisager l'adaptation sur le terrain. Les conseils des chambres d'agriculture sont surtout tournés vers la préservation de l'environnement et la réduction des émissions de GES comme en atteste leur site internet. C'est le même constat en parcourant celui de la DRAAF Normandie. En revanche la SAFER Normandie développe des cartographies des sols et précise, dans le cadre de l'association Vigisol, lutter contre l'artificialisation des meilleures terres agricoles qui sont d'autant plus susceptibles de mieux répondre au changement climatique. Cette structure est associée à un enseignant-chercheur de l'université (Patrick Le Gouée), spécialiste des sols, ce qui explique peut-être des moyens d'actions plus précoces.

4.4.3. Quelle est l'adaptation envisagée par les agriculteurs pour l'avenir ?

Face au changement climatique tel qu'ils se le représentent, notamment en interprétant la carte du déficit hydrique du mois de juillet pour le Calvados à l'horizon 2100 (**Figure 61** ; chapitre 2 ; p 108) et les bilans hydriques (similaires à ceux de la **Figure 147** ; chapitre 5 ; p 291) comparée à la période actuelle, l'ensemble des exploitants estiment qu'il faudra s'adapter. Le point de vue de 13 exploitants¹⁰³ a été recueilli en leur demandant, d'abord au cours du questionnaire, puis de l'entretien, comment ils adapteraient leur exploitation dans un tel contexte (**Figure 115**).

La plupart d'entre-deux accordent une confiance à la recherche et à la sélection variétale pour l'adaptation au changement climatique. Il conviendrait alors de semer de variétés précoces, c'est-à-dire au cycle plus court pour éviter que la fin du cycle (remplissage des grains) ne se juxtapose avec la sécheresse estivale. Cela reviendrait à poursuivre l'adaptation aux conditions pédoclimatiques puisque nous avons vu précédemment que les agriculteurs sèment déjà ce type de variétés dans les « petites terres ». Un exploitant explique d'ailleurs qu'en Sicile, les récoltes ont lieu au mois de mai en raison de variétés très précoces, mais en précisant que les rendements sont malgré tout plus faibles. Au-delà du recours à une précocité déjà existante, ces agriculteurs précisent que la recherche variétale pourrait trouver des variétés plus tolérantes au manque d'eau. Aussi un agriculteur précise que ces variétés devront également être tolérantes aux excès d'eau dans l'hypothèse d'hivers plus arrosés, ce qui reviendrait à retenir des cultivars plus polyvalents. Les techniciens productions végétales ont un discours similaire.

¹⁰² Lors de cette réunion, les résultats de thèse issus de l'analyse phénoclimatique (chapitre 6) ont été présentés. Les exploitants réagissent à ces résultats en témoignant qu'ils observent déjà une avancée de la végétation, ce qui engendre l'exposition du stade épi 1 cm aux gelées et que les basses températures à la méiose ont été observées ces dernières années.

¹⁰³ Ce point n'a pas été abordé avec un exploitant ne disposant pas d'assez de temps pour prolonger l'entretien. Enfin pour l'exploitant ayant uniquement accepté le questionnaire et les deux autres pour lesquels l'entretien a été réalisé par téléphone, les documents n'ont pas pu être montrés.

Entretien avec l'exploitant « N8 » le 23 février 2016 :

« Ça peut être des variétés pas forcément génétiquement modifiées mais euh ... des croisements de variétés, des croisements d'espèces qui rendent plus rustiques, qui rendent plus rustique le blé, l'orge ou le colza. Ça va se faire, peut-être se faire en betteraves avec des croisements génétiques qui ne seront pas des betteraves OGM mais avec des croisements génétiques comme ils s'en fait depuis 10/15 ans pour renouveler des variétés [...] après la recherche est là, c'est financé par les agriculteurs, par l'état, par l'Europe ... elle est en perpétuel mouvement donc après nous on prend en mesurant le pour et le contre [...] ou même des anciennes variétés qu'on ne fait plus maintenant parce que l'évolution génétique a fait qu'elles ont été remplacées mais après voilà c'est à voir. On s'adaptera comme .. Peut-être que ce sera un changement brutal on ne sait pas dans 40 ans ce que le climat sera ... bon dans 40 ans en principe je serai en retraite (rire). On verra il y aura peut-être des prémices avant. On verra au moment venu ».

Entretien avec l'exploitant « NS12 » le 02 mars 2016 :

« Faudrait trouver des variétés plus résistantes ... on en trouve déjà par exemple pour la verse, tout ça pour les excès d'eau et après trouver des variétés par rapport à la sécheresse » (NS 12).

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« la recherche ... parce que comme le temps évolue ... la recherche évolue en fonction du temps ... donc si ça s'trouve les variétés vont naturellement évoluer sur ... tu vois si ça s'trouve j'vais dire une bêtise mais on a peut-être des variétés qui sont pas adaptées ... qui sont adaptées aux situations qu'elles sont en ce moment ».

Entretien avec le technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2016 :

« On va peut-être nous trouver aujourd'hui ... euh ... des plantes qui poussent sans eau ... aujourd'hui on en parle de plantes qui ont besoin de beaucoup moins d'eau, de variétés ou d'espèces, de plantes avec une capacité d'adaptation à un climat plus chaud et avec moins de pluviométrie, on en parle, justement les chercheurs ou les semenciers pensent déjà justement pour s'adapter au zones j'dirais plutôt sèches comme ici ou ailleurs dans d'autres ... dans d'autres départements, mais ça c'est pas lié qu'au changement climatique, c'est historique, ces zones là qui subissent la sécheresse les années où il pleut pas, ça a toujours été, qu'il y ait le changement climatique ou pas ces zones là ils ont toujours eu des potentiels moindres par rapport au potentiel ou ils souffrent moins de déficits, donc on a une recherche qui n'est pas d'hier par rapport à ça ... donc faudra s'adapter par rapport aux prévisions si ... s'avère comme ceci parce que c'est des prévisions ».

« Si ils trouvent des variétés qu'on puisse battre deux mois avant pour éviter justement le stress du printemps en fin de cycle oui j'pense qu'on sera preneur oui ... on sera preneur ».

Ils sont cinq à évoquer les Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) mais en précisant toutefois que la population française n'est pas encore prête à l'accepter. Outre la réponse à des stress climatiques, ils y voient un intérêt pour obtenir des blés plus tolérants aux maladies et de ce fait réduire les pesticides.

Témoignages d'exploitants agricoles enquêtés en 2016 évoquant les OGM :

« Y sont capables de faire du blé avec moitié moins d'eau avec les nouvelles génétiques, mais ça y s'y touchent pas tout d'suite de trop parce que d'abord [...] le monde politique est contre donc ils y touchent pas, mais y pourraient faire d'main matin des variétés OGM qui vont être ... qu'auront besoin de 50% moins d'eau ... j'suis sûr qui sont capables d'le faire ... j'étais à des réunions moi et ils l'ont dit ... il est trop vite les gens y n'y sont pas habitués à ça donc faut qu'ça attende ... ça peut être compliqué c'est vrai ... mais pour moi y aura ça et si y a pas d'ça y aura d'la jachère ».

« Des OGM par rapport à ça, aux déficits hydriques, aux maladies, j'pense que ça serait pas forcément une mauvaise chose [...] après bon il y a toujours des limites ... de contrôler ça après derrière les OGM ... [...] juste une aide comme ça ».

« Si un jour on nous sort des variétés de blés résistantes à la sécheresse ... après faut mesurer ... faut pas dire OGM résistant à la sécheresse ok on y va, faut mesurer le pour et le contre mais peut-être qu'on sera obligé de passer par là par rapport au climat quoi ».

L'assolement actuel pourrait être remis en cause si les nouvelles variétés ne permettent pas de garantir des rendements viables. Certaines cultures pourraient disparaître tandis que de nouvelles,

plus adaptées au climat seraient introduites. Un exploitant (N4) estime qu'il conviendra de ne plus semer de cultures de printemps et de produire exclusivement des cultures d'hiver. L'exploitante N7 y voit quant à elle la possibilité d'introduire des cultures pour lesquelles les besoins en chaleur sont plus importants que celle produites actuellement : le soja, le tournesol ou encore le maïs grain. Dans le cas où le blé tendre ne répondrait pas au climat du futur, il pourrait être remplacé par du blé dur. Aussi, les exploitants supposent que des plantes actuellement cultivées dans le sud de la France pourraient être faisables à l'avenir en Normandie. Les techniciens « productions végétales » partagent également ces idées, à condition que les cultures aient un débouché.

Entretien avec le technicien productions végétales de la Coopérative de Creully le 16 février 2016 :

« Une remise en cause totale de l'assolement de l'exploitation ... ça c'est clair ... c'est-à-dire qu'on ne fera peut-être plus des betteraves, toutes les variétés sensibles au stress hydrique et bah elles seront supprimées et puis on sera reparti à faire d'autres cultures parce que ... le choix variétal est important mais il ne peut pas compenser non plus ... j pense que le facteur culture est beaucoup plus important que le facteur choix variétal ».

Entretien avec le technicien productions végétales de la société Lepicard le 11 mars 2016 :

« S'ils nous trouvent des variétés avec espèces ou cultures qu'on fait maintenant ... euh ... avec des adaptations au climat ... plus chaud ... plus sec si on prend en compte vos graphiques pourquoi pas rester dans un climat [il se reprend]... dans ces cultures là ... si on trouve ou cherche d'autres cultures ou espèces pourquoi pas hein ... le problème c'est qu'après faut trouver le débouché derrière ... le problème c'est à mon avis ... si vous arrivez voir un agriculteur vous lui dite 'ok j'ai trouvé une espèce qui va s'adapter facilement à votre stress hydrique dans votre petite région' il va vous dire 'ok mais qu'est-ce que j'en fais après quoi ?' Donc il faudra qu'il y ait le débouché en face [...] il faudra qu'elle s'adapte au marché en face quoi on est tous d'accord, enfin c'est plutôt la logique et le bon sens quoi ... on est tous d'accord pour s'adapter et produire de nouvelles choses mais faut pouvoir le vendre en face parce que avant tout c'est leur métier quand même. Donc j pense que tout le monde serait d'accord pour s'adapter et cultiver autre chose autrement mais faut le marché en face pour le vendre ».

L'irrigation est citée à 8 reprises. Néanmoins, ces exploitants précisent que les nouveaux forages dans l'aquifère des calcaires (roche perméable) du Bathonien sont désormais interdits. Si cette réglementation perdure et que les besoins en irrigation se font ressentir, un exploitant estime qu'il faudra arroser de façon informelle. Mais les agriculteurs rappellent que l'organisation des parcelles et la topographie ne se prête pas toujours à l'irrigation. Pour l'un d'entre eux, l'eau pourrait être prélevé dans les cours d'eau. L'arrosage à partir des surplus hydrologiques de l'hiver ou de l'écoulement lié aux précipitations intenses (ne permettant pas à l'eau de pénétrer directement dans le sol) semblerait en revanche plus envisageable. Il s'agirait de construire de grands bassins de rétention en eau dans la Plaine pour irriguer ensuite au printemps et en été.

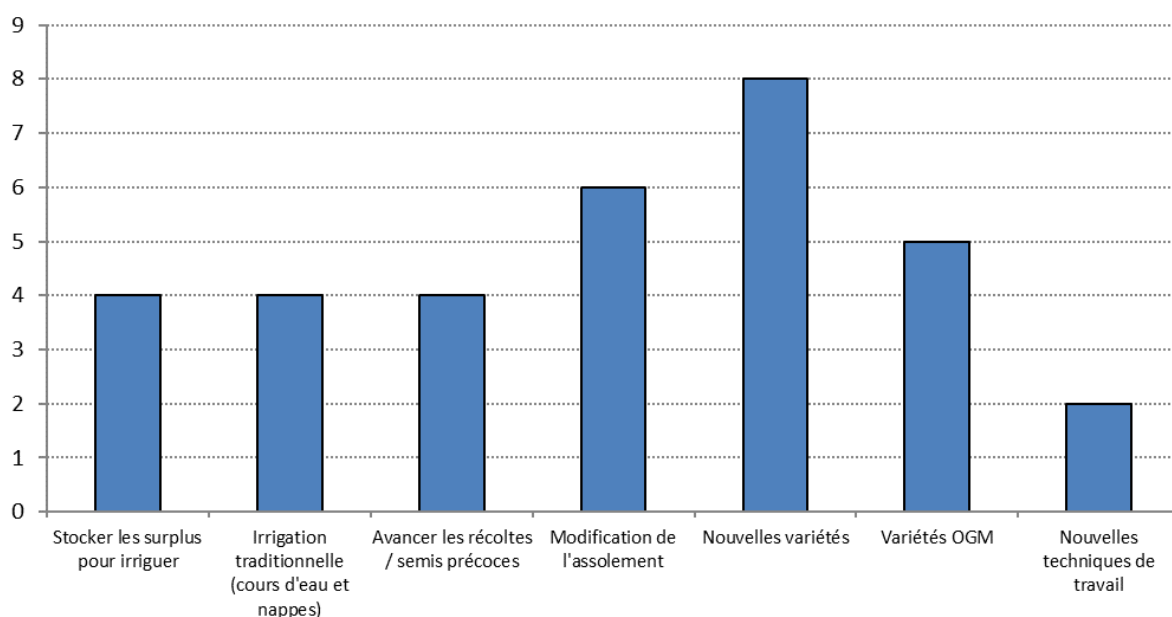
Extraits d'entretiens avec les agriculteurs de la Plaine de Caen en 2016 :

« C'est peut-être là ... on l'anticipe pas ou est-ce que ... est-ce qu'on va l'anticiper ... je dis on va de façon peut-être plus collective ... est-ce qu'on va s'attarder demain à regarder l'eau tomber et à rien faire et ou à prendre le problème à bras le corps et en disant comment on va réfléchir de façon assez intelligente à capter l'eau qui tombe en excès l'hiver pour la redistribuer l'été ... ça doit-être possible ... j pense matériellement ... j pense à des grandes réserves de flotte et des systèmes d'irrigation pourquoi pas on en est pas là aujourd'hui mais je ... enfin si on veut ramener un peu de bon sens ça doit être possible mais je verrais mal laisser tomber l'eau excédentaire l'hiver sans rien faire et aller ouvrir l'eau du robinet l'été pour aller irriguer les parcelles alors je sais pas après je ne suis pas assez pointu sur l'aspect hydrologie mais ... si on capte l'eau et qu'on ne la laisse pas rentrer dans le sol on peut dire effectivement ... enfin le fait qu'elle rentre elle est pas perdue non plus dans le sol ... à un moment donné elle se retrouve bien quelque part au niveau des nappes phréatiques ... pour autant est-ce que ça suffira à alimenter les sols au moment où ils en auront besoin l'été je ne suis pas persuadé ... tu vois ... j me fais comprendre ? Est-ce que l'excès d'eau l'hiver sera suffisamment emmagasiné par la nature elle-même pour être restituée l'été quand il y en a besoin ou est-ce qu'il faut que l'homme intervienne de façon mécanique pour dire et bah on crée des grands bassins, des grandes réserves de flotte ... je sais pas ».

« C'est ridicule dans le Calvados l'eau qu'est même ... l'eau qui passe ... l'Orne tout ça se jette à la mer donc on peut dire que c'est de l'eau qu'est perdue ... elle serait captée pour arroser les champs ça serait pas idiot ça serait en rien ... ça pénaliserait rien ... enfin je sais pas ».

Les exploitants agricoles évoquent également l'anticipation des récoltes en avançant les dates de semis. Enfin, de nouvelles façon de travailler pourraient être introduites. Un exploitant propose de semer le blé plus épais et ensuite de rouler la terre pour garder l'humidité du sol, tandis qu'un autre pense que le retour à des méthodes plus traditionnelles, en travaillant avec les lunes pourraient revenir.

Figure 115 : Leviers d'adaptation au changement climatique envisagés par les exploitants agricoles et nombre de fois où ils furent cités



Les exploitants agricoles de la Plaine de Caen supposent que l'adaptation sera possible en recourant à de nouvelles variétés proposées par la recherche suite à la sélection et la création variétale. Toutefois si ce levier n'est pas suffisant, d'autres solutions pourront être envisagées (nouvel assolement, modification des pratiques, irrigation). Les agriculteurs sont souvent confrontés à des remises en question pour permettre à leur exploitation d'être compétitive (politiques agricoles, évolution des prix, restrictions environnementales, etc.), et s'adaptent chaque année aux conditions météorologiques rencontrées, comme en témoigne un exploitant ayant confiance en les capacités d'adaptation de la filière : « On n'est pas bloqué sur nos idées on sait s'adapter au climat » (N8).

Conclusion du chapitre 4

Finalement, l'exploitant agricole adapte la gestion de son exploitation aux sols et au climat de la Plaine de Caen, notamment en recourant à des variétés de différentes précocités ou en adaptant les pratiques (dates de semis, apport de matière organique, non labour et irrigation). Les prévisions météorologiques sont scrutées attentivement pour la planification des interventions dans la parcelle.

Le changement climatique n'est pas constaté par tous les exploitants agricoles de l'échantillon. Certains en revanche remarquent des évolutions et révèlent des aléas climatiques auxquels les productions sont soumises où pourraient être soumises. Les hivers sont plus doux et engendrent une avancée de la végétation qui peut alors être exposée à des gelées (gel d'épis en début de montaison) en fin d'hiver ou au début du printemps. Ils favorisent également le développement des maladies. Les moissons des céréales auraient lieu plus tôt, certains y voient un marqueur du réchauffement climatique quand d'autres évoquent le volet variétal ou l'avancement des dates de semis. Les étés deviendraient plus humides, ce qui perturberait les récoltes. Le manque d'eau pour la plante n'aurait pas augmenté, même si une agricultrice le constate pour les cultures de printemps. En revanche ils évoquent des précipitations moins régulières. L'occupation du sol n'a selon eux pas évolué, à l'exception d'un recul de la culture des pois en tête d'assolement. Seulement deux exploitants constatent une stagnation des rendements, mais ne croyant pas au changement climatique, ils rattachent ce fait à la recherche variétale qui ne progresserait plus. Ces évolutions n'auraient pour le moment pas engendré de changement radical de l'agriculture en Plaine de Caen : un constat partagé par l'ensemble des agriculteurs et les techniciens production végétale. L'adaptation n'est pas encore concrètement observée. Mais dans l'hypothèse d'une augmentation de la température et du déficit hydrique, les exploitants ont confiance en la recherche de variétés de blé tendre adaptées au climat futur. D'autres leviers pourraient également être envisagés tels que l'irrigation, une modification de l'assolement ou de nouvelles pratiques agricoles.

Si cette enquête avait une visée sociologique, l'interprétation livrée dans cette partie connaîtrait plusieurs limites. Il conviendrait d'intégrer les dimensions sociales, le vécu de l'agriculteur, de tenir compte de l'hétérogénéité de leur ancienneté, à partir d'un échantillon plus important. Toutefois, à visée exploratoire elle a permis de structurer des échanges avec l'exploitant agricole pour comprendre sa gestion et ses choix en fonction des sols et du climat. Elle souligne que des aléas climatiques sont présents en Plaine de Caen et peuvent engendrer des pertes de productions pour la filière céréalière avant même d'évoquer les conséquences possibles du changement climatique dans les prochaines décennies. Les personnes enquêtées n'ont pas établi de stratégies face au changement climatique dans la mesure où celui-ci ne perturbe pas encore la rentabilité des exploitations.

Chapitre 5

Evolutions agroclimatiques du blé tendre de 1961 à 2100

Introduction

Pour estimer les évolutions climatiques rencontrées par la céréaliculture en Plaine de Caen, nous proposons une première approche mobilisant des indicateurs agroclimatiques au pas de temps mensuel. Ils correspondent à l'évolution des paramètres climatiques, à des dépassements de seuils, à des cumuls calculés sur les grandes saisons à dates invariantes du cycle de la plante. Cette approche est souvent mobilisée dans les recherches des géographes-climatologues et des agronomes, mais plus récemment dans le cadre d'une dimension appliquée dans les Chambres d'Agriculture régionales sur la période historique pour préparer l'adaptation des systèmes de production. Dans le cadre de cette thèse, le recours à ces indicateurs permet d'avoir un premier aperçu des conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre d'hiver. Les données climatiques du modèle SAFRAN permettent d'observer les évolutions sur la période historique 1961-2020. Pour la période future, les données CNRM-2014 du modèle ALADIN-Climat aux horizons moyen 2050 et lointain 2100 sont comparées à celles de la période de référence 1976-2005 pour trois scénarios RCP.

Figure 116 : Bottes de paille à Saint-Manvieu-Norrey après la récolte du blé le 06 août 2018



5.1. Evolutions agroclimatiques sur la période historique 1961-2020

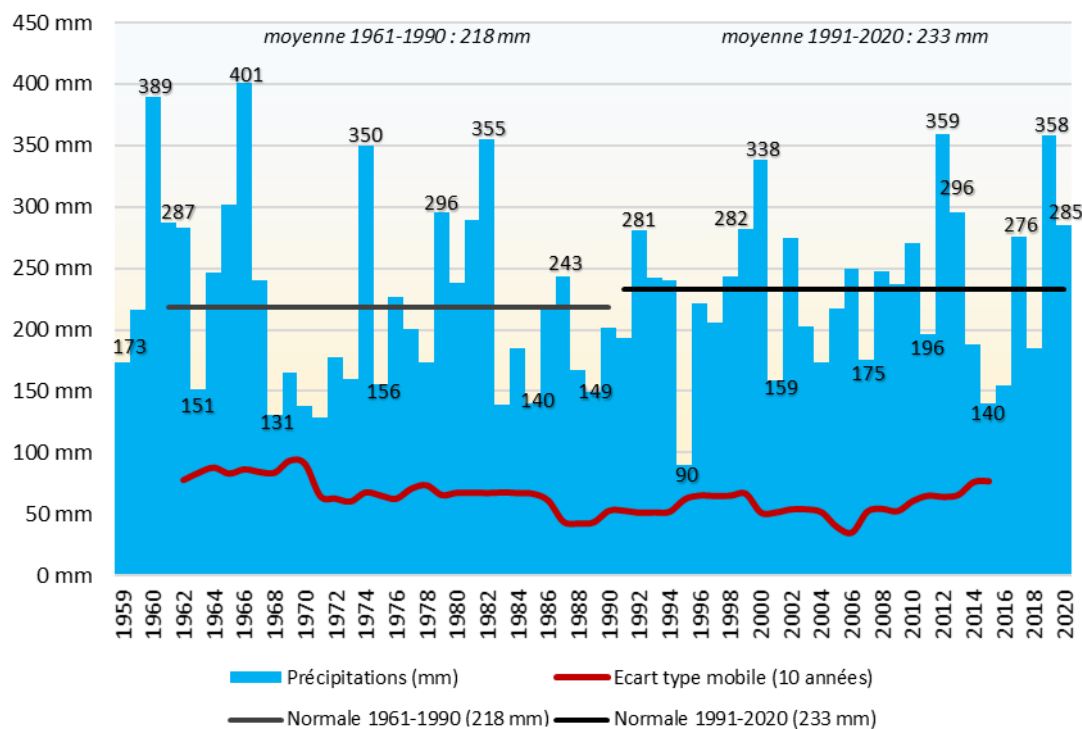
Les indicateurs agroclimatiques sont d'abord mobilisés sur la période historique 1961-2020 de façon à prendre connaissance des évolutions du climat sur les grandes saisons de végétation du blé tendre d'hiver (analyse rétrospective).

5.1.1. Absence d'évolution significative des conditions agroclimatiques pour les semis

Le blé peut être semé entre octobre et décembre. L'enquête démontre que les périodes de pluie et de saturation en eau des sols sont pénalisantes pour les semis, aussi bien pour accéder à la parcelle que pour la levée de la plante.

Depuis 1961, les précipitations totales et le nombre de jours de pluie sur les trois mois de semis ont légèrement augmenté : de 217 à 232 mm (+7 %) et de 40 à 42 jours pour les Normales 1961-1990 et 1991-2020 (**Figure 117**). Il n'y a pas de tendance statistiquement significative au test de Mann-Kendall (seuil 0,005) sur l'ensemble de cette période, ni pour ces trois mois étudiés séparément. En revanche, il convient de préciser qu'avec davantage de profondeur temporelle (sur la période 1945-2020 à partir des données de la station Météo-France de Caen-Carpiquet), une tendance significative est détectée. La variabilité des précipitations reste équivalente entre les deux Normales, même si une légère diminution de celle-ci est constatée pour le mois de décembre.

Figure 117 : Evolution du cumul pluviométrique sur les mois d'octobre, novembre et décembre sur la période 1959-2020 à Caen



Ces précipitations participent à recharger le sol en eau après la phase de dessèchement. Néanmoins, après plusieurs jours de pluie, l'exploitant doit attendre le ressuyage du sol pour intervenir. Lorsque

le sol est saturé en eau, le surplus hydrologique pénalise l'accès à la parcelle. C'est également un facteur limitant pour la levée de la semence. Afin de déterminer les conditions favorables à ces chantiers, nous observons la succession des jours secs, favorables au ressuyage des sols (**Figure 118**).

Quelle que soit la discrétisation des épisodes de successions de jours secs, on constate que les moyennes ont diminué de 0,2 épisode (**Figure 119**). Le nombre de phases comprenant entre 3 et 5 jours secs successifs passe de 2,7 à 2,5 entre les Normales 1961-1990 et 1991-2020. Ce constat s'opère également pour les successions de 5 à 7 jours (de 1,6 à 1,4), de 7 à 10 jours (de 1,5 à 1,3) et au-delà de ce seuil (de 1,9 à 1,7). Néanmoins, on précise qu'il n'y a pas de tendance significative de l'évolution de l'occurrence d'épisodes de successions de jours secs au test de MK.

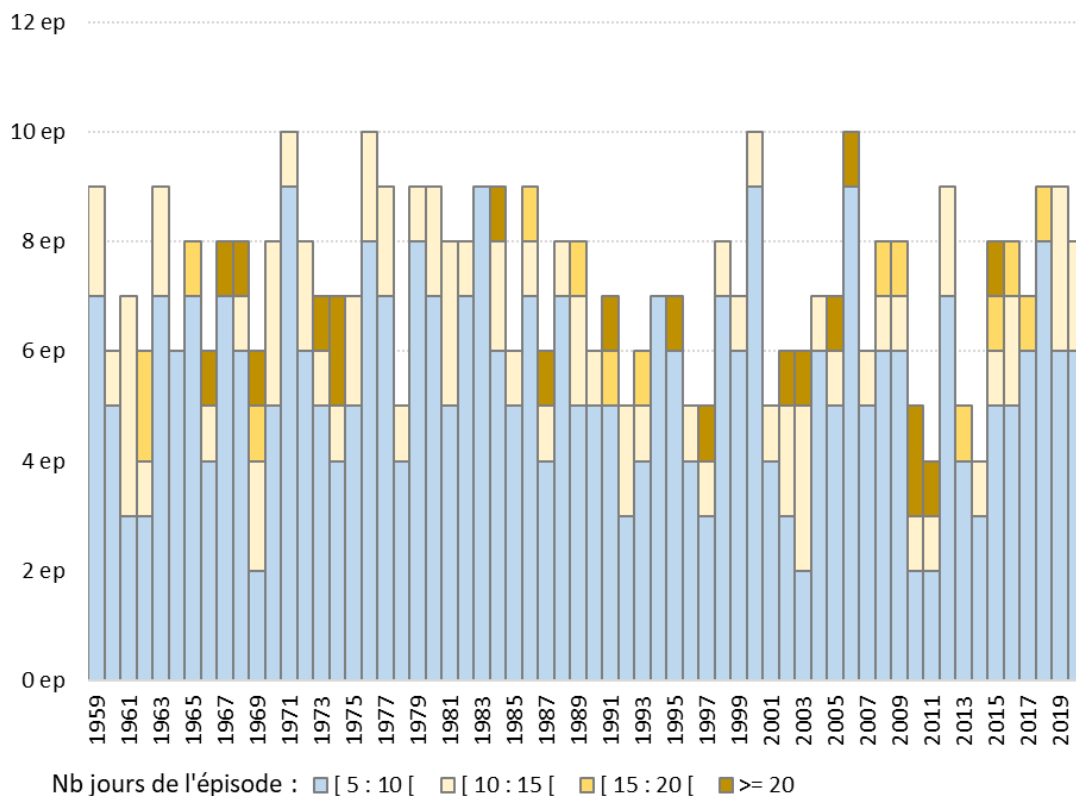
Sur la période 15 octobre - 15 novembre, il n'y a en moyenne que 2 périodes sèches d'au moins 3 jours. L'occurrence reste stable entre les deux Normales climatiques. En élevant ce seuil à 5 jours, l'occurrence n'est que de 1,5 épisode par an. Ces périodes favorables au semis restent donc rares, ce qui démontre l'intérêt pour l'exploitant de recourir à des variétés de différentes précocités et alternativité¹⁰⁴. Ainsi, il ne se trouve pas dans l'obligation de devoir tout semer en même temps sur une courte période.

Figure 118 : Blé semé sur un sol ressuyé à Anguerny



¹⁰⁴ Admettons que l'exploitant ne puisse pas tout semer en raison d'une fenêtre météorologique favorable d'une durée insuffisante. Si la prochaine phase de jours secs intervient trop tardivement, alors l'exploitant doit recourir à des variétés plus alternatives car la période d'exposition au froid est alors plus courte si le début de l'hiver a déjà été entamé. Dans ce cas, la précocité doit également être adaptée, une plante au cycle long ne sera pas semée fin novembre, au risque de trop retarder la maturité.

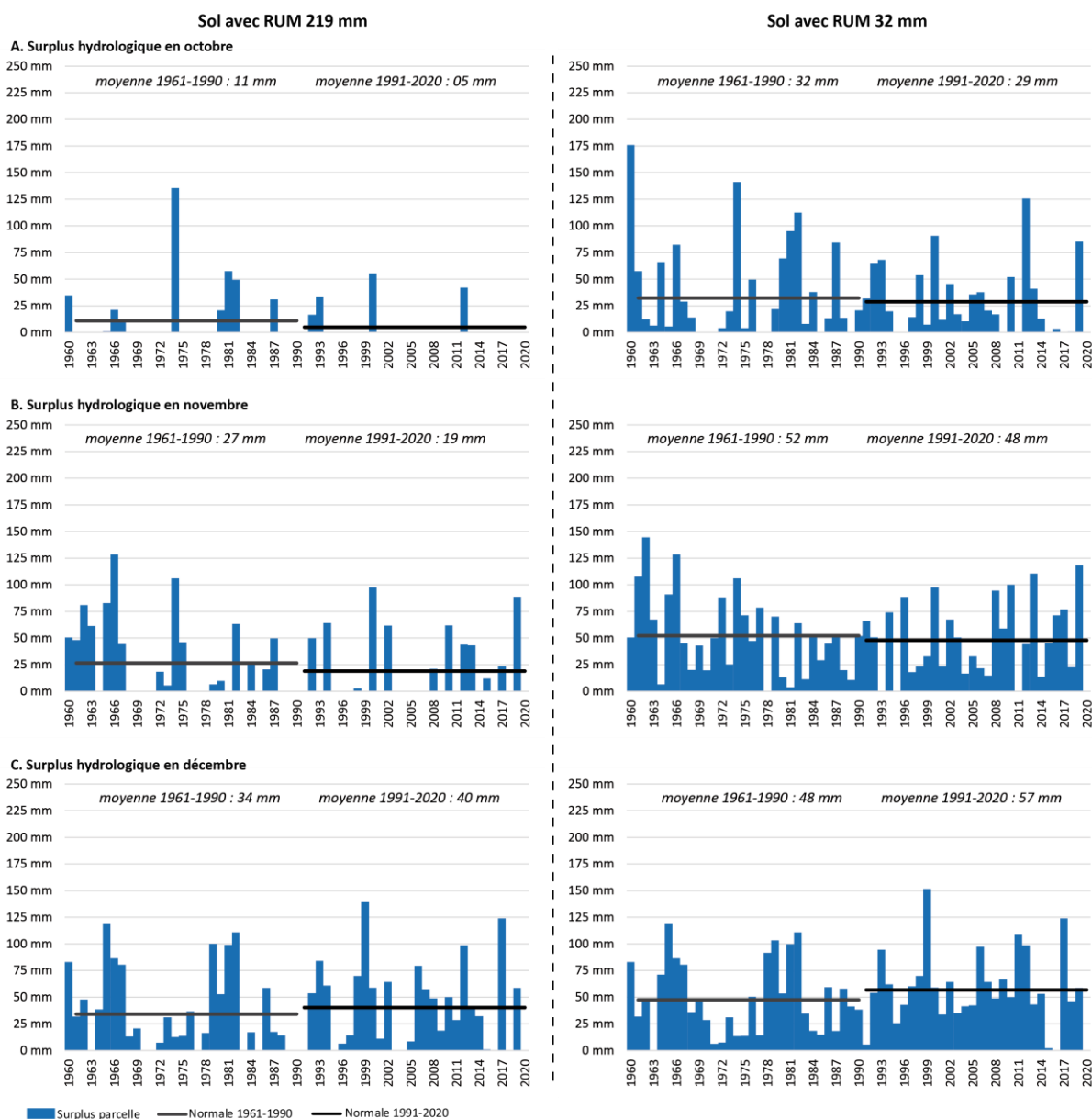
Figure 119 : Evolution de la succession des jours de secs durant la période 1959-2020 sur les mois d'octobre, novembre et décembre à Caen



Réalisation : F. Beauvais., 2020 (données SAFRAN Météo France) ; avec ep = épisode.

En considérant l'ensemble du RUM, les sols épais cumulent un surplus hydrologique plus faible que les sols minces puisqu'ils mettent plus de temps à atteindre la capacité au champ. A titre d'exemple, au mois d'octobre, moment de l'année où les sols se rechargent en eau, le surplus n'est que de quelques mm pour les premiers tandis qu'il est de l'ordre d'une trentaine de mm pour les seconds. Les calculs effectués à partir d'un bilan hydrique journalier à décroissance logarithmique de la RUD n'exposent pas de tendance significative de l'évolution des surplus hydrologiques pour les mois d'octobre, de novembre et de décembre. Mais d'un point de vue sériel, en octobre, les surplus hydrologiques pour les sols épais qui n'étaient constatés que 8 années sur 30 sur la Normale 1961-1990 se raréfient puisqu'ils ne sont observés plus que 4 années sur 30 (**Figure 120 A**). Pour les sols minces, le cumul moyen n'évolue pas, mais les années à fort excès d'eau (supérieurs à 50 mm) semblent diminuer, passant de 9 à 5 d'une Normale à la suivante. Pour le mois de novembre, une très légère diminution de la variabilité est également constatée pour les deux types de sols (**Figure 120 B**). En revanche, en décembre, malgré la non significativité du test de MK en raison d'une très forte variabilité interannuelle, le surplus hydrologique a augmenté de 18 % (**Figure 120 C**).

Figure 120 : Evolution des surplus hydrologiques aux mois d'octobre, novembre et décembre de 1960 à 2020



Surplus hydrologique déterminé à partir d'un bilan hydrique journalier classique à décroissance logarithmique de la RUD
 Réalisation : François Beauvais., 2021 (données Météo-France ; réanalyse SAFRAN)

Même si la très grande variabilité des observations empêche de discerner des évolutions statistiquement significatives, dans l'ensemble, une légère diminution des phases de jours secs est constatée en automne, mais sans pour autant que les surplus hydrologiques soient en augmentation sur la période 1961-2020. En semant plus tôt, les exploitants profitent d'ailleurs de conditions plus favorables pour une meilleure implantation du blé tendre d'hiver.

5.1.2. Une faible pression gélive sur les stades de développement du blé

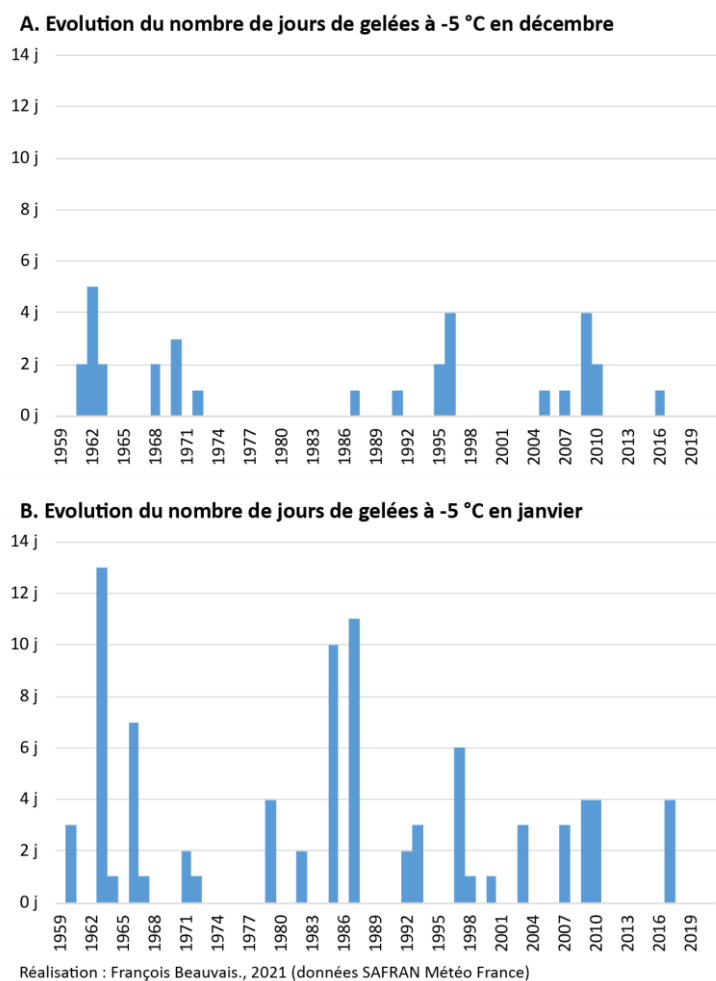
Nous proposons ici d'aborder le risque de gel pour le blé pour différents seuils de températures en hiver (levée et tallage), au printemps (montaison) et en fin de printemps (mésiose).

Les risques de froid en hiver (levée et tallage)

Les gelées à -5 °C , pouvant engendrer des disparitions de plantes lors de la levée, ne sont pas régulières en Plaine de Caen. Selon la date de semis, la levée peut s'effectuer entre les mois de novembre (semis précoce) et de janvier (semis très tardif). En novembre, elles sont exceptionnelles puisqu'elles ont eu lieu seulement à deux reprises : le 6 novembre 1995 et le 28 novembre 2010. En décembre, elles interviennent une année sur quatre et une année sur trois en janvier. En moyenne, cela concerne 0,5 jour en décembre sur les Normales 1961-1990 et 1991-2020. En janvier, il s'agit respectivement de 1,7 et 1,0 jour. Quelques années ont été marquées par un nombre de jours de gelées à -5 °C important. Il s'agit par exemple des mois de décembre 1962 et 1996 avec respectivement 5 et 4 jours. En janvier, les blés semés très tardivement ont pu parfois rencontrer ces aléas jusqu'à plus de 10 fois en 1963, 1985 et 1987. Les blés semés dans les temps ont en revanche pu éviter ces situations de risque puisqu'une fois au tallage, ils résistent jusqu'à -10 °C et même -20 °C lorsqu'ils sont endurcis. Il n'y a pas de tendance significative au test de MK. Si ces gelées sont sans doute trop rares pour dégager une évolution au mois de décembre, une diminution semble perceptible pour le mois de janvier (ce qui se constate également par l'évolution de la moyenne) avec une réduction de la variabilité interannuelle (**Figure 121**). Les années recensant plus de 6 occurrences dans le mois ne sont plus recensées au cours de la seconde Normale climatique.

Les gelées à -10 °C en Plaine de Caen sont rarement observées. Elles n'ont eu lieu qu'à 6 reprises en janvier et 5 reprises en février depuis 1959. Sur les 20 dernières années, une seule occurrence est relevée, le 12 février 2012 avec $-10,3\text{ °C}$. Le seuil de -20 °C n'a quant à lui jamais été franchi sur la période 1961-2020. Néanmoins, il a pu être atteint localement le 8 janvier 1985. Ce jour-là, la station de Caen-Carpiqueqet enregistre son record de froid absolu avec $-19,6\text{ °C}$ en raison d'un type de temps clair et calme sur un sol enneigé surmonté d'un air froid en altitude. Localement, le seuil a été franchi comme en atteste la température minimale pour d'autres stations dans le Calvados ($-26,5\text{ °C}$ à l'Oudon-Lieury au sud-est de la Plaine de Caen et à Vire ; $-22,4\text{ °C}$ à Saint-Germain d'Ectot) et dans l'Orne ($-27,5\text{ °C}$ au Haras-du-Pin ; $-24,0\text{ °C}$ à Argentan et à Rânes ; $-23,5\text{ °C}$ à Briouze ; $-22,6\text{ °C}$ à Athis-de-l'Orne).

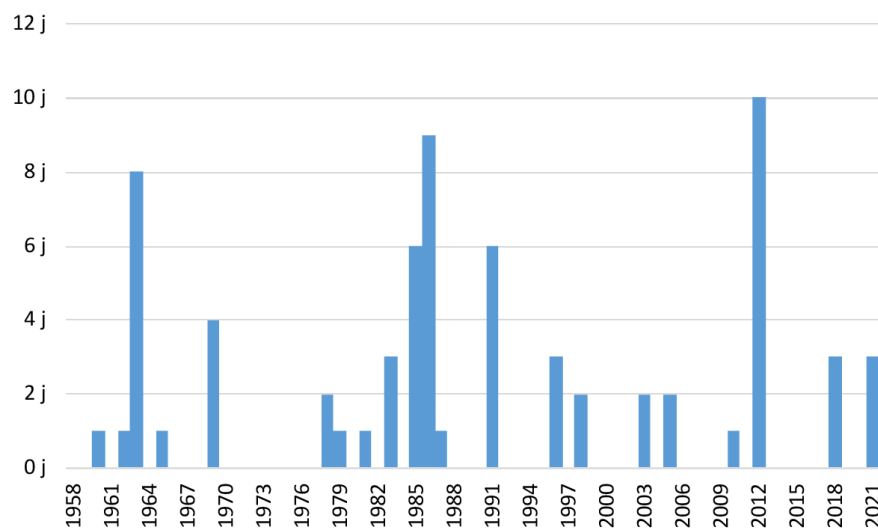
Figure 121 : Evolution du nombre de jours de gelées à -5 °C en décembre et en janvier de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



Les risques du froid au printemps (montaison)

Les températures inférieures à -4 °C peuvent engendrer un gel de l'épi si elles surviennent en début de montaison. Sur les mois de mars et d'avril, cet aléa est exceptionnel. 9 occurrences sont constatées en mars sur la période 1961-2020 et une seule en avril. Néanmoins, les exploitants agricoles précisent adapter la précocité des variétés et la date de semis afin d'éviter une avancée de la montaison en sortie d'hiver, moment de l'année où ces gelées pourraient encore survenir bien qu'elles soient également rares. Au moins une occurrence est observée une année sur trois au cours du mois de février mais parfois ces gelées sont relevées plusieurs fois (**Figure 122**). C'est le cas par exemple à 8, 9 et 10 reprises en 1963, 1986 et 2012. Le dépassement de ce seuil est toujours d'actualité puisque 3 gelées sont observées en 2018 et en 2021.

Figure 122 : Evolution des jours de gelées à -4 °C au mois de février de 1958 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN Météo France)

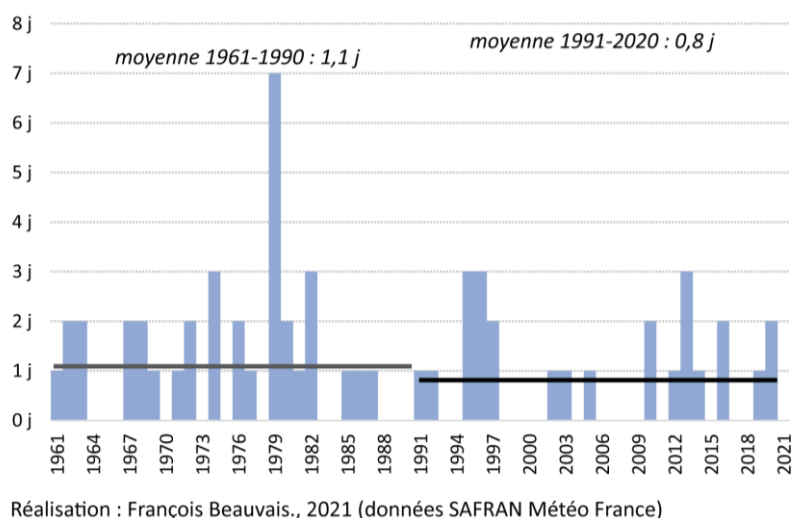
Les risques du froid en fin de printemps

Enfin, les températures inférieures ou égales à 0 °C peuvent geler les épis lorsqu'ils sont sortis. Toutefois, le stade épiaison intervient au mois de juin pour les premières décennies de la chronique et de mai au cours de ces dernières décennies. Le blé n'est alors pas exposé aux gelées à cette période de l'année. Une seule occurrence est relevée, le 8 mai 1974 avec -0,2 °C mais lors de cette décennie, il était peu probable que les températures permettent un avancement du blé avec une épiaison début mai.

5.1.3. Maintien de la pression des basses températures à la méiose

Les températures inférieures à +4 °C sur la période proche de la méiose, engendrent un déficit de fécondation. Ce stade se réalise au cours du mois de mai. De la même façon que pour les autres indicateurs, une variabilité interannuelle des basses températures au mois de mai est observée (**Figure 123**). Toutes les années ne sont pas concernées par cet aléa. Lorsque c'est le cas, il n'y a pas plus de 3 jours de basses températures, à l'exception de l'année 1979 (7 jours). En moyenne, il s'agit d'une journée. Par conséquent, la probabilité d'une concomitance entre ces basses températures et la méiose est plutôt faible. Une légère diminution de -0,3 jour est constatée entre les deux Normales climatiques, même si elle n'est pas statistiquement significative au test de MK. Lorsque ces basses températures sont associées à un faible rayonnement journalier, les dégâts occasionnés peuvent être plus prononcés. Néanmoins, cette concomitance n'est pas observée car les basses températures à cette période sont globalement associées à un ciel clair nocturne, donc au soleil en journée.

Figure 123 : Evolution du nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 4 °C au cours du mois de mai de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



5.1.4. Stabilisation du nombre de jours disponibles pour la vernalisation (entre +3 et +10 °C)

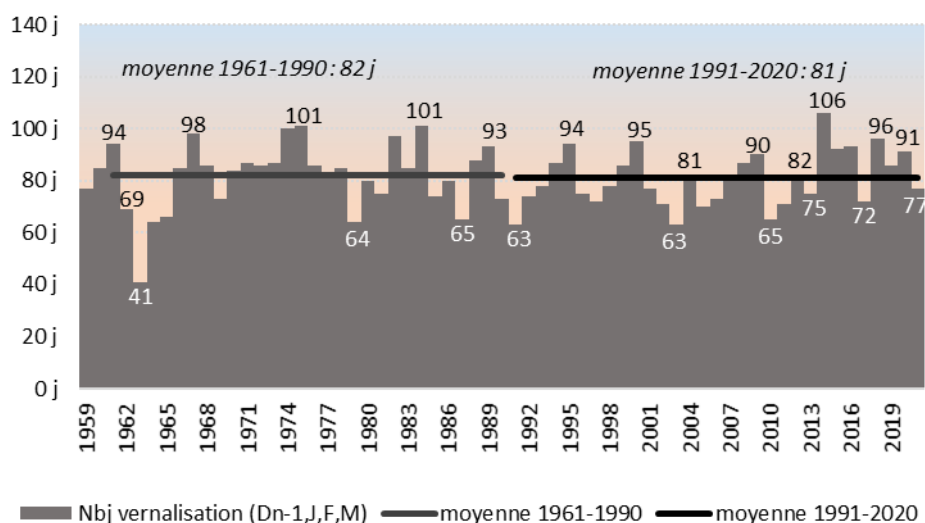
La vernalisation correspond à une plage de températures « froides » relativement à la plante mais elle n'est pas assimilable au froid en général.

Le climat de la Plaine de Caen est favorable à l'accumulation de jours vernalisants pour le blé. L'hiver est à la fois pas trop doux, garantissant de nombreux jours sous le seuil de 10 °C et pas trop froid, limitant les journées où la température moyenne est inférieure à 3 °C.

Sur l'ensemble des mois de décembre à mars, le blé tendre dispose d'environ 80 jours de vernalisation (**Figure 124**). Le maximum de jours disponibles est relevé en 2014 avec 106 jours. Le minimum, enregistré en 1963 avec seulement 41 jours, résulte à de températures trop faibles pour entrer dans les bornes 3-10 °C. Plus globalement, certaines années offrent plus de 90 jours quand d'autres n'en cumulent qu'une soixantaine. Par conséquent, les variétés de type « très hiver » (nécessitant plus de 60 jours de vernalisation) ne doivent pas être semées trop tard sans quoi elles ne peuvent pas cumuler ces jours de froid dès le début du mois de décembre. Si elles n'ont pas emmagasiné les 60 jours de basses températures, la plante ne peut pas entamer sa montaison et reste à l'état végétatif. C'est également une condition nécessaire pour la floraison.

Depuis 1961, aucune évolution significative n'est constatée par le test de MK. L'offre de jours de vernalisation reste inchangée. Bien qu'avec le réchauffement certains jours ont une température au-delà du seuil de 10 °C, d'autres initialement plus froids dépassent le seuil de 3 °C, ceux-ci compensant ceux-là.

Figure 124 : Evolution du nombre de jours de vernalisation pour les mois de décembre à mars de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



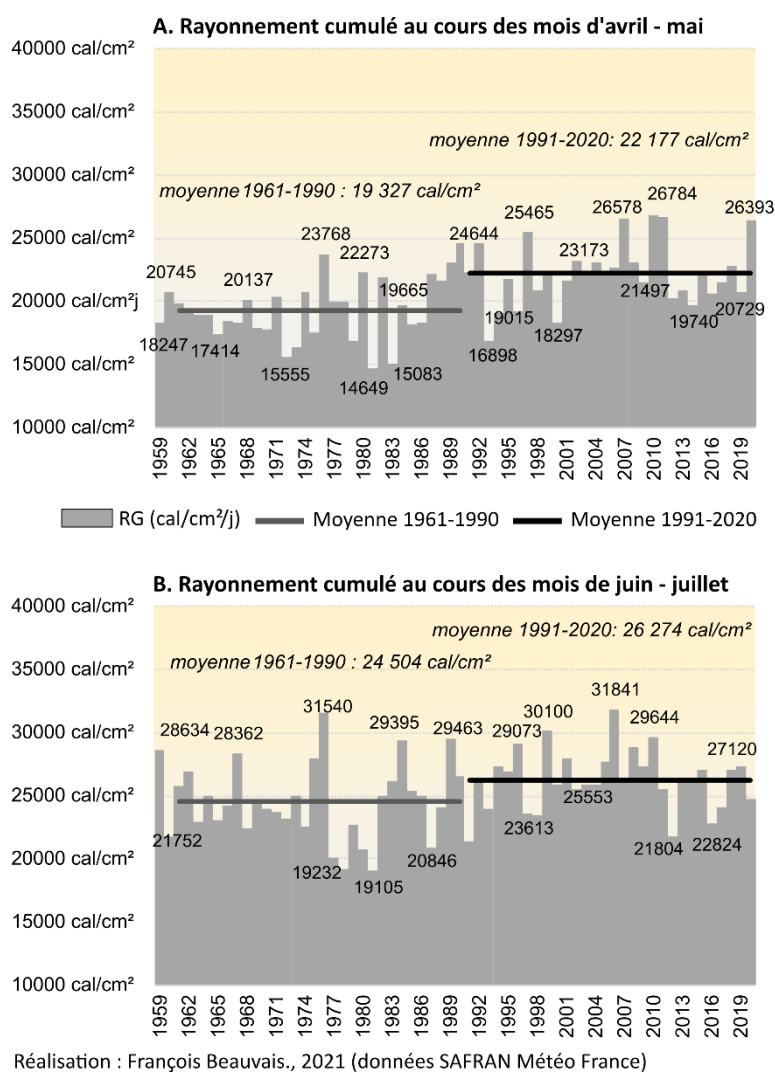
5.1.5. Augmentation du rayonnement cumulé lors de la montaison

Pour sa croissance, le blé a besoin de rayonnement. Lorsqu'il est déficitaire, la photosynthèse est moindre. Un déficit de rayonnement peut aussi prédisposer le blé à la verse physiologique. Le rayonnement cumulé au cours de la montaison (avril et mai) et du remplissage des grains (juin et juillet) est soumis comme tous les paramètres météo à la variabilité interannuelle (**Figure 125**). Sur la Normale, 1961-1990, certaines années sont marquées par un très faible rayonnement. En 1972 et en 1973, les mois de mars et d'avril cumulent respectivement 15 500 et 16 420 cal/cm², tout comme en 1981 et 1983 avec 14 600 et 15 000 cal/cm². Pour d'autres années, les cumuls sont supérieurs à 22 000 cal/cm²/j, comme en 1976, 1980, 1987, 1989 et 1990. Sur la seconde Normale, 1991-2020, les années au faible rayonnement, à l'exception de 1993 (16 900 cal/cm²), correspondent à la valeur moyenne de la première période précédente. Certaines années le blé profite d'un cumul de rayonnement supérieur à 26 000 cal/cm² (2007, 2010, 2011 et 2020). Le rayonnement cumulé augmente de 15 % entre les deux Normales climatiques, passant de 19 327 à 22 177 cal/cm² (test de MK significatif). Cette observation est également valable pour les mois de mai et de juin. Certaines années, le remplissage des grains n'est exposé qu'autour de 20 000 cal/cm² comme en 1977, 1978, 1980, 1981 et 1987. Pour les années les plus favorables, il s'agit de 28 à 29 000 cal/cm², et même 31 500 cal/cm² en 1976. Lors de la seconde Normale, les plus faibles cumuls ne sont pas inférieurs à 20 000 cal/cm² mais autour de 21 à 22 000 cal/cm². Ce sont notamment les années 1990, 2012 et 2016. La deuxième partie des années 2000 a été marquée par des cumuls conséquents, avec un pic à près de 32 000 cal/cm²/j en 2006. Sur ces mois de mai et de juin, le rayonnement cumulé a augmenté de 7 %, passant de 24 500 à 26 274 cal/cm².

Par ailleurs, nous avons vu que l'assimilation du CO₂ par le blé en pleine croissance sature à partir de 0,7 à 0,8 cal/cm²/min. En multipliant la valeur de 0,8 cal/cm²/min par le nombre d'heures de chaque journée entre le 1^{er} avril et le 31 juillet, nous pouvons connaître le rayonnement théorique journalier limite d'absorption. On se demande alors si l'offre de rayonnement pourrait être

supérieure à la limite de valorisation par le blé¹⁰⁵. Autrement dit, y a-t-il une offre de rayonnement plus élevée que les besoins du blé ? On constate, sur cette période 1991-2020, qu'aucune journée ne dispose d'un rayonnement supérieur à cette limite de valorisation par le blé. Il n'y a donc pas de journée avec un trop plein de rayonnement. Sur l'ensemble des 122 jours composant ces 4 mois, le rayonnement réellement perçu par le blé est d'environ 48 400 cal/cm², donc très en deçà de sa limite d'assimilation sur l'ensemble de la période (87 800 cal/cm²).

Figure 125 : Evolution du rayonnement cumulé pour les mois d'avril-mai et de juin-juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



5.1.6. Augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique

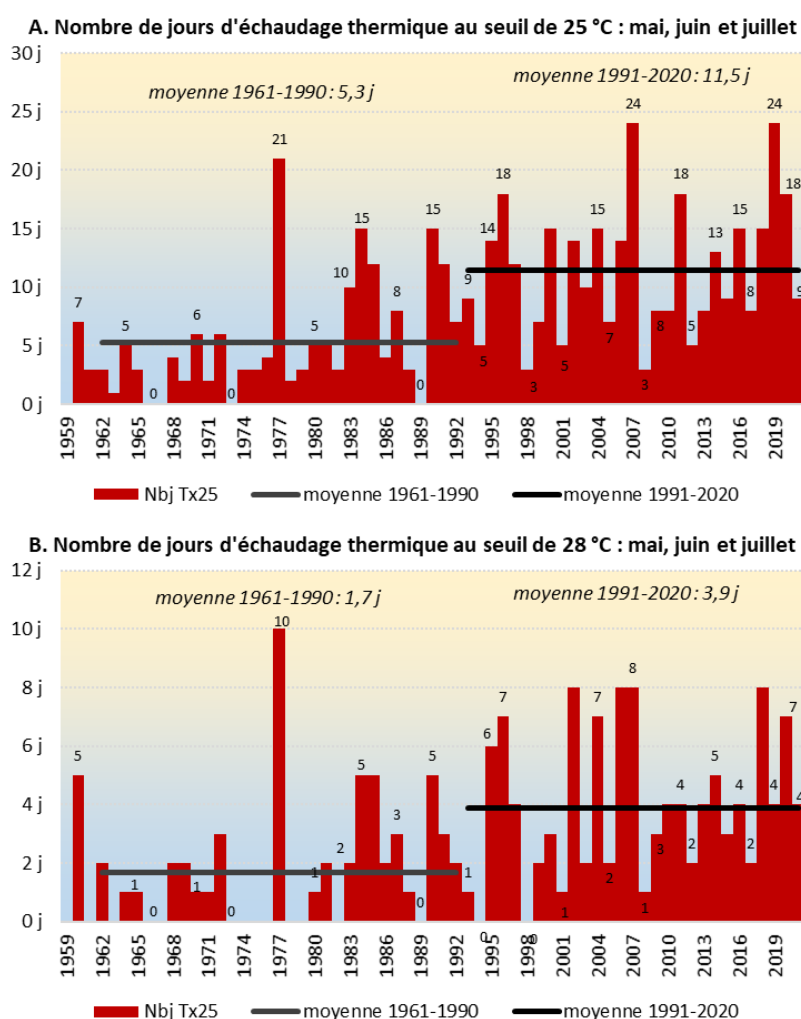
La formation du grain et son remplissage correspondent aux mois de mai, juin et juillet. Les journées d'échaudage thermique, c'est-à-dire lorsque la température maximale est supérieure ou égale à 25 °C, constituent un facteur limitant pour la croissance du grain. Trois années ne sont pas échaudantes : 1965, 1966 et 1972. Elles apparaissent dans la première Normale climatique. A

¹⁰⁵ Un excès de rayonnement solaire n'engendre pas de conséquences sur le blé tendre d'hiver. Néanmoins, les journées à fort rayonnement solaire sont souvent associées aux fortes chaleurs.

contrario le cumul s'élève à 24 jours en 2006 et 2018, 21 jours en 1976 et 18 jours en 2010 et 2011. Dans l'ensemble, les années les plus échaudantes se concentrent durant la seconde Normale climatique. En moyenne le nombre de jours d'échaudage thermique augmente de 6 jours (MK significatif), passant de 5 à 12 jours (**Figure 126 A**).

L'échaudage thermique est d'autant plus limitant lorsque la température maximale atteint 28 °C. Le remplissage des grains interrompu peut ne pas reprendre. C'est en 1976 que l'on compte le plus de dépassement de ce seuil, avec 10 reprises (**Figure 126 B**). A l'exception de 1976, les années cumulant le plus de jours d'échaudage à 28 °C sont toutes comprises dans la seconde Normale climatique. Depuis l'an 2000, toutes les années comptent au moins une journée à 28 °C alors que ce seuil n'était pas toujours franchi annuellement au 20^e siècle.

Figure 126 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique pour les mois de mai, juin et juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données SAFRAN Météo France)

Les excès thermiques, considérés à partir de 30 °C, pénalisent la fertilité du blé lorsqu'ils surviennent sur la période proche de la méiose et lors des trois jours qui précèdent la floraison. Cet aléa n'intervient pas au mois de mai. En revanche, ce seuil peut être dépassé au mois de juin. Sur la première Normale, 1961-1990, seulement deux journées sont relevées. En revanche, l'occurrence augmente lors de la seconde. Il s'agit de trois jours en 2017, deux jours en 2001, 2005, 2011, 2019

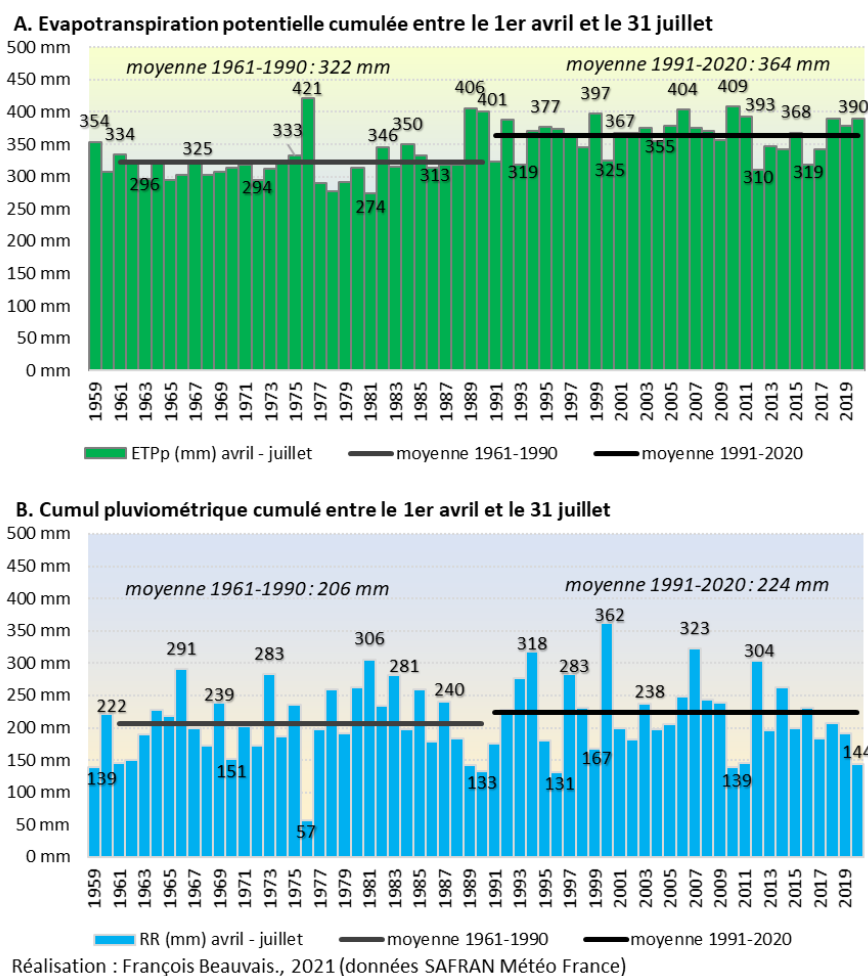
et 2020, un jour en 1995, 1998, 2003, 2006 et 2015. Le test de MK détecte d'ailleurs une tendance significative. Néanmoins, la probabilité d'une concomitance entre ces excès de températures et les quelques jours de sensibilité du blé reste faible. Par conséquent, il en va de même pour que des dégâts soient occasionnés pour l'ensemble de la Plaine agricole dans la mesure où les dates de semis et les précocités sont variables d'une parcelle à l'autre.

5.1.7. Augmentation du déficit hydrique

La période d'avril à juillet correspond à la montaison puis au remplissage des grains. Cette période est caractérisée par une ETP plus importante qu'en hiver en raison du rayonnement et de la température plus élevés. Certaines années sont marquées par des cumuls d'ETP importants (**Figure 127 A**), autour de 400 mm d'avril à juillet en 1976, 1989, 1990, 1999, 2006, 2010, 2011, 2018 et 2020. Ces années, où la demande évapotranspiratoire est élevée, sont surtout concentrées dans la seconde Normale climatique (1991-2020). Parallèlement, des années sont confrontées à des cumuls pluviométriques faibles (**Figure 127 B**). Ainsi seulement 57 mm sont relevés entre le 1^{er} avril et le 31 juillet 1976. Mais il s'agit là de la Grande sécheresse de 1976¹⁰⁶. Les autres années défavorables recensent entre 130 et 150 mm. Au contraire, parfois le total pluviométrique excède 250 mm, et même 300 mm à quatre reprises. L'ETP a augmenté en moyenne de 13 %, passant de 322 à 364 mm entre 1961-1990 et 1991-2020 (MK significatif). L'offre climatique (les précipitations) est également en hausse de 9 % entre les deux Normales climatiques.

¹⁰⁶ Il sera souvent fait référence à cette Grande sécheresse dans ce manuscrit dans les mesures où les conditions exceptionnelles (Trzpit, 1978) vécues alors se rapprocheraient de celles que nous pourrions connaître dans un futur lointain plus chaud et plus sec.

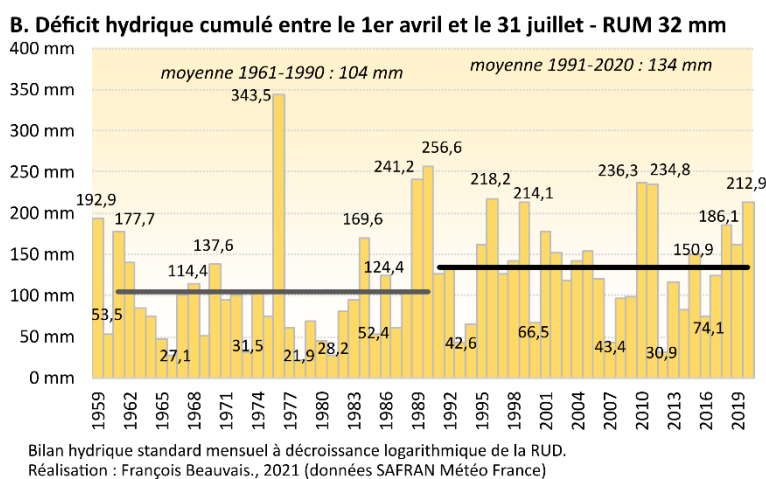
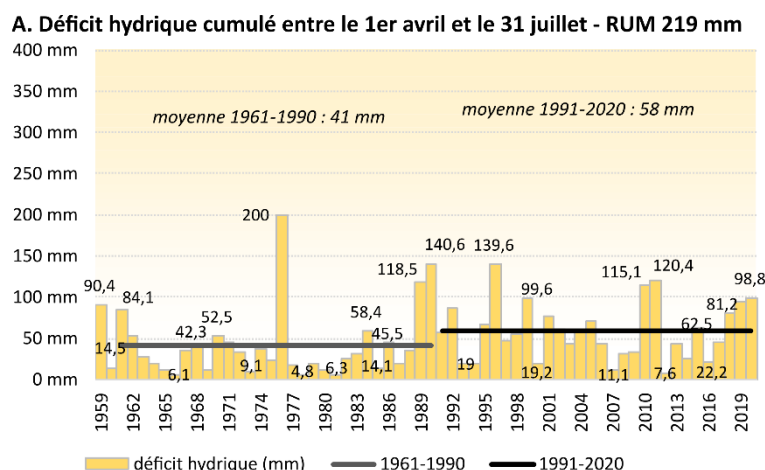
Figure 127 : Evolution de l'ETP et du cumul pluviométrique entre le 1^{er} avril et le 31 juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



Le manque d'eau pour la végétation est un aléa connu en Plaine de Caen, notamment en contexte de petits sols. Sur les 60 dernières années, certaines furent marquées par des sécheresses pédologiques contraignantes pour le développement et la croissance des plantes avec un manque d'eau pouvant parfois atteindre plus de 200 mm (et même près de 350 mm en 1976 !) sur la période comprise entre le 1^{er} avril et le 31 juillet : 1976, 1989, 1990, 1996, 1999, 2010, 2011 et 2020 (**Figure 128**). En contexte de sols épais, ces mêmes années enregistrent un déficit hydrique plus important que la moyenne, supérieur à 100 mm. Pour illustrer la meilleure résilience des sols épais à la sécheresse, on constate que le manque d'eau des années les plus défavorables au nord de la Plaine correspondent à celui cumulé lors d'une année moyenne en partie sud.

Le déficit hydrique cumulé pour la végétation sur ces dates invariantes a augmenté entre les deux Normales climatiques. La hausse du cumul pluviométrique ne compense donc pas totalement l'augmentation de l'ETP. En effet, il est en moyenne de 134 et de 58 mm, respectivement pour les sols épais et minces sur la période 1991-2020, contre 104 et 41 mm pour 1961-1990 (MK significatif). Cette évolution est défavorable pour la montaison et le remplissage des grains du blé tendre. Néanmoins, en intégrant le coefficient cultural et la prise en compte de la phénologie de la plante, les résultats sont différents (cf. chapitre 6).

Figure 128 : Déficit hydrique cumulé entre le 1er avril et le 31 juillet de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



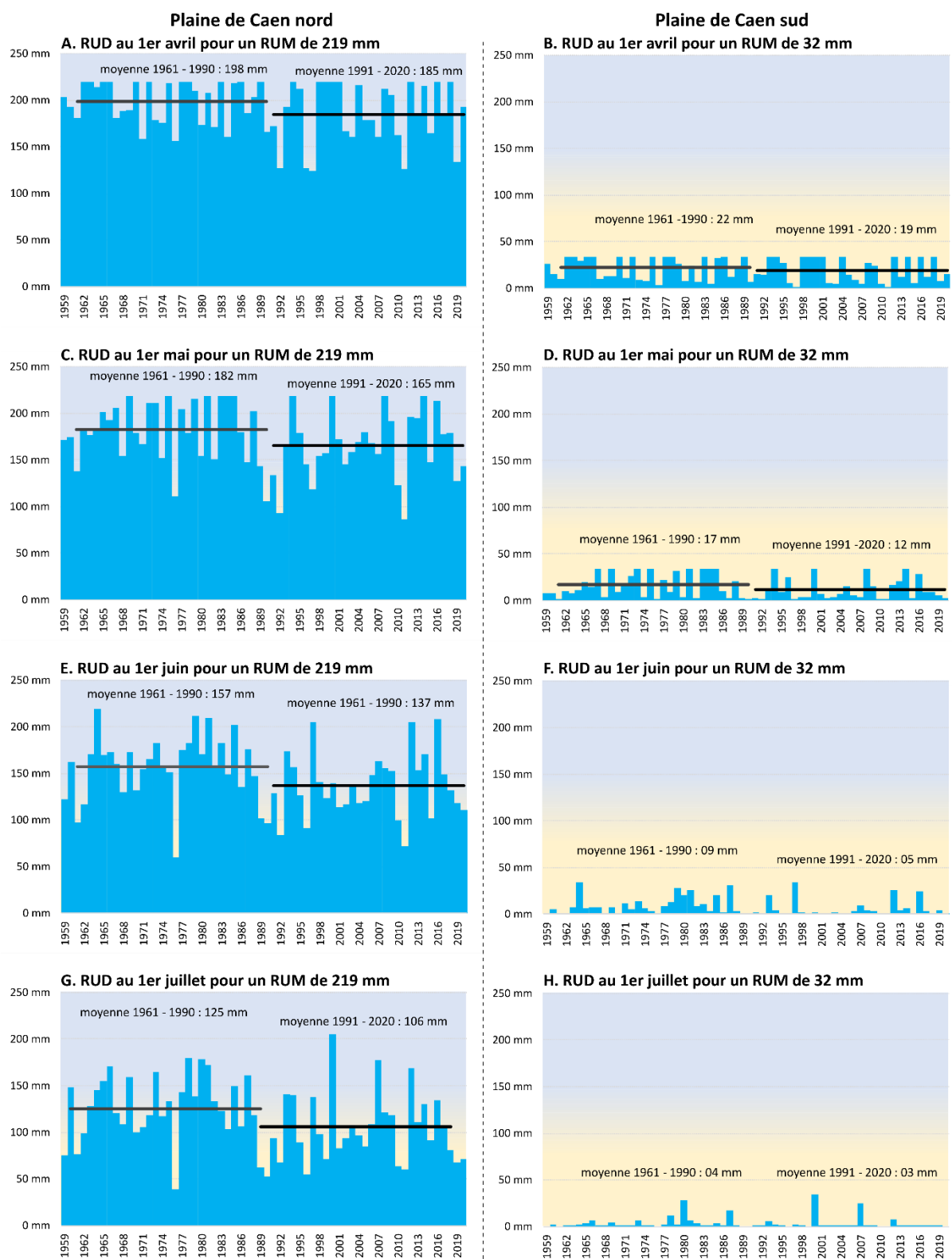
Cette évolution s'exprime également au travers de la RUD pour l'ensemble des mois concernés par la montaison et le remplissage des grains (Figure 129 et 130). A titre d'exemple, il reste en moyenne 182 mm d'eau disponible dans le sol épais le 1^{er} mai pour la Normale 1961-1990, contre 165 mm pour la Normale 1991-2020 (-17 mm). Dans le cas du sol mince, cette quantité d'eau baisse de 17 à 12 mm. La diminution de la RUD (-5 mm) est moins perceptible pour le sol mince dans la mesure où le contexte est déjà très défavorable avec un sol quasi-dépourvu en eau au moment où les besoins de plante augmentent. Certaines années, la RUD peut être presque vide dès le 1^{er} avril. C'est pourquoi les exploitants du secteur sud précisent que les productions sont dépendantes des précipitations, contrairement au secteur nord où la plante peut encore puiser dans la réserve. Au 1^{er} juillet, la RUD d'un sol épais peut descendre autour de 50 mm en année défavorable. Il s'agit d'une valeur bien supérieure à la quantité d'eau maximale des sols minces du secteur sud (RUM de 34 mm), ce qui illustre bien la différence de contexte biopédoclimatique.

Figure 129 : Remplissage des grains de blé tendre sur les petits sols de Fierville-Bray le 29 juin 2020



Photographie : François Beauvais., le 29 juin 2020

Figure 130 : Evolution de la RUD au pas de temps mensuel de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



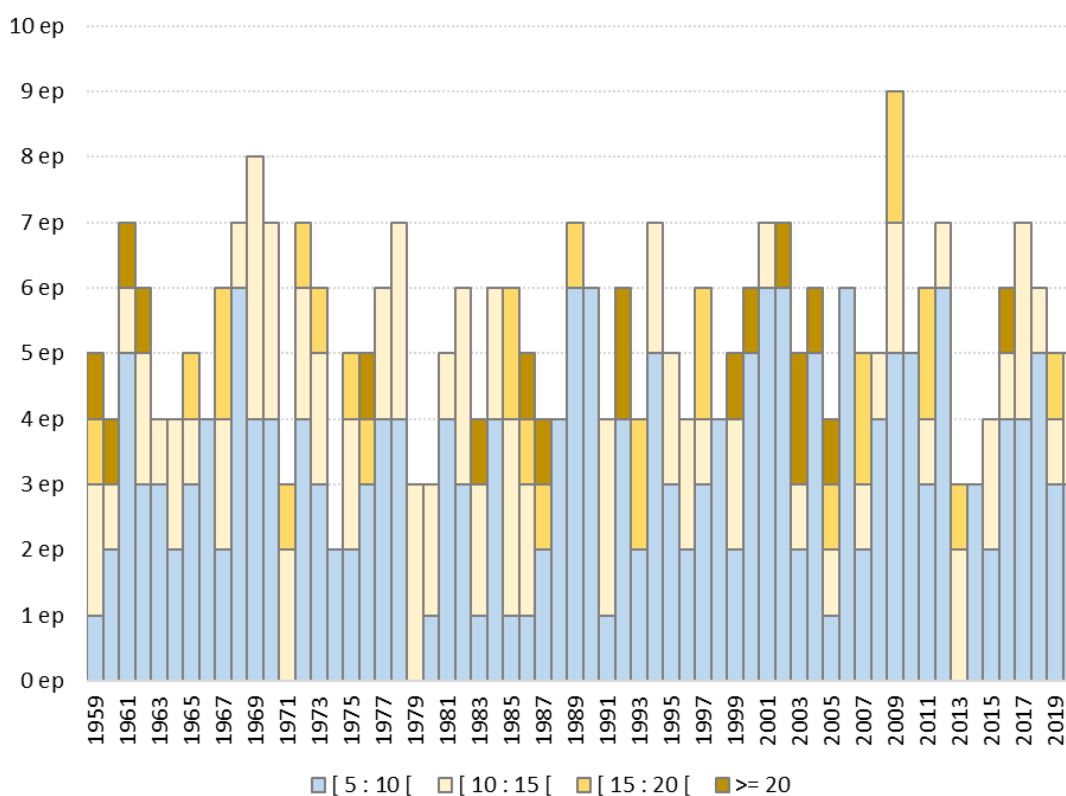
Réalisation : François Beauvais., 2021

Bilan hydrique mensuel standard à décroissance logarithmique (données SAFRAN Météo France).

RUD (mm) — moyenne 1961-1990 — moyenne 1991-2020

La RUD des petits sols ne permet pas de compenser l'absence de précipitations sur une longue durée. Le technicien de la société Lepicard précise qu'au-delà de 15 jours sans pluie, le blé commence à souffrir d'un déficit hydrique. Dans le même temps, des exploitants constatent une modification de la régularité des précipitations intra-saisonnières caractérisées par de plus longues périodes de sec suivies de plus longues périodes de pluie. La durée des périodes sans précipitation serait-elle en augmentation ? Pour vérifier, nous nous intéressons au nombre d'épisodes comportant une suite de jours secs sur l'ensemble de la période 1961-2020 entre le 1^{er} avril et le 31 juillet (**Figure 131**). Aucune tendance significative n'est détectée au test de MK. En moyenne, les épisodes comprenant entre 5 et 10 jours secs passent de 3 à 3,5 par an entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020. Ceux dénombrant entre 10 et 15 jours passent de 1,6 à 1,1 par an. Les phases plus longues ont une occurrence inférieure à 1 et il n'y a pas d'évolution des moyennes.

Figure 131 : Evolution des épisodes de succession des jours secs de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : F. Beauvais., 2020 (données SAFRAN Météo France)

5.1.8. Evolution des surplus hydrologiques

En hiver, lorsque les sols sont saturés en eau, les surplus hydrologiques peuvent engendrer la stagnation d'eau en surface du sol pendant plusieurs jours. Cela concerne les zones planes où l'eau ne peut s'écouler, ou bien en contrebas des parcelles lorsque celles-ci sont en pente. La croûte de battance, empêchant l'eau de pénétrer dans les sols de texture limoneuse, favorise également ce type d'aléa (**Figure 132**). La plante est alors ennoyée et se trouve asphyxiée, ce qui engendre une perte de pieds/m² comme en témoigne la **Figure 133**.

Les surplus hydrologiques sont en moyenne d'environ 100 mm pour les sols de la partie nord et de 140 mm pour la partie sud de la Plaine de Caen (**Figure 134**). Lorsque le sol est déjà saturé en eau à la fin du mois de décembre, les surplus hydrologiques entre les sols épais et minces des mois qui suivent sont identiques. C'est le cas lorsque l'automne et l'hiver sont plus arrosés que la normale. A titre d'exemple, l'automne 2000 enregistre 133 mm et 120 mm de précipitations en octobre et novembre, soit respectivement 82 et 53 % de plus que la moyenne 1961-2020. Les précipitations de décembre 2000 à mars 2001 étant 88 % supérieures, les surplus hydrologiques atteignent 339 mm que les sols soient minces ou épais puisqu'ils étaient tous en surplus hydrologiques dès la fin du mois d'octobre. En revanche, lorsque la capacité au champ intervient plus tard dans l'hiver, les surplus du sol mince sont plus importants que ceux du sol épais en raison d'un rechargement en eau plus rapide. 9 années pour les sols minces et 5 années pour les sols épais enregistrent plus de 200 mm d'excédents. L'absence de surplus concerne 9 années sur la période 1961-2020 pour les sols profonds et qu'une seule année pour les petits sols. Mais il n'y a pas de tendance significative au test de MK sur l'ensemble de la chronique.

Figure 132 : Sol limoneux en Plaine de Caen (Anguerny le 11/02/2019) soumis à la battance



Figure 133 : Conséquences des surplus hydrologiques stagnants en surface du sol sur deux parcelles au Mesnil-Patry (14) au cours de l'hiver 2020

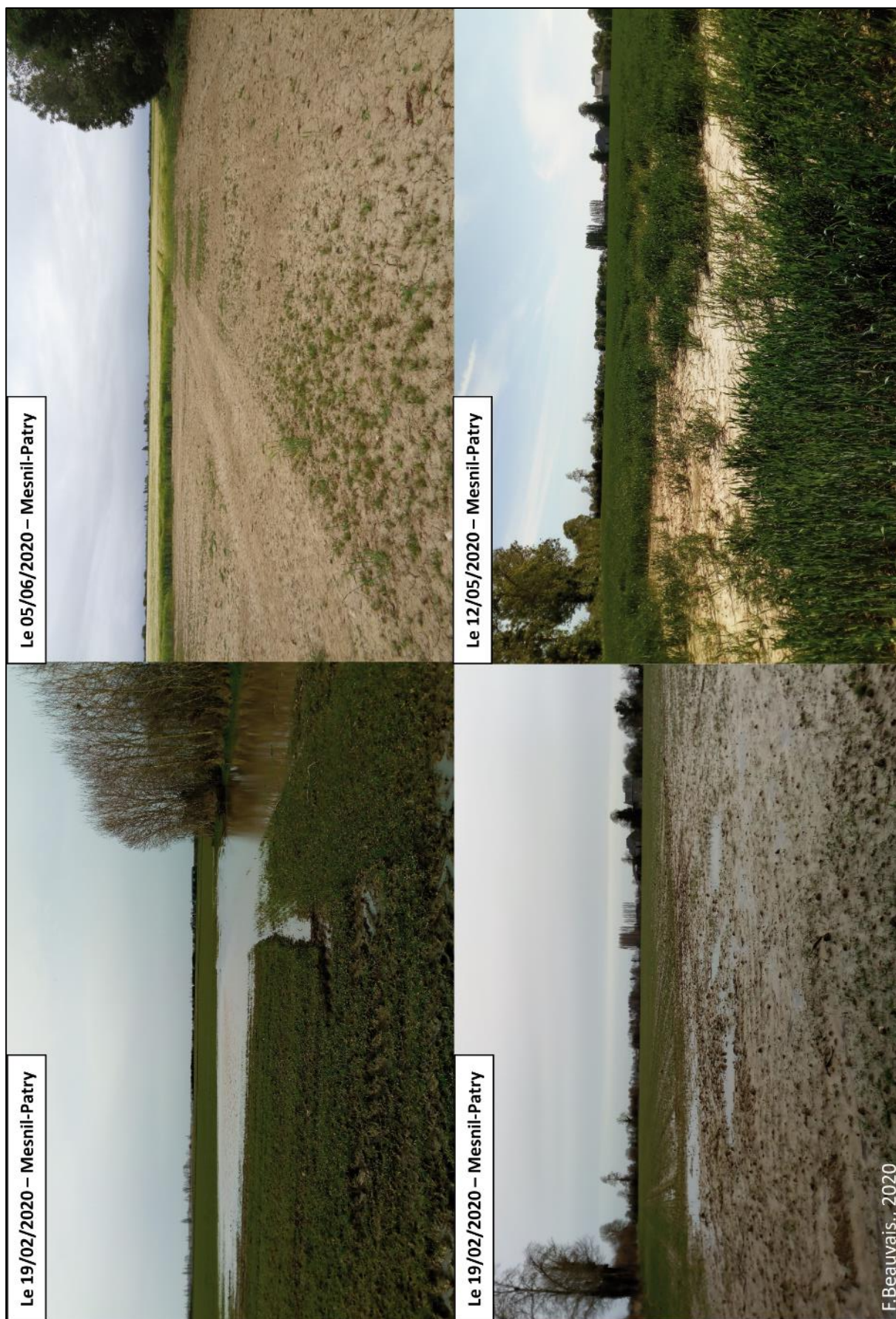
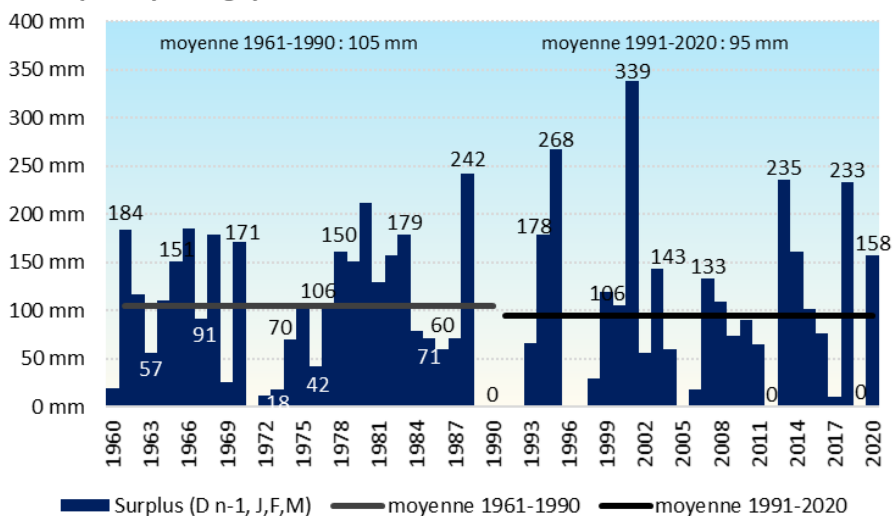
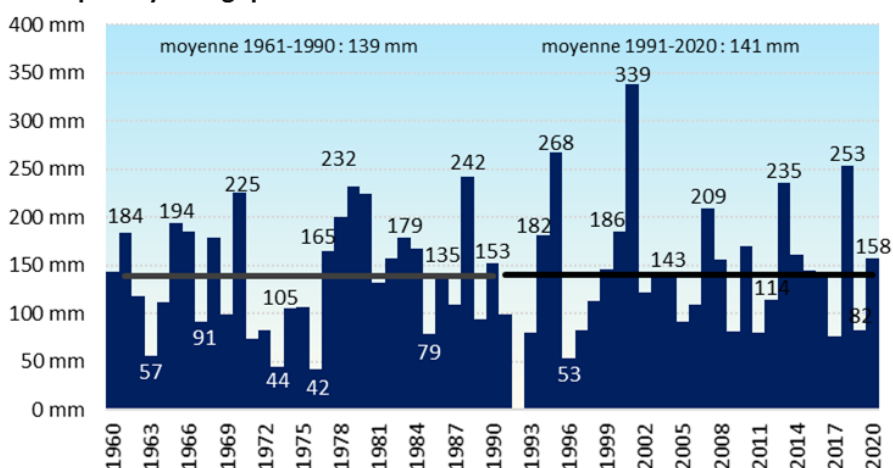


Figure 134 : Surplus hydrologiques cumulés du 1^{er} décembre au 31 mars de 1960 à 2020 en Plaine de Caen

A. Surplus hydrologiques cumulés du 1er décembre au 31 mars RUM 219 mm



B. Surplus hydrologiques cumulés du 1er décembre au 31 mars RUM 32 mm



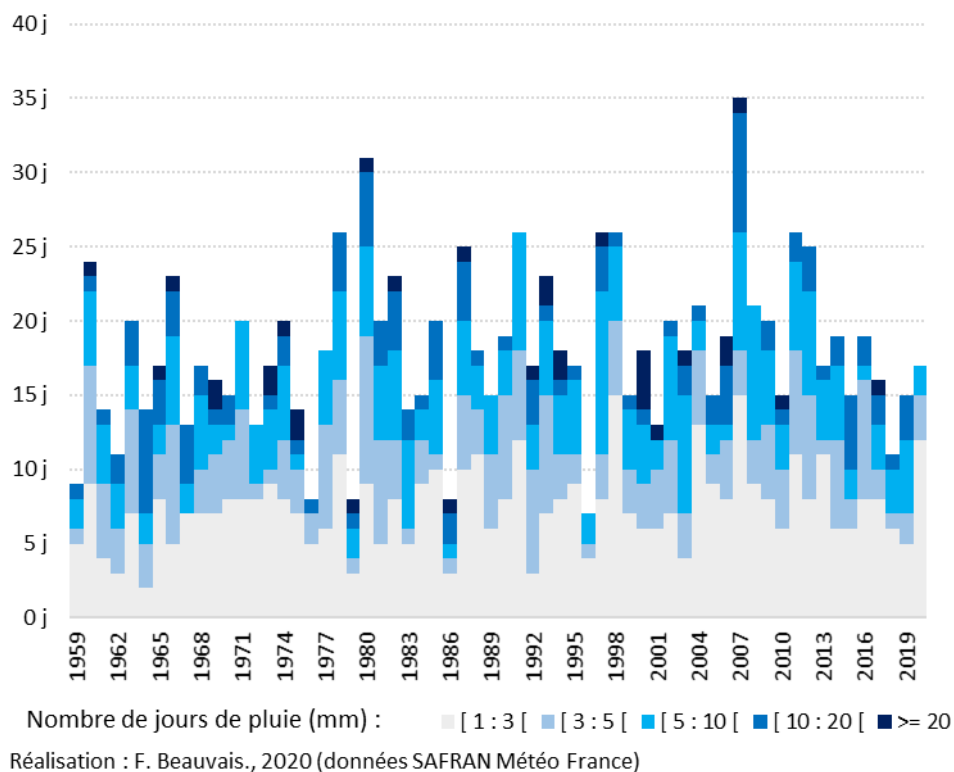
Surplus hydrologiques calculés à partir d'un bilan hydrique mensuel à décroissance logarithmique.
Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN Météo-France)

5.1.9. Absence d'évolution significative des fortes précipitations

Les jours de forte pluie peuvent engendrer la verse du blé au cours du remplissage des grains, moment du cycle où les épis sont les plus lourds. Sur les mois de juin et de juillet, le nombre de jours de précipitations significatives a augmenté de 2 jours entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020, passant de 17 à 19. Il n'y a aucune tendance significative de l'évolution des jours de pluie pour différents seuils de cumuls journaliers (**Figure 135**). Le nombre de jours de précipitations comprises entre 3 et 5 mm reste identique (4 jours). Entre 5 et 10 mm, une augmentation de 0,9 jour est constatée (de 3,6 à 4,5 jours). Entre 10 et 20 mm une diminution de - 0,4 jour est observée (de 2,2 à 1,8 jours). Les fortes précipitations au seuil de 20 mm, sont très rares avec 0,5 jour en moyenne et sans évolution entre les deux Normales. Certaines années, le blé a pu être vulnérable comme en 2007, 35 jours de pluie recensés sur ces deux mois dont 8 avec plus

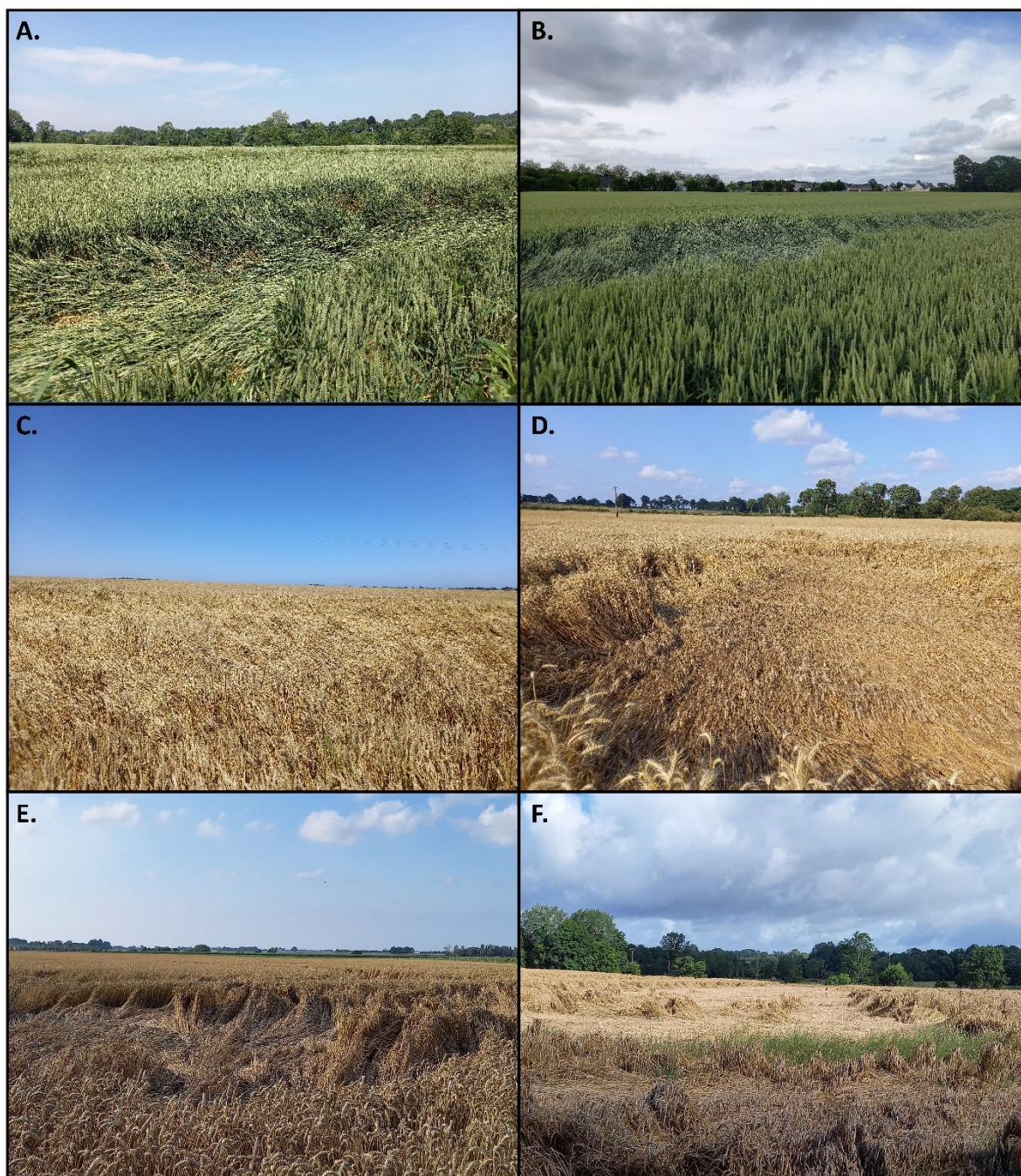
de 10 mm. En 2000, le nombre de jours de pluie est conforme à la Normale (18 jours) mais avec 4 jours de fortes précipitations (seuil de 20 mm), le risque de verse fut omniprésent.

Figure 135 : Evolution du nombre de jours de précipitations et cumul journalier associé pour les mois de juin et de juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen



Pour témoigner des dégâts engendrés par les fortes précipitations, nous pouvons nous référer à la **Figure 136**. Le mois de juin 2021 enregistre 8 jours de précipitations comprises entre 5 et 10 mm. Deux jours dépassent le seuil de 10 mm dont un maximum à 19,6 mm le 19 juin. Cette journée de fortes précipitations - 15 mm entre 23 h et minuit - a engendré la verse de certaines parcelles de blé, mais aussi d'autres cultures (orge, lin et maïs).

Figure 136 : Verse du blé tendre d'hiver dans plusieurs parcelles de la Plaine de Caen en 2021



A. le 26 juin 2021 à Chouain ; B. le 26 juin 2021 à Saint-Manvieu-Norrey ; C. le 18 juillet 2021 à Saint-Aubin-sur-Mer ;
D. le 26 juillet 2021 à Fontenay-Pesnel ; E. le 26 juillet 2021 au Mesnil-Patry ; F. le 08 août 2021 à Chouain.
Photographies : François Beauvais.

5.1.10. Baisse des jours disponibles pour les récoltes

Les jours de précipitations perturbent les récoltes. Si les grains sont trop humides, ils ne peuvent pas être récoltés car ils sont refusés par la société de collecte. Mais lorsque la moisson est retardée, ces grains peuvent germer et une perte de qualité est souvent associée.

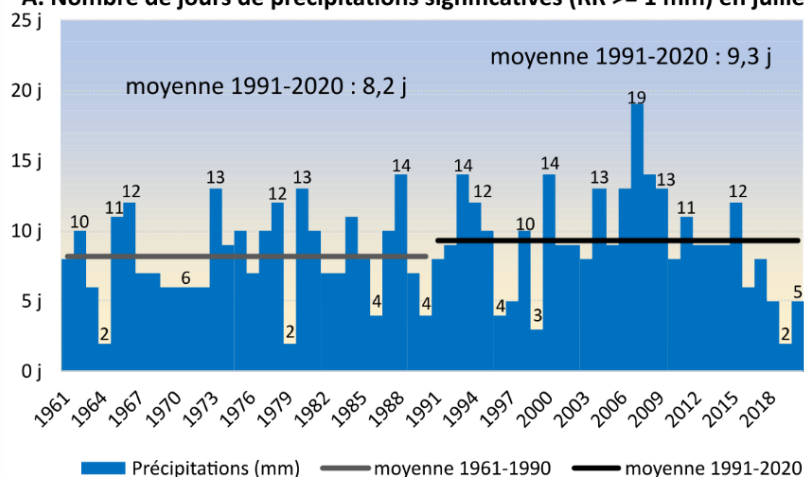
Certains mois de juillet et d'août furent particulièrement secs. Cinq mois de juillet et sept mois d'août sur la période 1961-2020 comptent moins de 5 jours de précipitations (**Figure 137**). Dans

ces cas-là, celles-ci n'excèdent pas 20 mm/mois. En revanche, d'autres années sont marquées par un nombre important de jours de pluies. Dix mois de juillet et douze mois d'août comptent plus de 12 jours de précipitations. Ces mois les plus humides peuvent parfois cumuler plus de 100 mm.

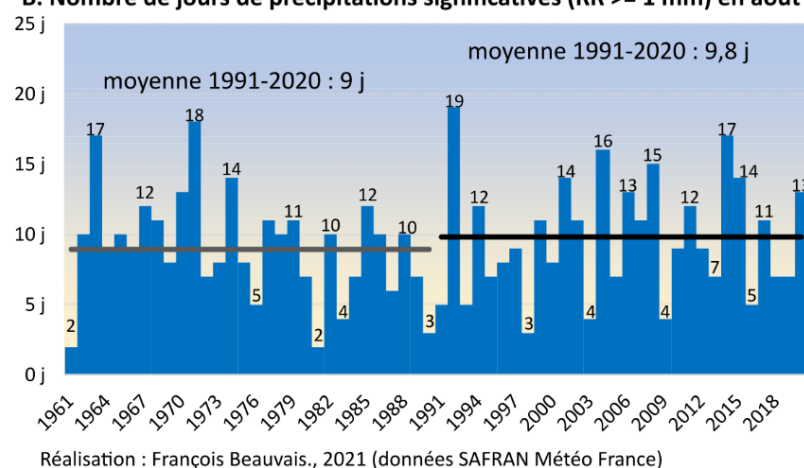
Il n'y a pas de tendances significatives de l'évolution des jours de pluie aux mois de juillet et d'août. Cependant, on constate une augmentation d'une journée en juillet entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020 puisque ces jours de pluies passent de 8,2 à 9,3 en moyenne. C'est en seconde partie des années 2000 que les mois de juillet sont les plus humides, mais depuis 2016 cette évolution s'est inversée, cette variabilité expliquant l'absence de tendance affirmée. En août une légère augmentation est également constatée puisque ce nombre de jours de pluie passe de 9 à 9,8 entre les deux Normales. Lorsque l'on s'intéresse aux périodes de succession de jours secs, aucune tendance significative n'est détectée au test de MK.

Figure 137 : Evolution du nombre de jours de précipitations significatives en juillet et en août de 1961 à 2020

A. Nombre de jours de précipitations significatives (RR >= 1 mm) en juillet



B. Nombre de jours de précipitations significatives (RR >= 1 mm) en août



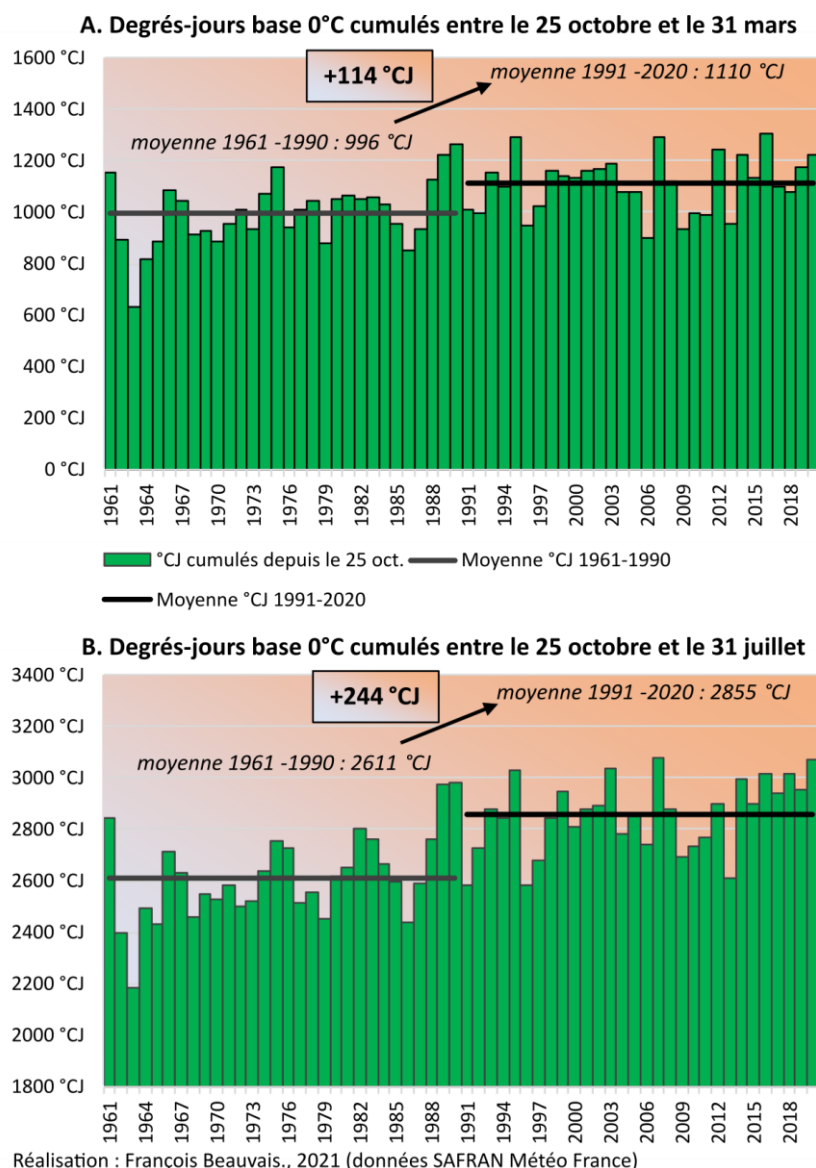
Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN Météo France)

5.1.11. Augmentation des sommes de températures disponibles

En raison de l'augmentation de la température, les degrés-jours cumulés en base 0 °C sont en hausse nette et significative. Calculés depuis le 25 octobre jusqu'au 31 mars, la somme de

températures augmente de 114 °CJ entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020 (Figure 138 A). Au 31 juillet, la hausse est de 244 °CJ (Figure 138 B).

Figure 138 : Sommes de températures cumulées au 31 mars et au 31 juillet depuis le 25 octobre de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



Au cours de la première Normale climatique, les °CJ cumulés oscillent entre un peu plus de 800 et près de 1 200 °C sur la période d'octobre à mars. 1963 est l'année avec le retard de végétation le plus important avec seulement 633 °CJ en raison d'un hiver long et rude marqué par de nombreux jours de froid (et même plusieurs journées sans dégel) qui n'ont pas permis à la plante de réaliser son développement dans les temps. Le seuil de 1200 °C est franchi lors des deux dernières années composant la Normale à savoir 1989 et 1990. Lors de la seconde Normale, les cumuls les plus bas sont entre 900 et 1000 °CJ alors que les plus importants sont au-delà de 1 200 °C, à 5 reprises, en raison de températures douces.

Le même constat s'opère pour les sommes de températures calculées jusqu'au 31 juillet. Le seuil de 3000 °C n'est jamais dépassé au cours la Normale 1961-1990 alors que c'est le cas 6 fois pour la suivante (1991-2020). Par ailleurs, on constate que les cumuls les plus faibles sur la Normale 1991-2020 correspondent à la valeur moyenne de ceux de la Normale 1961-1990.

Par conséquent, on en déduit que dans le cas de dates de semis inchangées et de variétés de précocités similaires sur l'ensemble de la période, une avancée des stades phénologiques dans le calendrier.

Figure 139 : Récolte du blé par temps sec à Anguerny le 02 août 2019



Photographie : François Beauvais., le 02 août 2019

Enfin, le nombre de jours d'échaudage a augmenté de 6 jours entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020 sur les mois de mai, juin et juillet, impactant la formation et le remplissage des grains. Le déficit hydrique a augmenté de 28 et de 41 % respectivement pour les sols épais et minces sur la période avril-juillet correspondant à la montaison et au remplissage des grains. Ces évolutions peuvent induire des pertes de production. Ces éléments ne sont pourtant pas évoqués par les agriculteurs même pour ceux ayant le plus d'ancienneté. Si leur carrière a débuté en moyenne il y a une vingtaine d'années, ces évolutions se confirment pourtant à cette échelle temporelle.

Toutefois, le rayonnement global a augmenté de 11 % sur les mois d'avril à juillet. La plante dispose alors d'un supplément d'énergie pour sa photosynthèse.

Les autres variables climatiques étudiées ne montrent pas d'évolutions significatives. Une légère augmentation des précipitations est constatée à l'automne et en été mais elles restent faibles et ne permettent pas d'avancer une dégradation des conditions de travail. Néanmoins, certains exploitants constatent des moissons perturbées par les précipitations, élément à relativiser au regard de l'été humide de 2015 précédent l'enquête et de la concomitance entre maturité du blé et occurrence des pluies. Les surplus hydrologiques hivernaux restent stables. Il en va de même pour le nombre de jours disponibles pour la vernalisation malgré une élévation de la température hivernale.

Enfin, la température augmentant, les sommes de températures disponibles pour la croissance et le développement de la plante sont en hausse. Le blé gagne en moyenne 114 et 244 °CJ au 31 mars et 31 juillet. Cet élément correspond à l'avancée des stades constatée notamment en sortie d'hiver par les exploitants et à l'anticipation des moissons. Par ailleurs, si le cycle est plus court, le blé dispose d'un temps réduit d'élaboration du rendement.

5.2. Evolutions agroclimatiques aux horizons 2050 et 2100

Pour estimer les évolutions climatiques de la céréaliculture en Plaine de Caen, nous mobilisons une nouvelle fois l'approche agroclimatique classique au pas de temps mensuel. Les indicateurs agroclimatiques sont étudiés sur les grandes saisons à dates invariantes du cycle de la plante.

5.2.1. Légère amélioration des conditions de semis

Le scénario historique sur la période 1976-2005 simule 230 mm de précipitations cumulées sur les mois d'octobre, novembre et décembre. Ce total reste inchangé à l'horizon 2050 pour le scénario RCP 2.6. Une augmentation de +10 % est constatée avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. A l'horizon 2100, pas de changement avec les scénarios RCP 2.6 et 4.5 mais une réduction de -10 % avec le scénario RCP 8.5. Les évolutions sont donc modérées mais sont un peu plus contrastées au pas de temps mensuel d'ici la fin du siècle pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Pour le premier, le cumul pluviométrique diminue de -18 % en octobre et en novembre (**Figure 140 A et B**). Avec le second, la baisse est de -33 % en octobre et de -11 % en novembre. En revanche, pour le premier mois de l'hiver météorologique (décembre), les précipitations augmenteraient de +37 et +21 % avec ces deux scénarios (**Figure 140 C**).

Il n'y a pas d'évolution du nombre de jours de pluies significatives entre le 1^{er} octobre et le 31 décembre à l'horizon 2050. Une diminution, de -8 et -14 % est constatée à long terme avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Au pas de temps mensuel d'ici 2100, le nombre de jours de précipitations augmenterait de +5 % avec le scénario RCP 2.6 aux mois d'octobre et de novembre (**Figure 140 D et E**). A l'inverse, les scénarios RCP 4.5 et 8.5 engendreraient une diminution de -13 et -28 % en octobre et de -18 et -12 % en novembre. Il n'y a pas de changement constaté pour le mois de décembre (**Figure 140 F**).

On note toutefois que la comparaison entre le futur et la période de référence se fonde sur un scénario historique qui simule sa propre variabilité. Il semble sous-estimer le nombre de jours de pluie par rapport aux données observées du modèle SAFRAN. Par conséquent, ce constat permet de prendre du recul sur l'interprétation de ces évolutions. Dans l'ensemble elles sont peu marquées et l'incertitude de la modélisation nous encourage à rester prudents. Il n'est donc pas envisageable de dégager des conclusions lorsque les évolutions sont légères et pourraient finalement être insensibles pour l'exploitant puisqu'elles sont noyées dans une variabilité interannuelle d'autant plus soumise à l'incertitude de la modélisation. Finalement, il est possible seulement de constater une réduction des précipitations et des jours de pluie principalement au mois d'octobre pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 sur la Normale 2071-2100.

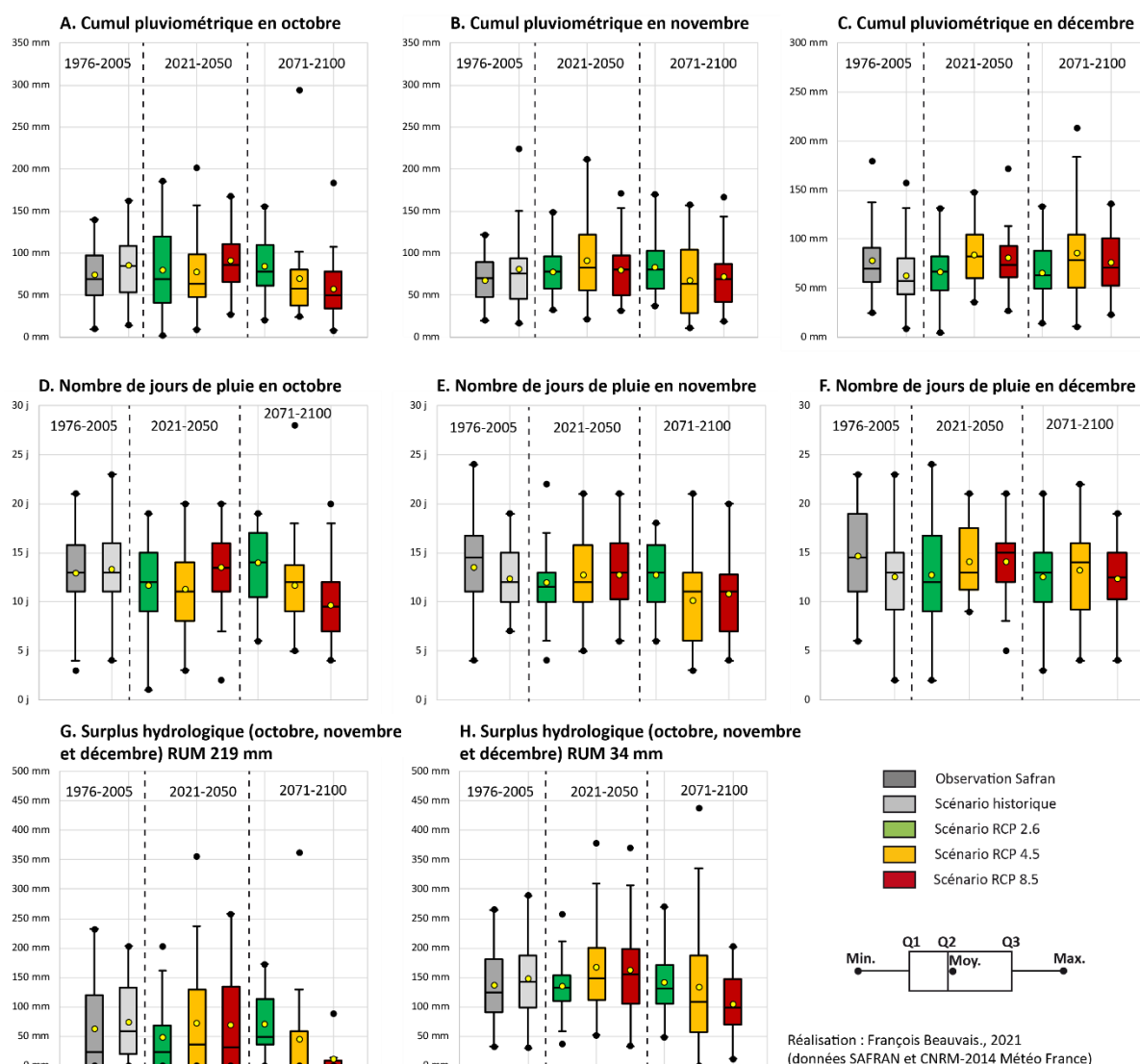
L'autre indicateur pour estimer l'évolution du potentiel agroclimatique pour les semis de blé tendre consiste à analyser l'évolution des surplus hydrologiques des sols à partir du bilan hydrique. En effet, nous avons vu précédemment que le surplus hydrologique intervient lorsque les sols sont saturés en eau. L'intervention dans la parcelle peut alors être pénible et pénaliser l'implantation future des plants de blé. Cumulés du 1^{er} octobre au 31 décembre sur la période de référence 1976-2005, les surplus hydrologiques sont autour de 70 et 150 mm (scénario historique) pour les sols épais du nord de Caen et les sols minces de la partie sud (**Figure 140 G et H**). Ils diminueraient

d'environ 20 mm pour les deux sols d'ici 2050 avec le scénario RCP 2.6. Avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5, il n'y a pas d'évolution pour le sol épais tandis qu'une hausse de l'ordre de 15 mm est constatée pour le petit sol. A l'horizon 2100, le trop plein d'eau associé au scénario RCP 2.6 est équivalent à celui observé sur la période de référence. Avec le scénario RCP 4.5, les excédents seraient de 45 et 130 mm, soit une réduction de -40 et -10 % pour les deux types de sols. C'est avec le scénario RCP 8.5 que les surplus hydrologiques diminuent le plus. Ils disparaîtraient presque pour le sol profond puisqu'ils ne seraient plus que de 10 mm, ce qui correspond à une réduction de -85 %. Ceux du sol mince seraient de l'ordre de 100 mm, c'est-à-dire qu'ils baisseraient d'environ -30 %. Ces évolutions s'expliquent par la hausse de l'évapotranspiration et la légère diminution des précipitations. Le sol sortant d'une période estivale plus sèche, met davantage de temps à se recharger en eau, d'autant que le sol est profond. Les surplus hydrologiques interviennent alors plus tardivement. Par ailleurs, si les conditions de surplus hydrologiques sont plus défavorables pour les minces du sud de Caen, il convient tout de même de préciser qu'ils sont plus faciles à travailler (cf. enquête ; chapitre 4) en raison d'une texture moins argileuse et plus filtrante.

En s'intéressant à la variabilité interannuelle, il est possible de constater que certaines années pourraient être marquées par des excès d'eau plus conséquents que ceux qui furent les plus importants de la période de référence 1976-2005. Prenons l'exemple du sol mince : le maximum des séries statistiques du scénario RCP 4.5 pourrait être supérieur à 350 mm et approcher 450 mm pour les Normales 2021-2050 et 2071-2100, soit plus de 120 et 220 mm que le maximum enregistré sur la période de référence (260 mm). Avec ce scénario à moyen terme, 1 année sur 6 pourrait connaître des surplus hydrologiques supérieurs ou égaux à 260 mm. Dans ce cas, les conditions de semis pourraient s'avérer être difficiles, voire impossibles dans le cas d'une parcelle trop chargée en eau. Admettons que l'exploitant n'ait pas réussi à semer au cours de ces trois mois, il devra alors repousser ces travaux d'ensemencement à la sortie de l'hiver et recourir à des variétés de printemps au cycle plus court et ne nécessitant pas de vernalisation.

Finalement, d'ici 2050, de faibles changements sont observés. A très long terme (2100) en revanche, les mois d'octobre et de novembre pourraient être en partie plus favorables aux travaux des semis avec une baisse du cumul pluviométrique et des jours de pluie, ainsi que des conditions d'accès à la parcelle favorisées par un rechargement en eau plus long du sol et retardant le surplus hydrologique. Malgré tout, derrière ces conditions dans l'ensemble plutôt satisfaisantes, il conviendra ne pas oublier des années extrêmes pouvant survenir avec des excès d'eau importants qui pourraient perturber très fortement les travaux d'ensemencement.

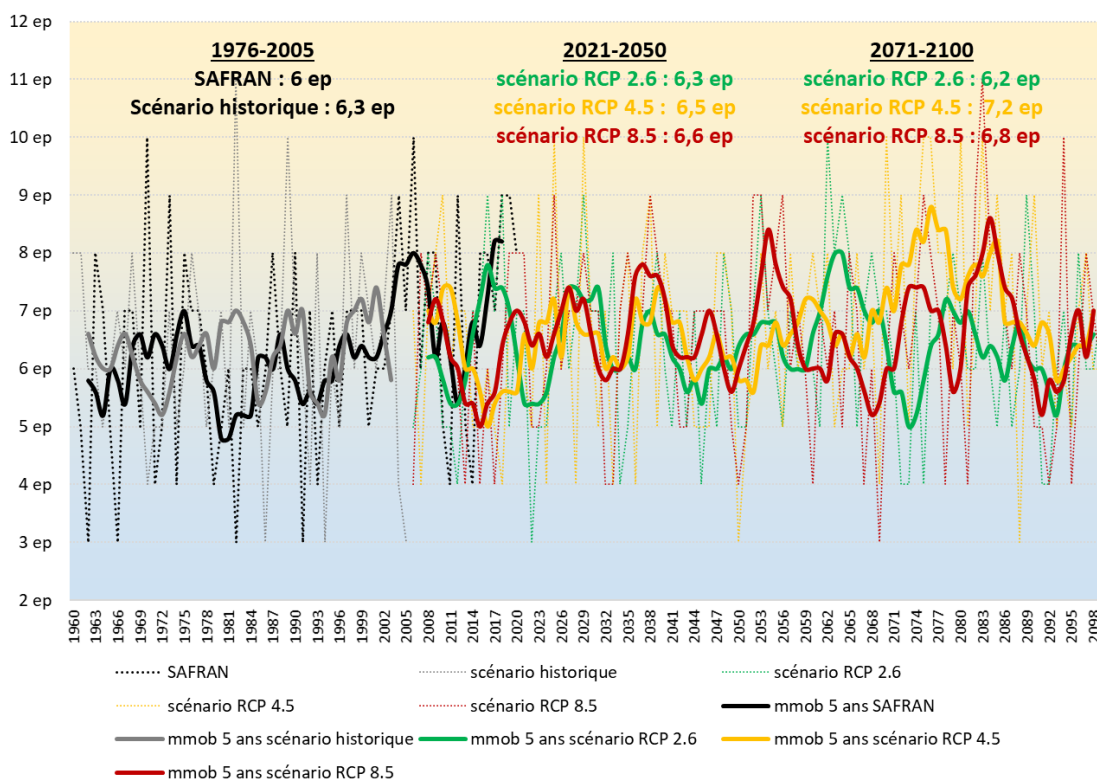
Figure 140 : Evolution des conditions climatiques et pédoclimatiques pour les travaux de semis aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP en Plaine de Caen



Outre le nombre de jours de pluie, nous avons vu dans le chapitre précédent que plusieurs jours secs consécutifs, c'est-à-dire sans précipitations significatives, peuvent être favorables aux semis. Pour cela, nous pouvons considérer les phases comportant au moins trois jours secs consécutifs, ce qui permet au sol d'être réessuyé dans le cas où l'épisode de pluie précédent aurait été trop important pour permettre à l'horizon de surface d'absorber l'eau précipitée. Il convient tout de même de préciser ici, que trois jours peuvent néanmoins être insuffisants en conditions de précipitations importantes pour un sol déjà en capacité au champ.

Entre le 1^{er} octobre et le 31 décembre, il y a en moyenne 6 épisodes comportant au moins 3 jours secs consécutifs (**Figure 141**). Sur la Normale 2021-2050, le nombre moyen d'épisodes s'élève à 6,3 ; 6,5 et 6,6 pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Sur la Normale 2071-2100, il s'agit de 6,2 ; 7,2 et 6,8 épisodes. Une tendance significative est détectée au test de MK avec le jeu de données du scénario RCP 4.5. Au final, peu de changements seraient observés quant aux phases de jours secs favorisant les travaux de semis à l'exception d'une légère amélioration avec ce dernier scénario.

Figure 141 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 3 jours secs consécutifs entre le 1er octobre et le 31 décembre de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

5.2.2. Baisse de la pression liée aux gelées et aux basses températures

Sur la période 1976-2005, le scénario historique simule 9 années sur 30 avec au moins une occurrence de gelées au seuil de -5°C pendant le mois de décembre, moment de l'année susceptible de voir le blé au stade « Levée » (Tableau 31). La simulation sur la période de contrôle surestime ces aléas puisque l'observation dénombre 5 années sur 30. L'année avec le plus d'occurrences en comptabilise 4 jours. A l'horizon 2050, elles restent rares, mais ces gelées pourraient encore être rencontrées. Le même constat s'opère pour l'horizon 2100 avec les scénarios RCP 2.6 et 4.5. Elles disparaissent uniquement dans le cas du scénario RCP 8.5.

Tableau 31 : Evolution du nombre de jours de gelées au seuil de -5°C au cours du mois de décembre aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen

		Nb années avec au moins 1 occurrence	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	05/30a	4 j
	Scénario historique	09/30a	4 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	06/30a	9 j
	Scénario RCP 4.5	05/30a	2 j
	Scénario RCP 8.5	04/30a	5 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	08/30a	5 j
	Scénario RCP 4.5	06/30a	9 j
	Scénario RCP 8.5	00/30a	-

Réalisation : François Beauvais (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Les gelées au seuil de -10 °C pendant les mois de janvier et de février, correspondant au tallage des céréales, sont également rares. Le scénario historique simule 4 années sur 30 avec au moins une occurrence (**Tableau 32**). Le nombre de jours maximum cumulés atteignant ce seuil au cours d'un hiver n'est que de deux jours. D'ici 2050, ces gelées se raréfieraient encore plus avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 et seraient même absentes avec le scénario RCP 2.6. A la fin du siècle, une seule journée à -10 °C est simulée sur l'ensemble de la Normale 2071-2100 avec le scénario RCP 2.6 puisque les deux autres scénarios voient la disparition de ces gelées intenses qui peuvent engendrer des nécroses foliaires sur la plante.

Tableau 32 : Evolution du nombre de jours de gelées au seuil de -10 °C au cours des mois de janvier et de février aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen

		Nb années avec au moins 1 occurrence	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	05/30a	2 j
	Scénario historique	04/30a	2 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	00/30a	-
	Scénario RCP 4.5	02/30a	2 j
	Scénario RCP 8.5	01/30a	2 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	01/30a	1 j
	Scénario RCP 4.5	00/30a	-
	Scénario RCP 8.5	00/30a	-

Réalisation : François Beauvais (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Les basses températures peuvent affecter la méiose pollinique qui se déroule au mois de mai, avec *in fine* des conséquences sur la fertilité du blé. Au moins une occurrence de température minimale ou inférieure à 4 °C est observée 18 années sur 30 avec les données observées (**Tableau 33**). Le scénario historique sous-estime ces basses températures par rapport aux données SAFRAN puisque cela ne concerne que 10 années sur 30. Le nombre de jours maximum avec un franchissement de ce seuil s'élève à 7 et 6 jours avec ces deux jeux de données.

Sur la Normale 2021-2050, le risque pour le blé de rencontrer ces basses températures au moment de la méiose diminuerait drastiquement puisque seulement 2 années seraient concernées par au moins une occurrence avec le scénario RCP 2.6 et 3 années avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. L'année cumulant le plus de jours sous ce seuil de température s'élèverait à seulement 3 jours.

Sur la Normale 2071-2100, cet aléa devient quasi-inexistant. 2 années restent concernées avec le scénario RCP 2.6, dont une cumulant 4 jours. Avec le scénario RCP 4.5, une seule journée aurait une température minimale inférieure ou égale à 4 °C, tandis que dans le cas du scénario 8.5, toutes les journées des mois de mai connaîtraient une température minimale supérieure à ce seuil.

Tableau 33 : Evolution du nombre de jours de basses températures au seuil de 4 °C au cours au cours du mois de mai aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen

		mai		
		Nb d'années avec au moins 1 occurrence	Moyenne	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	18/30a	1,1 j	7 j
	Scénario historique	10/30a	0,6 j	6 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	02/30a	0,1 j	3 j
	Scénario RCP 4.5	03/30a	0,1 j	2 j
	Scénario RCP 8.5	03/30a	0,1 j	2 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	02/30a	0,2 j	4 j
	Scénario RCP 4.5	01/30a	0,1 j	1 j
	Scénario RCP 8.5	00/30a	0	0 j

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

5.2.3. Baisse du nombre de jours de vernalisation

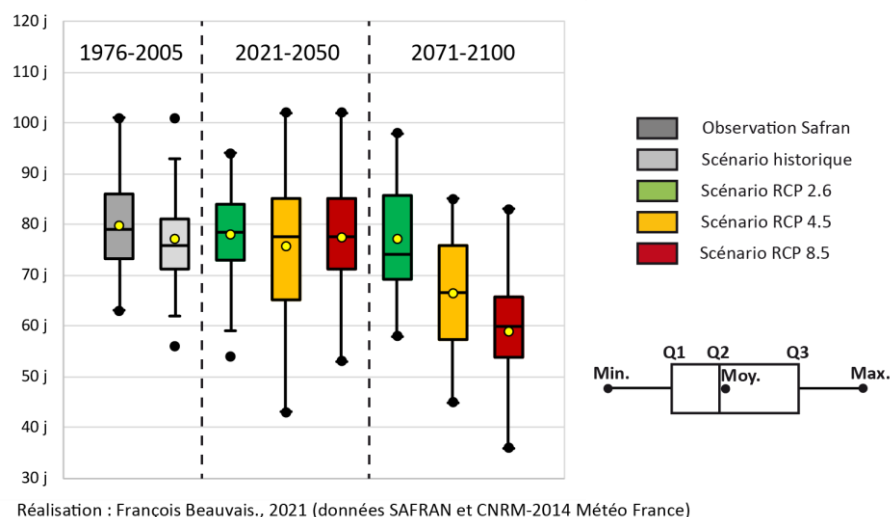
Sur la période de référence 1976-2005, 79 journées disponibles pour la vernalisation entre le 1^{er} décembre et le 31 mars sont, en moyenne, observées (données SAFRAN). Le scénario historique simule quant à lui 77 jours. Ce cumul peut atteindre jusqu'à 100 jours tandis que les hivers les plus défavorables peuvent enregistrer seulement un peu plus de 60 jours (**Figure 142**).

A l'horizon 2050, il n'y a pas d'évolution significative pour les trois scénarios RCP. Avec le scénario RCP 2.6, la variabilité interannuelle est réduite, néanmoins elle est plus prononcée avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Des années très favorables sont simulées avec des maximums jusqu'à plus 100 jours. Néanmoins, certains hivers trop doux engendreraient davantage d'années avec une plus faible offre de jours de vernalisation. A titre d'exemple, le 1^{er} quantile de la série statistique du scénario RCP 4.5 est compris entre 43 (minimum) et 63 jours (1^{er} quartile) alors que pour le scénario historique il est compris entre 56 et 71 jours.

A l'horizon 2100, la moyenne du RCP 2.6 n'évolue pas et la variabilité interannuelle revient dans les gammes du scénario historique 1976-2005. Dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5, le nombre de jours disponibles pour la vernalisation chuterait respectivement à 67 et 59 jours, soit une réduction de 10 et 18 jours : 17 et 27 années seraient sous le seuil de 70 jours disponibles. En considérant un seuil à 60 jours, il s'agirait de 11 et 17 années. Par conséquent, une année sur trois et deux années sur trois, respectivement pour les deux scénarios, ne permettraient pas de cultiver des variétés de type hiver. Pour illustrer ces conditions plus défavorables, prenons la dispersion du scénario RCP 8.5. La médiane de sa série statistique est inférieure au minimum de celle relative aux

données observées en période de référence. C'est-à-dire que sur la Normale 2071-2100, 15 années offriraient moins de jours de vernalisation que la plus défavorable sur la période 1976-2005.

Figure 142 : Evolution du nombre de jours disponibles pour la vernalisation du 1^{er} décembre au 31 mars aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



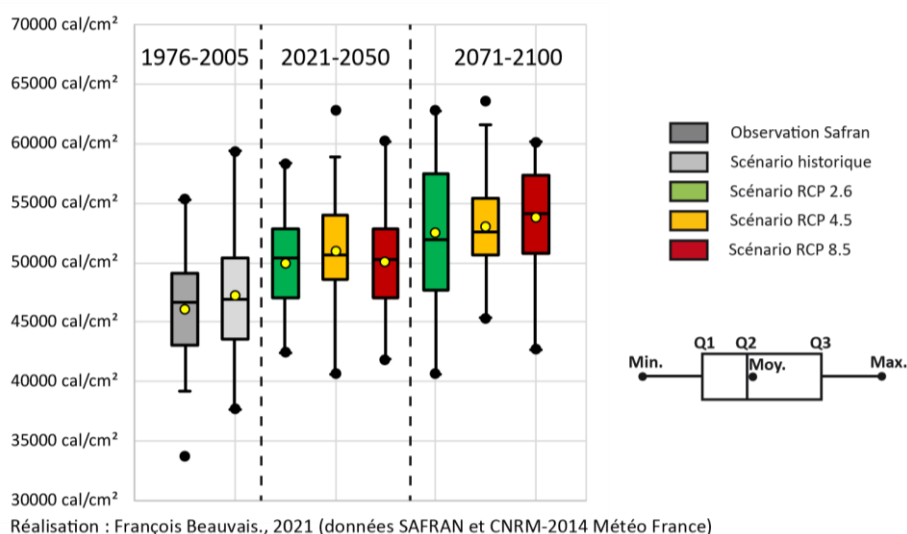
5.2.4. Hausse du rayonnement solaire cumulé entre avril et juillet

Entre le 1^{er} avril et le 31 juillet, sur la période de référence, le blé dispose d'environ 46 000 cal/cm² avec les données observées et d'un peu plus de 47 000 cal/cm² avec les données simulées (**Figure 143**). Les années les plus favorables offrent plus de 50 000 cal/cm², et plus de 55 000 cal/cm² avec le scénario historique, alors que les plus défavorables sont sous la barre des 45 000 cal/cm².

A l'horizon 2050, le rayonnement cumulé se situerait autour de 50 000 cal/cm² avec les trois scénarios, soit une hausse de 8 %. Dès le court terme, le rayonnement équivaldrait au troisième quartile de la période de référence. D'ici 2100, il augmenterait autour de 53 000 cal/cm² avec le scénario RCP 8.5. L'augmentation serait de 11, 12 et 14 % avec les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5.

La variabilité interannuelle semblerait diminuer légèrement excepté à long terme avec le scénario RCP 2.6, au regard de l'écart interquartile et de l'étendue de la série statistique. Cet élément se confirme avec l'écart type de 5780 cal/cm² contre 4900 cal/cm² en période de référence.

Figure 143 : Evolution du rayonnement cumulé entre le 1^{er} avril et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



5.1.5. Augmentation du nombre de jours d'échauffage thermique

Sur la période 1976-2005, le nombre de jours d'échauffage thermique au seuil de 25 °C entre le 1^{er} mai et le 31 juillet s'élève à 9 jours avec les données SAFRAN et à 8 jours avec celles du scénario historique (**Figure 144**).

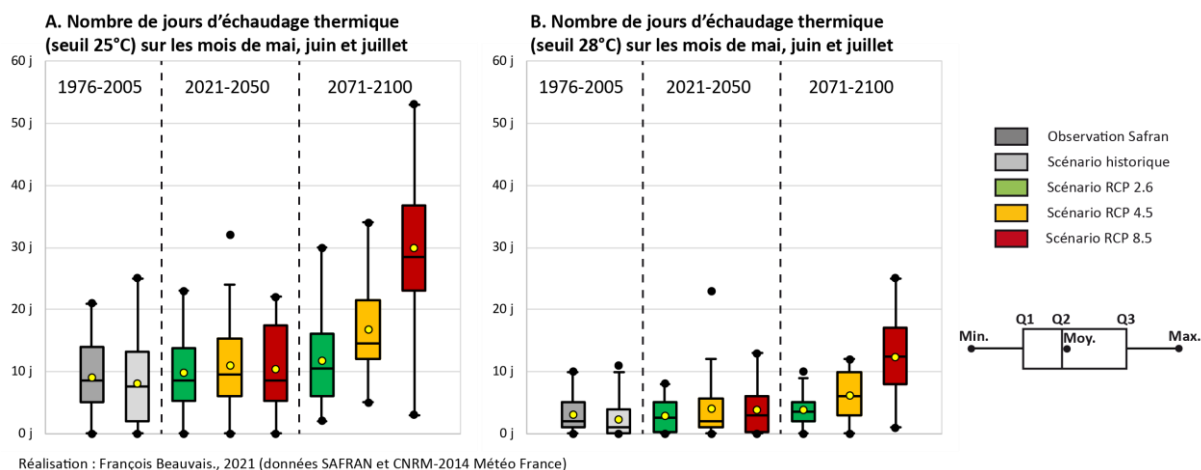
Sur la Normale 2021-2050, 10 jours sont calculés avec le scénario RCP 2.6 et 11 jours avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. L'augmentation serait alors de +2 à +3 jours. La variabilité resterait assez proche de celle observée sur la période de référence. Néanmoins, une année compterait 32 jours de chaleur avec le scénario RCP 4.5, soit 11 jours de plus qu'en 1976, année historique remarquable.

Sur la période 2071-2100, le cumul s'élève à 12, 17 et 30 jours avec les scénarios RCP 2.6, 4.5 et RCP 8.5. La variabilité des deux premiers scénarios est assez proche de celle du scénario historique (écart type de 7 jours) mais l'ensemble des valeurs des séries statistiques associées sont rehaussées. En revanche, le contraste est saisissant avec le scénario RCP 8.5. Le premier quartile de ce scénario est supérieur au troisième quartile du scénario RCP 4.5. Seulement les années du premier quartile correspondraient aux gammes de valeurs de la période de référence. La moyenne (30 jours) et la médiane (29 jours) seraient largement supérieures au nombre de jours de chaleur totalisés pour l'année 1976. En effet, 23 années compteraient davantage de jours échauffants qu'en 1976. L'extrême de 2071-2100 serait alors 2,5 fois plus élevé que celui que nous avons connu en période de référence.

L'échauffage thermique au seuil de 28 °C concerne 2,8 et 3,1 jours sur la période 1976-2005 avec les données SAFRAN et celles du scénario historique. A l'horizon 2050, il n'y a pas de changement significatif avec le scénario RCP 2.6. En revanche, le blé serait exposé en moyenne une journée de plus à cet aléa selon les deux autres scénarios RCP. D'ici la fin du siècle, le nombre de jours d'échauffage thermique au-delà du seuil de 28°C concernerait 4, 6 et 12 journées. Dans le cas de la réalisation du scénario le plus pessimiste, le nombre de jours de chaleurs au seuil de 28 °C en 2071-2100 serait supérieur au nombre de jours de chaleur recensés au seuil de 25 °C sur la période de

référence 1976-2005. La médiane et la moyenne seraient supérieures au maximum enregistré en référence.

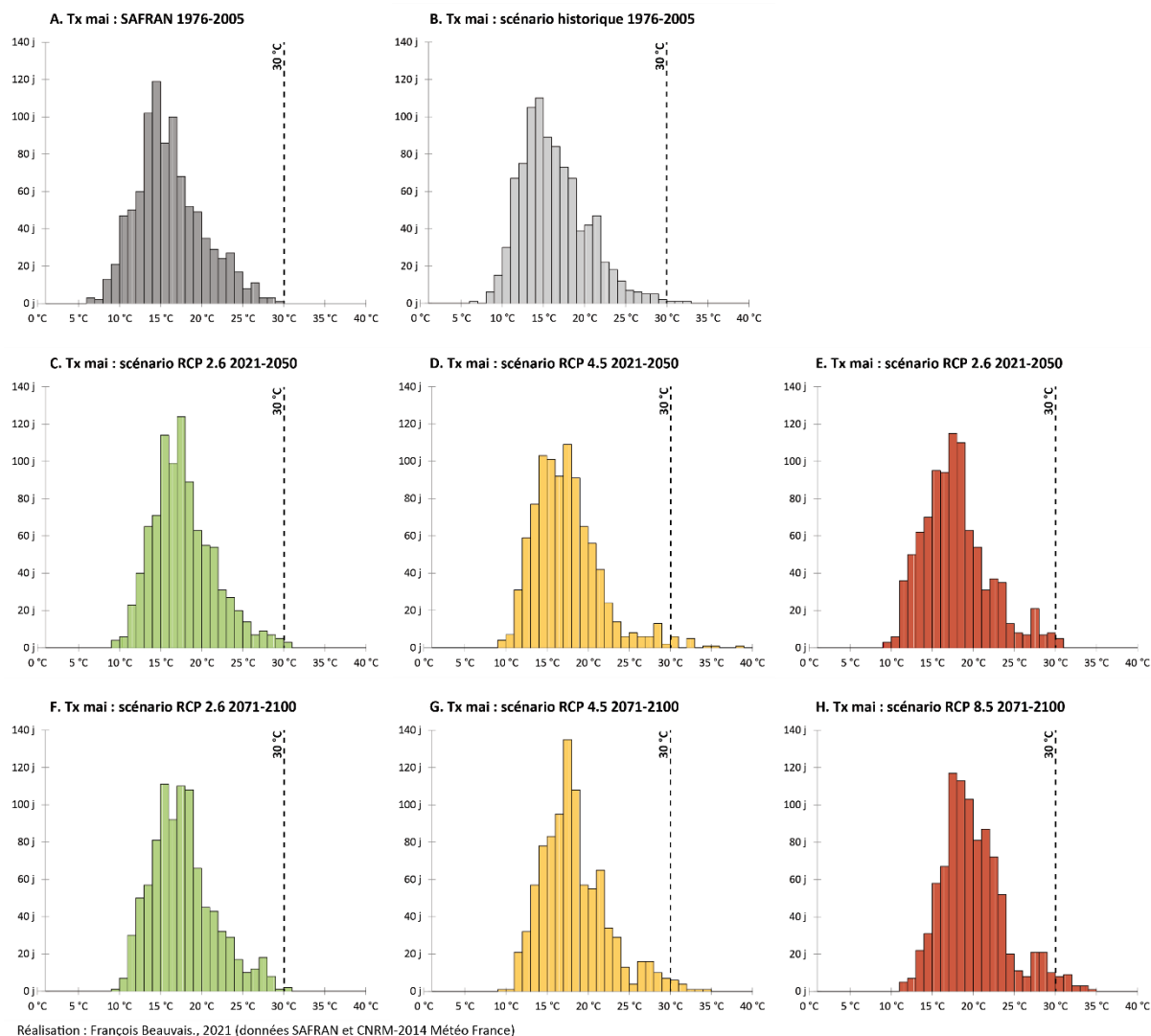
Figure 144 : Evolution des jours d'échaudage entre le 1^{er} mai et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



Les températures maximales supérieures à 30 °C peuvent affecter la fertilité du blé lorsqu'elles surviennent au moment de la méiose et de la floraison du blé. Bien que le scénario historique simule 5 occurrences sur la totalité de la période 1976-2005, ces températures ne sont pas observées au mois de mai à partir des données SAFRAN (**Figure 145**). Toutefois, elles sont survenues à 9 reprises au mois de juin et concernent 7 années de la chronique climatique avec au moins une occurrence. La température maximale absolue record atteinte est de 34 °C (**Figure 146**).

Les histogrammes montrent que l'atteinte de ce seuil de température resterait rare à l'horizon 2050. Trois journées à 30 °C sont simulées avec le scénario RCP 2.6 sur l'ensemble de la Normale 2021-2050 au mois de mai. Pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5, il s'agirait de 14 et 5 journées. Les températures maximales absolues records sur l'ensemble de la Normale seraient de 30 °C avec les scénarios RCP 2.6 et 8.5, tandis qu'elle s'élève à 38 °C pour le scénario RCP 4.5. En juin, 3 jours sont dénombrés avec le scénario RCP 2.6 pour une température maximale absolue record de 32 °C. Concernant les deux autres scénarios, 8 jours sont recensés avec une température maximale absolue record allant jusqu'à 34 °C.

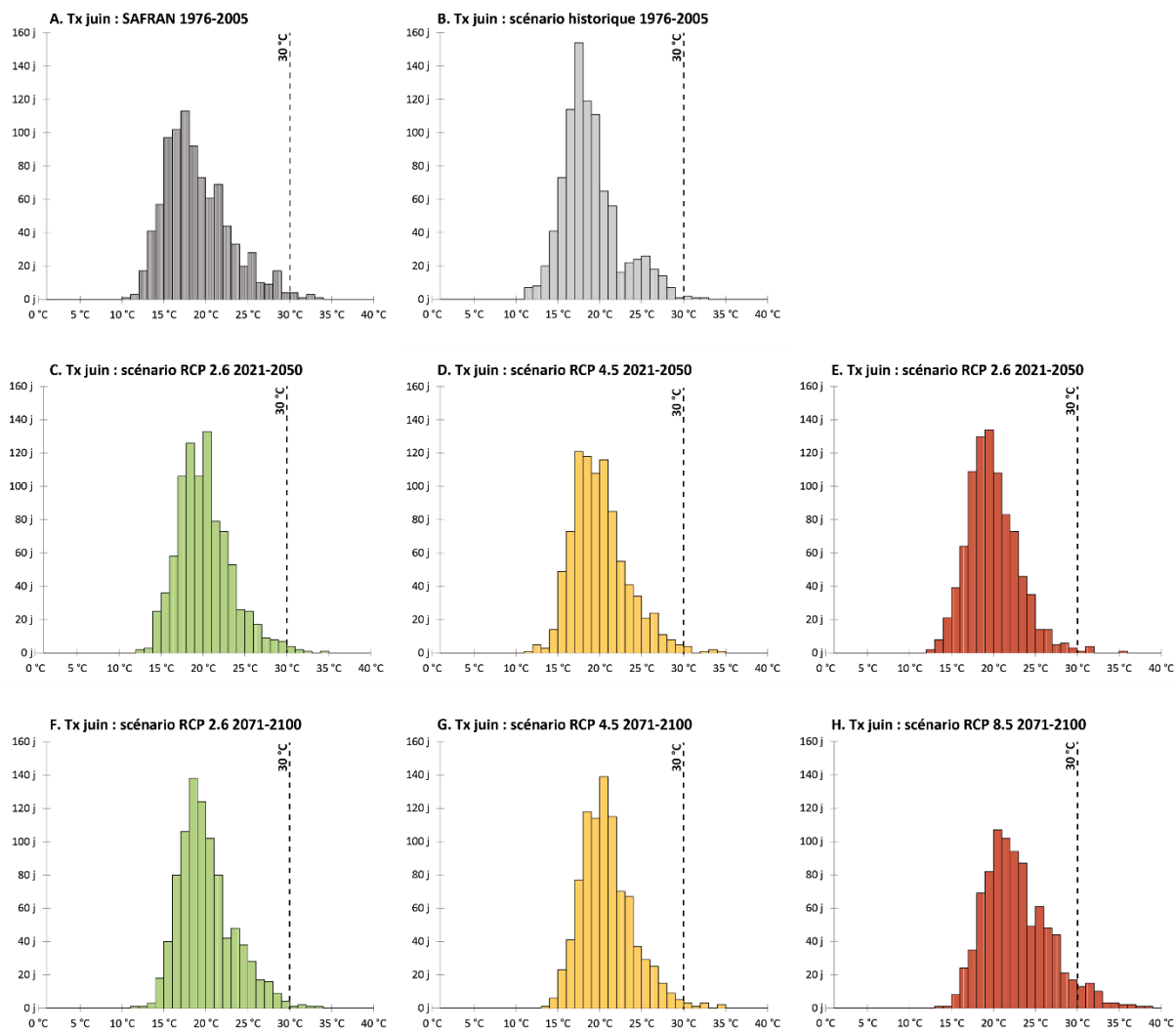
Figure 145 : Evolution de la fréquence des températures maximales au mois de mai en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP (totalité des Normales climatiques de 30 années)



A l'horizon 2100, seulement 5 et 6 jours sont concernés pour les mois de mai et de juin avec le scénario RCP 2.6 pour l'ensemble de la Normale. La plus forte température atteinte respectivement 33 et 35 °C. Avec le scénario RCP 4.5, 9 et 13 jours atteignent le seuil de 30 °C avec 34 °C de température maximale absolue record. Concernant le scénario RCP 8.5, 24 et 50 jours ont une température supérieure ou égale à 30 °C durant les mois de mai et de juin. La plus forte température simulée est de 34 °C pour le premier mois et de 38 °C pour le second. Un peu plus d'une année sur deux et d'une année sur trois rencontrerait au moins une occurrence de très forte température aux mois de mai et de juin (Figure 146).

Les journées de très fortes chaleurs pour ces deux mois de l'année resteraient rares mais deviendraient plus nombreuses (Tableau 34). La probabilité qu'elles coïncident avec les quelques jours précédant la floraison et la méiose est faible, toutefois le risque ne sera pas à négliger.

Figure 146 : Evolution de la fréquence des températures maximales au mois de juin en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP (totalité des Normales climatiques de 30 années)



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Tableau 34 : Evolution des fortes chaleurs (Tx 30) au cours des mois de mai et de juin aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP

		mai		juin	
		Nb d'années avec au moins 1 occurrence	Nbj max	Nb années avec au moins 1 occurrence	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	00/30a	0 j	07/30a	2 j
	Scénario historique	02/30a	2 j	03/30a	2 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	02/30a	6 j	04/30a	3 j
	Scénario RCP 4.5	04/30a	6 j	03/30a	6 j
	Scénario RCP 8.5	04/30a	2 j	02/30a	5 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	02/30a	1 j	03/30a	3 j
	Scénario RCP 4.5	06/30a	3 j	05/30a	3 j
	Scénario RCP 8.5	12/30a	4 j	17/30a	5 j

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

5.1.6. Augmentation du déficit hydrique et réduction des surplus hydrologiques

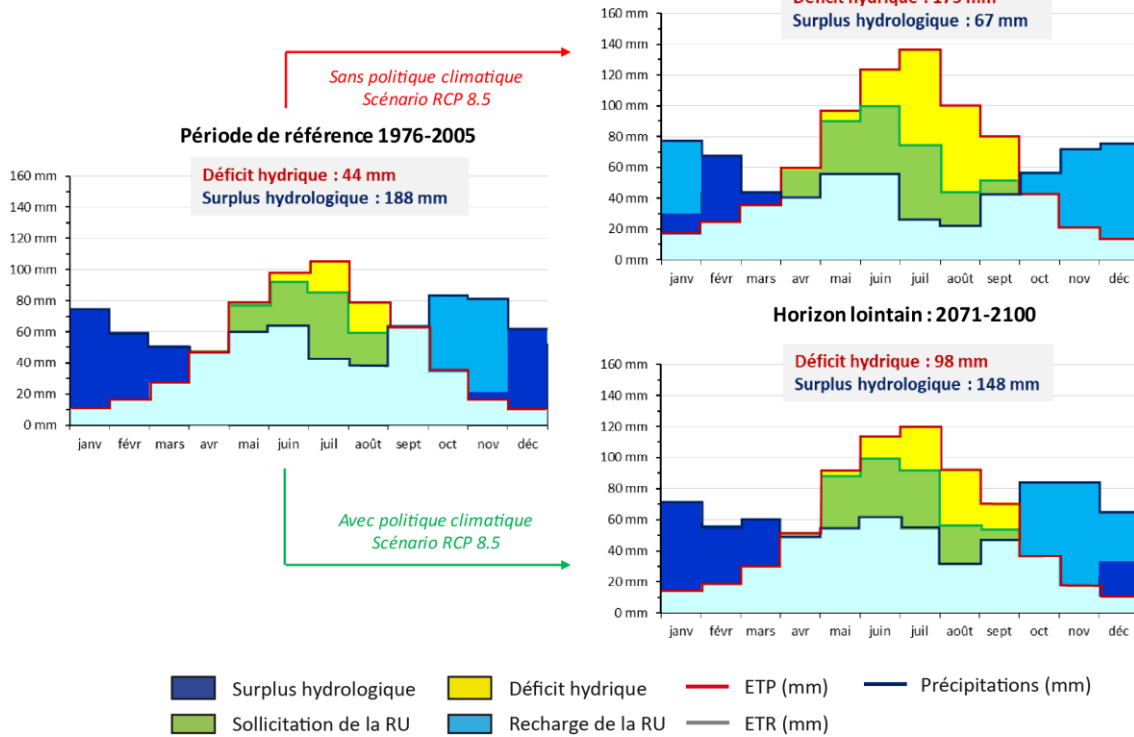
Nous avons vu précédemment que le contexte biopédoclimatique est contrasté entre le nord et le sud de la Plaine de Caen en raison d'une couverture pédologique inégale. En raison de l'épaisseur, de la texture et de la charge en éléments grossiers, le RUM de la partie septentrionale est d'environ 200 mm contre 30 mm dans la partie méridionale. En considérant une année moyenne, la végétation sur sol épais cumule 45 mm de déficit hydrique sur l'ensemble de l'année. La RUD peut encore être sollicitée par la plante jusqu'en été pour satisfaire ses besoins afin de combler le déficit pluvial. Sur sol mince, ce chiffre s'élève à 122 mm, soit un manque d'eau 2,7 fois plus important. La RUD s'épuise dès le printemps et la plante cumule ensuite le déficit hydrique puisque les précipitations sont insuffisantes pour satisfaire la demande évapotranspiratoire. Par conséquent, le blé manque d'eau dès sa montaison.

D'ici la fin du siècle, l'évapotranspiration devrait augmenter. A titre d'exemple, elle serait de 120 et 140 mm avec le scénario RCP 2.6 et 8.5, contre 100 mm en période de référence 1976-2005. Le déficit hydrique serait plus prononcé et apparaîtrait plus tôt dans la saison (**Figure 147**). La végétation du nord de la Plaine de Caen connaîtrait un manque d'eau de 98 mm avec le scénario RCP 2.6, soit une hausse de +53 mm (multiplication par 2). C'est-à-dire que les sécheresses seraient plus prononcées même dans le cas d'une réduction des émissions de GES. Avec le scénario RCP 8.5, le déficit hydrique s'élève à 175 mm, ce qui correspond à une hausse de +130 mm (multiplication par 3). Sans réduction des émissions de GES, les cultures de la Plaine septentrionale subiraient un manque d'eau supérieur à celui du sud de Caen actuellement. Pour les petits sols de la partie méridionale, ce déficit hydrique s'élèverait à 211 et 316 mm pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (multiplication par 1,7 et 2,5).

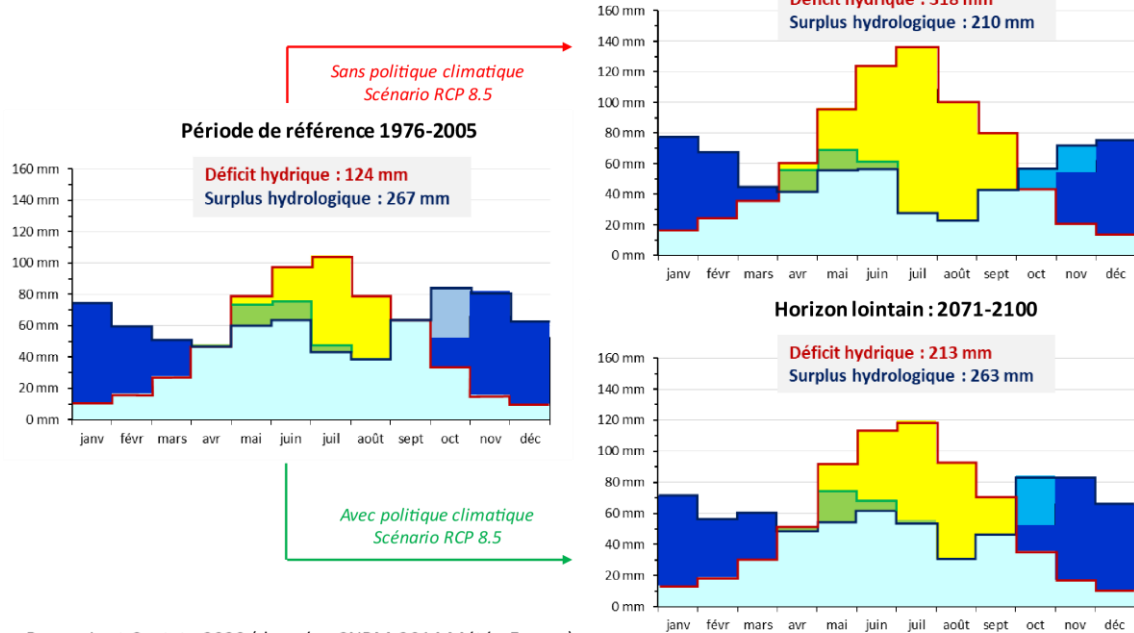
Le bilan hydrique permet également d'analyser les surplus hydrologiques. Le sol profond mettant plus de temps à se recharger en eau à l'automne, ces surplus sont plus faibles (188 mm) que sur le sol mince (265 mm). Cet excédent en eau diminuerait à l'horizon 2100 en raison d'une recharge plus tardive de la RUD. Dans le cas du scénario RCP 8.5, pour le sol profond, les surplus apparaissent en janvier contre fin octobre en période de référence.

Figure 147 : Evolution du contexte biopédoclimatique à l'horizon 2100 en Plaine de Caen selon 2 scénarios RCP

A. RUM 219 mm (Plaine de Caen nord)



B. RUM 32 mm (Plaine de Caen sud)



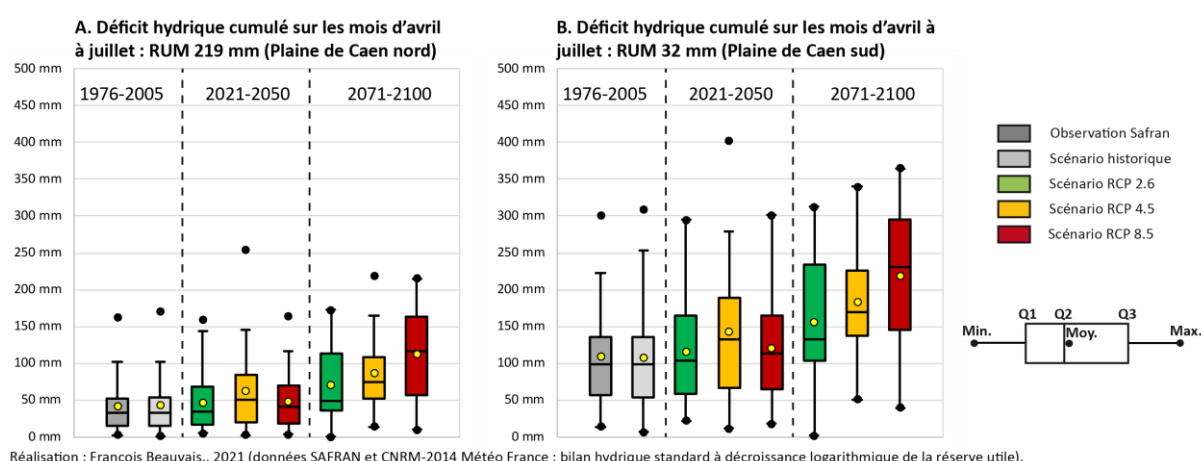
Beauvais et Cantat., 2020 (données CNRM-2014 Météo France)

En s'intéressant plus précisément à la période du calendrier comprise entre le 1^{er} avril et le 31 juillet, correspondant aux périodes de montaison et de remplissage des grains, le déficit hydrique sur la période de référence 1976-2005 est respectivement de 40 et 110 mm¹⁰⁷ pour les sols épais du nord de la Plaine et les sols squelettiques du sud (**Figure 148**). Ce manque d'eau est présent chaque année, même s'il est parfois très faible dans la partie septentrionale (5 années avec moins de 10 mm de déficit entre avril et juillet). Lors de la grande sécheresse pédologique de 1976, le déficit hydrique cumulé sur ces 4 mois atteignait respectivement 163 et 300 mm pour les deux entités.

Sur la Normale 2021-2050, le manque d'eau atteint près de 50 mm avec les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 au nord de Caen. Au sud, il s'élève à près de 120 mm. La variabilité interannuelle est un peu plus prononcée et le déficit hydrique équivalent à 1976 pourrait se reproduire de nouveau. C'est le scénario intermédiaire (RCP 4.5) qui engendre le manque d'eau le plus important avec un peu plus de 60 et 140 mm pour les deux parties géographiques respectives. 29 années se trouvent dans les gammes de valeurs de l'étendue statistique de la période de référence. Cependant une année extrême est constatée où le déficit hydrique pourrait atteindre jusqu'à 253 et 400 mm au nord et au sud de Caen, soit une sécheresse pédologique 50 et 30 % plus intense qu'en 1976.

Sur la Normale 2071-2100, le manque d'eau associé au scénario RCP 2.6 serait de 70 et 155 mm pour les deux zones géographiques, soit une augmentation respective de 65 et 45 % par rapport à la période de référence 1976-2005. Le déficit hydrique le plus fort de la Normale dépasse légèrement le seuil de 1976. Avec le scénario RCP 4.5, le manque d'eau atteint environ 90 et 180 mm pour les deux types de sols, ce qui correspond à une hausse de 105 et 72 % par rapport à la période de référence 1976-2005. Avec le scénario RCP 8.5, le déficit hydrique est de 110 et 220 mm, soit une augmentation de 163 et 105 %. La médiane de la série statistique du scénario RCP 4.5 serait supérieure au troisième quartile de la période de référence. Le troisième quartile du scénario RCP 8.5 correspond au maximum de la période de référence. En effet, une année sur quatre connaîtrait une sécheresse plus intense que celle de 1976.

Figure 148 : Evolution du déficit hydrique le 1^{er} avril et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



¹⁰⁷ Il s'agit ici des valeurs moyennes calculées annuellement au pas de temps mensuel. Elles ne doivent pas être comparées à celles du contexte biopédologique calculées à partir des moyennes mensuelles de l'ETP et des précipitations de la Normale climatique.

5.1.7. Absence d'évolution significative des jours de fortes précipitations

Presque tous les ans, la plage du calendrier comprise entre le 1^{er} juin et le 31 juillet connaît au moins une journée où les précipitations journalières sont supérieures ou égales à 10 mm sur la période de référence 1976-2005 (**Tableau 35**). Cela concerne en moyenne un peu plus de 2 jours pour ces 2 mois de l'année. Le scénario historique simule jusqu'à 8 jours pour l'année cumulant le plus cet aléa. A l'horizon 2050, il n'y a pas d'évolution significative, malgré une légère augmentation de la moyenne pour le scénario RCP 8.5. Il en va de même à l'horizon 2100 sauf que c'est le scénario RCP 2.6 qui simulerait une légère hausse. Les fortes pluies supérieures ou égales à 20 mm/j sont plus rares, environ 1 année sur 3 est concernée en période de référence. D'ici la moitié et la fin du siècle, aucune tendance significative se dégage. Ces fortes pluies pouvant engendrer la verse du blé resteraient exceptionnelles. Une légère baisse est constatée avec le scénario RCP 4.5.

Tableau 35 : Evolution des fortes précipitations au cours des mois de juin et de juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP

		Nb années avec au moins 1 occurrence	Moyenne	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	26/30a	2,3 j	6 j
	Scénario historique	27/30a	2,4 j	8 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	26/30a	2,5 j	5 j
	Scénario RCP 4.5	24/30a	2,5 j	7 j
	Scénario RCP 8.5	26/30a	2,8 j	6 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	28/30a	3,2 j	9 j
	Scénario RCP 4.5	28/30a	2,5 j	6 j
	Scénario RCP 8.5	26/30a	2,3 j	6 j

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

5.1.8. Hausse des jours disponibles pour la moisson

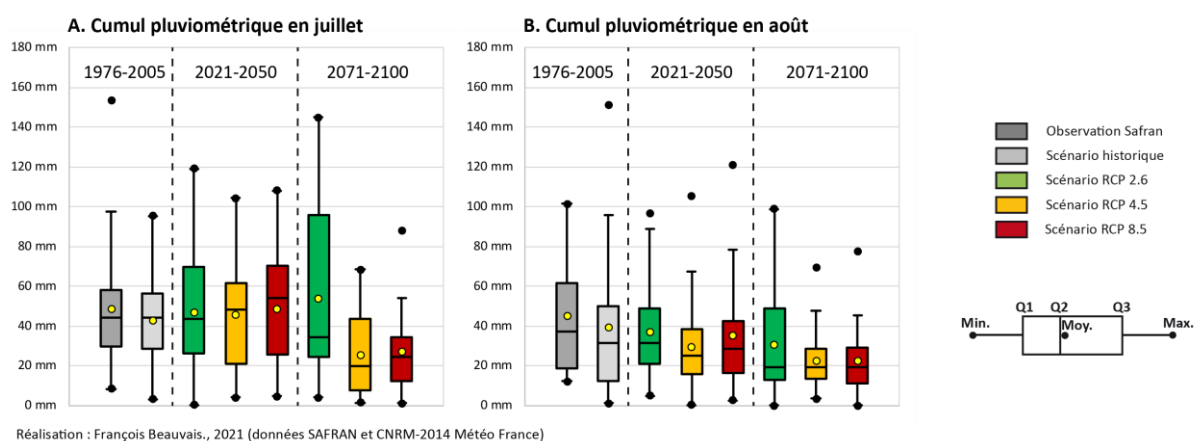
Sur la période 1976-2005, il pleut en moyenne une quarantaine de mm pour chacun des deux mois de juillet et d'août. Les mois les plus humides peuvent être supérieur à 80 mm, les plus secs enregistrent moins de 20 mm (**Figure 149**).

D'ici 2050, le cumul pluviométrique moyen en juillet augmenterait de 10 % pour les trois scénarios par rapport à la période de référence (scénario historique). En août, il serait stabilisé avec le scénario RCP 2.6 tandis qu'il diminuerait de -10 et -20 % avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

A long terme, les précipitations seraient en hausse de +30 % avec le scénario RCP 2.6 en juillet. Mais elles chuteraient de -40 % avec les deux autres scénarios. En août, elles baissent de - 20 % avec le scénario RCP 2.6 et de -40 % avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

La variabilité interannuelle des mois de juillet augmente dans le futur proche. Trois mois de juillet enregistreraient plus de 80 mm de pluviométrie. Ce constat est encore plus flagrant à long terme dans le cas du scénario RCP 2.6 avec 6 années où le cumul de ce mois est inférieur à 20 mm et 9 années où il est supérieur à 80 mm (dont 6 au-delà de 100 mm). En revanche, ce n'est pas le cas avec les deux autres scénarios, en témoigne le troisième quartile de leur série statistique, inférieur à la médiane de celle de la période de référence. En août, la variabilité interannuelle reste équivalente de celle de la période de référence pour le scénario RCP 2.6. Avec les deux autres scénarios elle est réduite malgré deux années extrêmes se détachant des moustaches des diagrammes en boîtes sur la Normale 2021-2050.

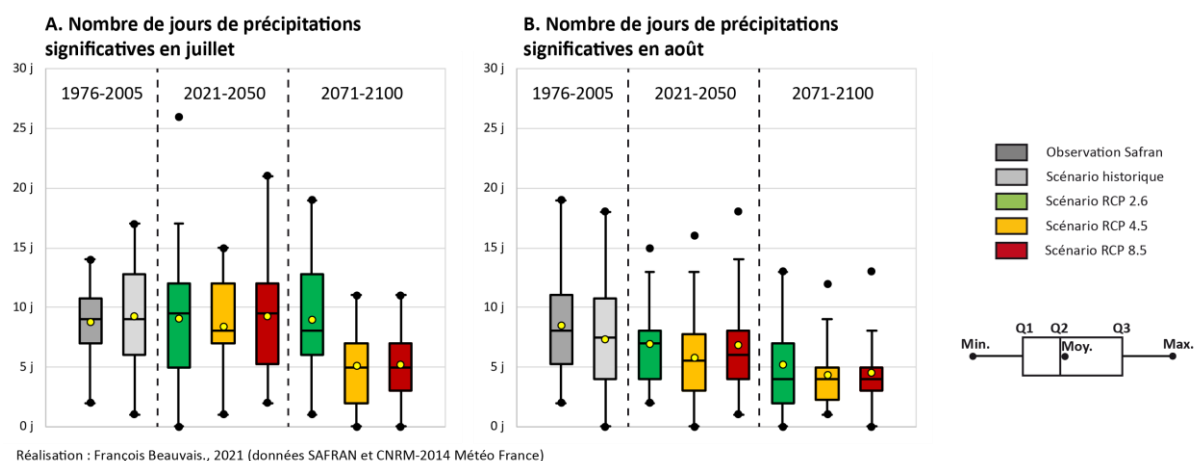
Figure 149 : Evolution du cumul pluviométrique des mois de juillet d'août en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



Sur la période de référence 1976-2005, 9 jours de précipitations significatives sont observés au mois de juillet avec les données observées et simulées (**Figure 150 A**). En août il s'agit de 8 et 7 jours (**Figure 150 B**). Par conséquent, ces deux mois d'été disposent d'environ 45 jours sans pluie. Les étés pluvieux peuvent enregistrer jusqu'à 14 jours (1988, 1999 et 2000) et 19 jours (1994) de précipitations en juillet et en août, tandis que le moins arrosé engendre jusqu'à 29 jours secs pour chacun de ces deux mois (année 1979 pour juillet et 1981 pour août).

Sur la Normale 2021-2050, le nombre de jours de pluie n'évolue pas sur ces deux mois à l'exception du scénario RCP 4.5 avec respectivement 1 et 2 jours secs supplémentaires en juillet et en août. D'ici 2100, le scénario RCP 2.6 présente un nombre de jours de pluie équivalent à la période de référence pour le mois de juillet. En revanche, une réduction de 4 jours est constatée avec les deux autres scénarios. En août, il y aurait une baisse de 2 jours de pluie avec le scénario RCP 2.6 et de 3 jours avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. La variabilité interannuelle serait plus prononcée en juillet à court terme avec les scénarios RCP 2.6 et 8.5, avec certains étés où plus de la moitié du mois serait pluvieux. Il en va de même à long terme avec le scénario RCP 8.5. Néanmoins, avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5, elle serait réduite et les étés les plus arrosés ne dépasseraient pas 11 jours de pluie. Au contraire, en août, la variabilité serait réduite dès le court terme.

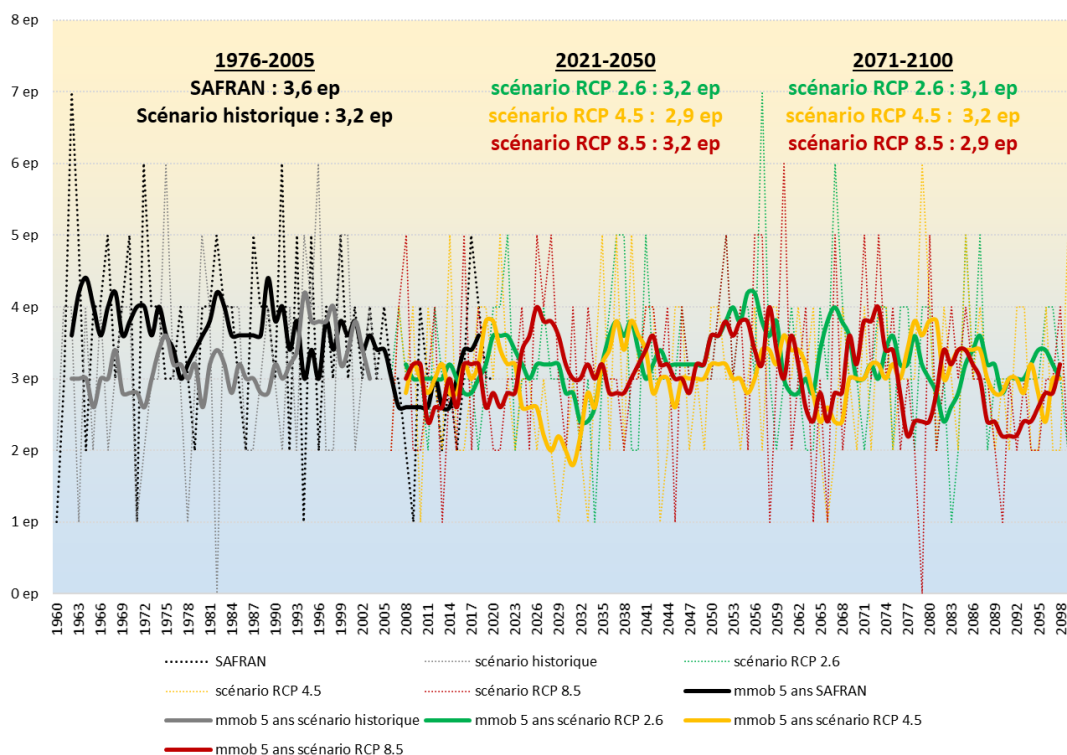
Figure 150 : Evolution du nombre de jours de pluies significatives au cours des mois de juillet d'août en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



Plusieurs jours secs consécutifs sont favorables aux moissons. Ils permettent au blé de ne pas rester dans des conditions trop humides. Si le taux d'humidité des grains est supérieur à 15 %, ils ne peuvent être commercialisés en raison du risque de développement des mycotoxines qui dégradent leur qualité sanitaire. Dans ce cas les récoltes doivent être séchées en silo ce qui engendre des pénalités économiques pour l'agriculteur.

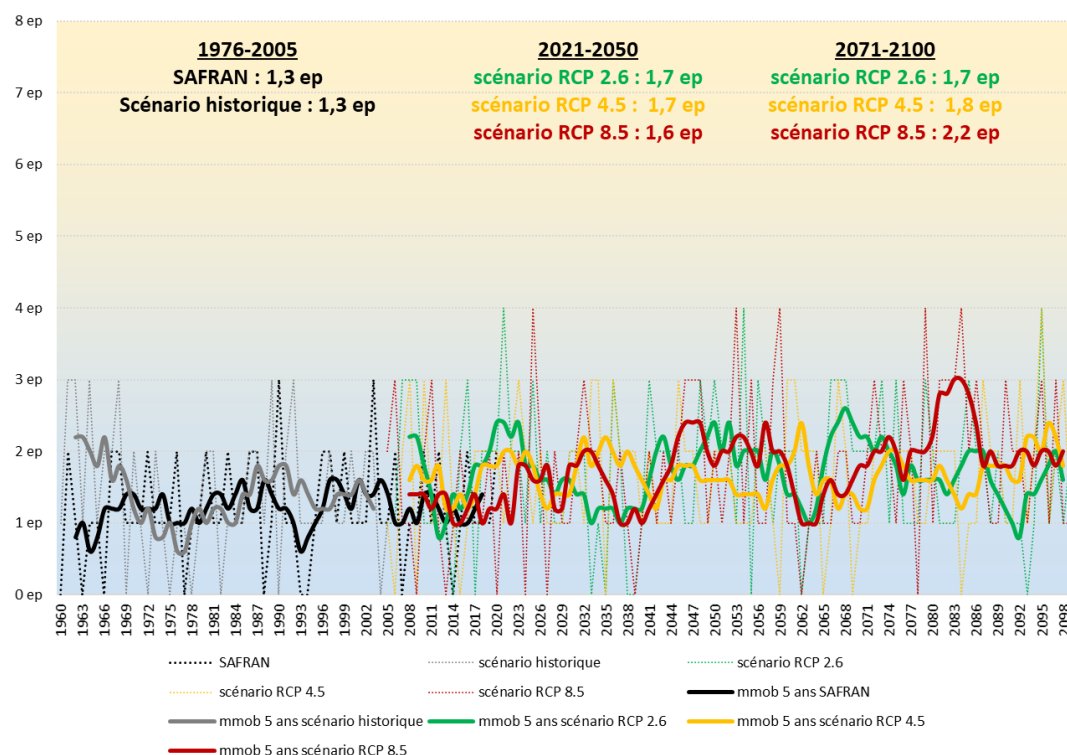
Sur la période de référence 1976-2005, les mois de juillet et d'août comptent environ 3 épisodes comportant au moins 5 jours secs (**Figure 151**). Cette comptabilité reste inchangée aux horizons 2050 et 2100. En revanche, les phases plus longues, comportant au moins 10 jours consécutifs sans pluies significatives augmenteraient très légèrement, principalement avec le scénario RCP 8.5 à long terme (**Figure 152**).

Figure 151 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 5 jours secs consécutifs entre le 1^{er} juillet et le 31 août de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Figure 152 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 10 jours secs consécutifs entre le 1^{er} juillet et le 31 août de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

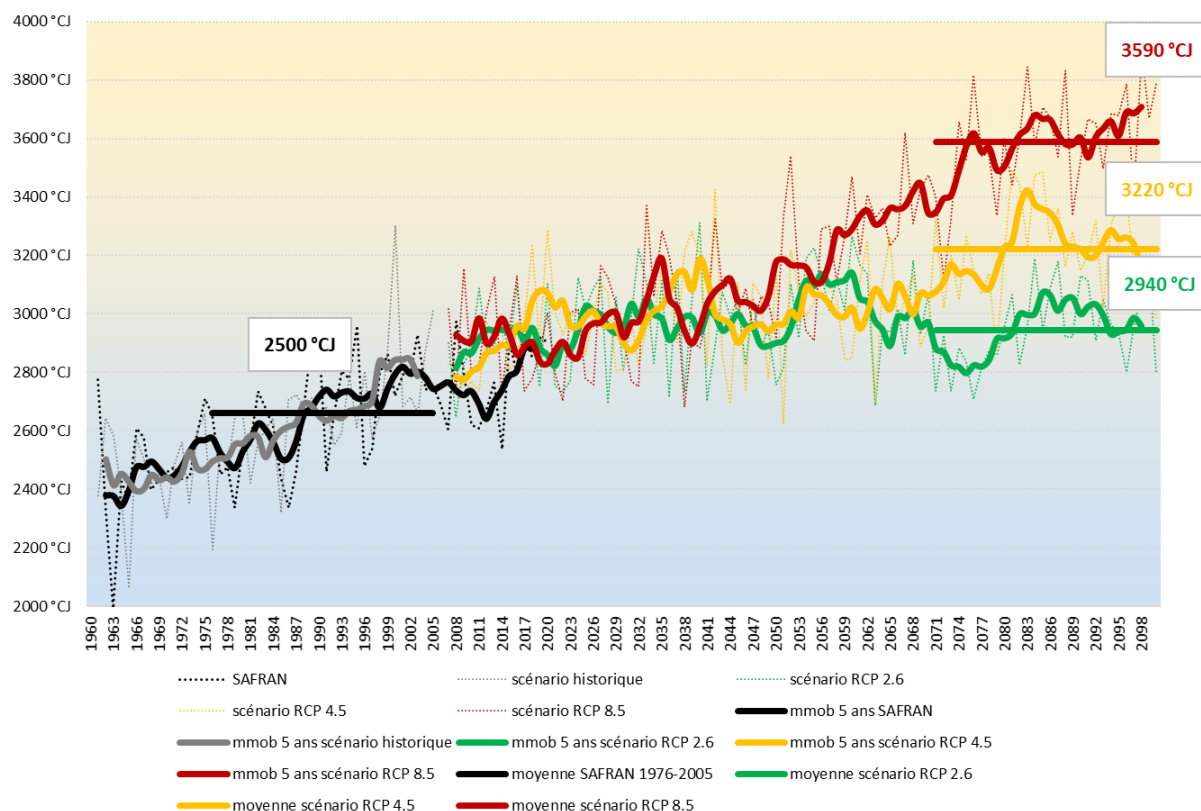
5.2.9. Augmentation des sommes de températures

Sur la période de référence 1976-2005, le blé dispose en moyenne de 2 500 °C (**Figure 153**). Lors des années les plus chaudes, la somme de température peut être supérieure à 2 800 °CJ tandis qu'elle est inférieure à 2 400 °CJ pour les années les plus fraîches. Toutefois ces valeurs ont largement été dépassées sur la période 1961-2020. A titre d'exemple l'hiver 1963 a engendré un retard si important que le cumul des températures n'a atteint que 2000 °CJ au 31 juillet. A contrario en 2019 et en 2020 la somme de température atteint 2 900 °CJ. D'ailleurs, une des conséquences du réchauffement contemporain conduit à un cumul moyen de 2800 °CJ sur les 10 dernières années.

Sur la normale 2021-2050, la somme de températures est d'environ 2900 °CJ pour les 3 scénarios RCP. Par conséquent l'avancée inédite de la végétation lors de ces deux dernières années donne une idée de celle attendue pour la moitié du siècle. Néanmoins, en raison de la variabilité interannuelle, les sommes de températures pourraient parfois être supérieures à 3200 °CJ.

C'est autour des années 2060 que les trajectoires se différencient entre les scénarios RCP. Il s'agit ici d'une réponse à la réduction et à la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre respectivement pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5. Avec le scénario RCP 8.5, les sommes de températures continuent de croître en raison d'une intensification de l'effet de serre. Sur la Normale 2071-2100, les sommes de températures équivaldraient à celles simulées pour 2050 dans le cas du scénario optimiste. Avec le scénario intermédiaire, elles seraient de l'ordre de 3 200 °CJ. Avec le plus pessimiste, ce cumul de températures atteindrait près de 3 600 °CJ. Certaines années la barre des 3 800 °CJ serait même franchie. Par conséquent, l'augmentation des sommes de températures laisse supposer une avancée plus ou moins importante des stades phénologiques pour la végétation d'ici 2100.

Figure 153 : Evolution de la somme de température entre le 1^{er} novembre et le 31 juillet en Plaine de Caen de 1961 à 2100 à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 selon trois scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Finalement, les tendances observées avec les indicateurs agroclimatiques sur la période 1961-2020 se confirment. Les grandes évolutions s’observent surtout à long terme et sont plus ou moins renforcées selon les scénarios RCP. Les fortes gelées lors du tallage et les basses températures lors de la méiose diminueraient, voire disparaîtraient avec le scénario RCP 8.5. Néanmoins, dans le cas des scénarios RCP 2.6 et 4.5, la levée pourrait encore être soumise à l’aléa gélif. Conséquence de l’élévation de la température hivernale, le nombre de jours disponibles pour la vernalisation diminuerait avec les deux scénarios les plus pessimistes. Le déficit hydrique apparaîtrait plus tôt dans la saison et devrait sensiblement augmenter, et ce, même dans le cas du scénario RCP 2.6. L’échaudage thermique serait plus récurrent avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. En effet, le nombre de jours de chaleur serait multiplié par quatre. La hausse est en revanche beaucoup moins prononcée avec le scénario optimiste. Les températures extrêmes, au-delà de 30 °C, resteraient rares en mai et en juin mais elles augmenteraient tout de même. Le rayonnement disponible, favorable à la croissance de la plante, devrait augmenter pendant la période de montaison et de remplissage des grains. Il n’y a pas de tendance significative quant à l’évolution des jours de fortes précipitations pouvant engendrer la verse physiologique du blé. Les conditions agroclimatiques pour les travaux de semis et de récoltes pourraient s’avérer être un peu plus favorables.

Dans l’ensemble, le bilan est négatif pour la culture du blé même si certains stress reculent, tels que les gelées ou le manque de rayonnement. Cependant, les fortes chaleurs pourraient stopper le remplissage des grains. Bien que la concomitance entre excès thermique plus récurrent et déroulement des stades méiose et floraison au même moment resterait rare, le risque d’impact sur

la fertilité du blé est plus important. La hausse du déficit hydrique limiterait la croissance de la plante de même que sa photosynthèse. En refermant ses stomates, elle ne pourrait finalement pas profiter de la hausse du rayonnement. Le contexte biopédoclimatique du nord de la Plaine répondrait mieux au changement climatique que celui du sud. Toutefois, les sols épais de la première entité géographique seraient tout de même exposés à des situations délicates. En effet, dans le cas du scénario le plus pessimiste, son déficit hydrique serait supérieur à celui de la seconde entité en période de référence. Or le manque d'eau actuel dans la partie méridionale explique en grande partie un écart de 30 q/ha à la récolte par rapport aux rendements de la zone septentrionale. L'ensemble de ces évolutions sont présentées dans le **Tableau 36** de synthèse.

Toutefois, l'augmentation des sommes de températures pourrait engendrer une réduction de la durée des cycles végétatifs de la plante. Par conséquent, les résultats exposés à partir de ces indicateurs calculés pour des dates invariantes pourraient être remis en cause par une approche couplant phénologie et exposition aux aléas.

Tableau 36 : Synthèse de l'exposition du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 à partir d'une approche agroclimatique

Aléa	Périodes	Conséquence associée	Safran 1976-2005		RCP 2.6 2021-2050			RCP 4.5 2021-2050			RCP 8.5 2021-2050		
			Scé hist 1976-2005										
Pluviométrie	1er octobre - 31 décembre	Accès à la parcelle et conditions de semis difficiles	++	++	++	++	++	++	+	+	+		
Surplus hydrologique RUM 219 mm	1er octobre - 31 décembre	Accès à la parcelle et conditions de semis difficiles	++	++	++	++	++	++	+	+	+		
Surplus hydrologique RUM 34 mm	1er octobre - 31 décembre	Accès à la parcelle et conditions de semis difficiles	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++		
Déficit de vernalisation	1er décembre - 31 mars	Le blé ne passe pas à l'état reproducteur			+	+	+	+	++	+++			
Déficit hydrique RUM 219 mm	1er avril - 31 juillet	Réduction de la photosynthèse et de l'assimilation du CO2 ; impact sur le remplissage des grains	+	+	+	+	+	+	+++	+++			
Déficit hydrique RUM 34 mm	1er avril - 31 juillet		+++	+++	+++	+++	+++	+++	++++	++++			
Echaudage thermique	1er mai - 31 juillet	Arrêt du remplissage des grains	+	+	+	+	++	+	++	++++			
Excès thermiques méiose et floraison	mai et juin	Stérilité		+	+	+	+	+	+	++			
Basses températures méiose	mai	Déficit de fécondation	++	+	+	+	+	+					
Gelées levée	décembre	Disparition de plantes	+	+	+	+	+	+	+				
Gelées tallage	janvier et février	Nécroses foliaires	+	+		+	+						
Déficit de rayonnement (montaison et remplissage des grains)	1er avril - 31 juillet	Impact sur la croissance et baisse du nombre d'épis/m²	+	+									
Fortes précipitations remplissage	1er juin - 31 juillet	Risque de verse physiologique	+	+	+	+	+	+	+	++			
Précipitations estivales	1er juillet - 31 août	Humidité des grains et retard de la récolte	++	++	++	++	++	++	+	+			

Légende : exposition faible (+) ; exposition moyenne (++) ; exposition forte (+++) ; l'absence de signe signifie que l'aléa est inexistant ou très faible.
 Exposition du blé tendre d'hiver aux aléas climatiques déterminée par approche experte d'après les résultats tirés de l'approche par indicateurs agroclimatiques.
 Réalisation : François Beauvais (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France).

Conclusion du chapitre 5

Le climat en Plaine de Caen a évolué au cours des saisons caractéristiques des périodes phénologiques du blé tendre d'hiver entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020. Les printemps et les étés plus chauds ont engendré 6 jours d'échaudage thermique supplémentaires entre le 1^{er} mai et le 31 juillet, période qui correspond à la formation des grains et à leur remplissage. Les précipitations entre le 1^{er} avril et le 31 juillet ont légèrement augmenté, mais elles ne permettent pas de compenser la hausse de l'évapotranspiration. En conséquence, le déficit hydrique est désormais de 58 mm pour le blé cultivé sur un sol épais du nord de Caen et de 134 mm pour un sol mince du sud de Caen (calculé avec ETP Penman-Monteith), alors que ces valeurs étaient respectivement de 41 et 104 mm sur la première Normale climatique. La montaison et le remplissage des grains connaissent donc des conditions biopédoclimatiques moins favorables, constat surtout pénalisant pour la Plaine méridionale. En contrepartie, ces deux grandes périodes phénologiques disposent d'une augmentation du rayonnement cumulé moyen de +15 et +7 %.

Ces tendances devraient se poursuivre dans les prochaines décennies. Une réduction des émissions de gaz à effet de serre permettrait de limiter ces effets. Néanmoins, des évolutions importantes seraient constatées dans le cas où la croissance économique reposerait toujours sur les énergies fossiles. Le nombre de jours d'échaudage thermique exploserait d'ici la fin du siècle. Les trois derniers mois du cycle en cumuleraient en moyenne 30 jours d'ici la fin du siècle, soit davantage que les records de la période actuelle (24 jours en 2006 et 2018). L'année moyenne sur la Normale 2071-2100 serait alors plus défavorable que les extrêmes connus jusqu'à présent. Le déficit hydrique entre le 1^{er} avril et le 31 juillet pour un sol épais du nord de Caen serait équivalent à celui connu pour un sol mince du sud de Caen en période de référence (100 mm avec ETP Turc). Sur ces sols squelettiques, le manque d'eau atteindrait plus de 200 mm. Une année sur quatre connaîtrait un déficit hydrique supérieur à celui rencontré lors de la Grande sécheresse de 1976. Le rayonnement disponible augmenterait de +15 % pour les mois d'avril et mai (montaison) et de +7 % pour les mois de juin et de juillet (remplissage des grains). Les fortes gelées en janvier et en février, pouvant affecter le tallage en hiver, ainsi que les basses températures durant le mois de mai pour la méiose devraient diminuer drastiquement, voire disparaître.

Que ce soit sur la période historique ou future, l'interprétation de l'évolution des indicateurs agroclimatiques dresse un constat alarmant pour la céréaliculture caennaise. Toutefois, l'augmentation des températures pourrait réduire la durée des cycles végétatifs de la plante, et de fait modifier leur exposition aux aléas climatiques. Une méthode de calcul des indicateurs climatiques sur les dates d'apparition des périodes phénologiques apparaît alors essentielle pour connaître les aléas que la plante pourrait réellement rencontrer.

Chapitre 6

Evolution phéno-climatiques du blé tendre de 1961 à 2100

Introduction

Le réchauffement climatique tend à avancer les périodes phénologiques dans le calendrier. Toutefois, les dates d'apparition des stades phénologiques varient chaque année en fonction des conditions météorologiques rencontrées. Il est ainsi commun de constater que dans un contexte globalement plus précoce, certaines années la végétation est très en avance tandis que pour d'autres elle est en retard. On suppose alors que la variabilité interannuelle de date d'apparition et de durée des cycles végétatifs, ainsi que leur raccourcissement dans le futur puissent modifier l'exposition aux aléas climatiques. Pour s'approcher au plus des conditions vécues par la plante, il convient alors de calculer les indicateurs climatiques sur les dates auxquelles les périodes phénologiques de la plante se déroulent. C'est ce qui différencie fondamentalement l'approche phéno-climatique de l'approche agroclimatique classique, présentée dans le chapitre précédent.

Dans ce but, les sommes de températures du mélange variétal de précocité intermédiaire observé au champ (Anguerny année 2018-2019 – semis le 15 novembre) sont mobilisées avec un critère de photopériode et d'alternativité. Les indicateurs climatiques sont calculés pour chaque année sur les dates auxquelles les périodes phénologiques de la plante se déroulent.

Figure 154 : Parcelle de blé tendre à Fontaine-Henry le 20 juillet 2019



6.1. Quelles évolutions phénoclimatiques sur la période 1961-2020 ?

Cette sous partie vise à estimer l'évolution du potentiel bioclimatique du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen sur la période 1961-2020. Le cycle du blé relatif au mélange variétal d'Anguerny est rejoué de façon théorique (analyse rétrospective). Il s'agit de retrouver les conditions vécues par la plante si elle avait été semée chaque année depuis 1961 à la même date (15 novembre).

6.1.1. Réduction de la durée du cycle et anticipation des stades phénologiques dans le calendrier

Le blé met 22 jours pour lever sur la période 1961-1990 et 21 jours sur la période 1991-2020. L'anticipation n'est que d'une journée. Le temps nécessaire à la levée est trop court pour exprimer le réchauffement, contrairement aux phases plus longues. Le début-tallage apparaît désormais six jours plus tôt, fin décembre contre début janvier auparavant. Six jours, c'est également ce qui correspond à la réduction de la durée du tallage. En conséquence, la montaison du blé débute plus tôt, puisque le stade épi 1 cm est avancé de 12 jours (MK significatif).

Outre le cumul de température, la satisfaction des besoins en vernalisation et de photopériode agit sur la phénologie du blé. L'exigence en vernalisation de ces plants de blé est de 45 jours. Le nombre de jours où la température moyenne est comprise entre 3 et 10°C est largement supérieure à ce seuil entre la levée et le stade épi 1 cm (cf. sous partie vernalisation). Par conséquent, le cycle végétatif n'est pas impacté par un retard de la montaison. Le cumul de température pour l'apparition du stade épi 1 cm est atteint après la période critique de durée d'éclairement de 11h. De ce fait, la photopériode n'agit pas sur la date d'apparition de la montaison. Toutefois, il convient de préciser que dans le cas d'un semis plus précoce, le besoin en température peut être atteint avant le seuil photopériodique qui correspond au 7 mars à la latitude caennaise. Admettons un semis le 25 octobre, les hivers doux de 2007, 2014 et 2020 provoquent un stade épi 1 cm le 7 mars lorsque la durée du jour est suffisante car le besoin en température est largement satisfait à cette date. Si les simulations étaient effectuées pour des variétés précoces, cette situation serait observée de façon plus récurrente, d'autant plus que de nombreuses variétés au cycle court sont insensibles à la durée du jour. Les exploitants agricoles confirment ce constat, observant pour ce type de cultivars une montaison dès le mois de février lorsque les hivers sont doux.

La durée de la montaison, d'une quarantaine de jours est similaire entre les deux Normales climatiques. Cela s'explique par le fait qu'elle débute plus tôt et n'est donc pas exposée à des températures plus élevées qu'auparavant (**Tableau 37**). Ce constat est également établi pour le remplissage des grains. D'une soixantaine de jours, sa durée n'est raccourcie que de deux jours.

Tableau 37 : Température moyenne en °C au cours des principales périodes phénologiques du blé tendre d’hiver entre 1961-1990 et 1991-2020

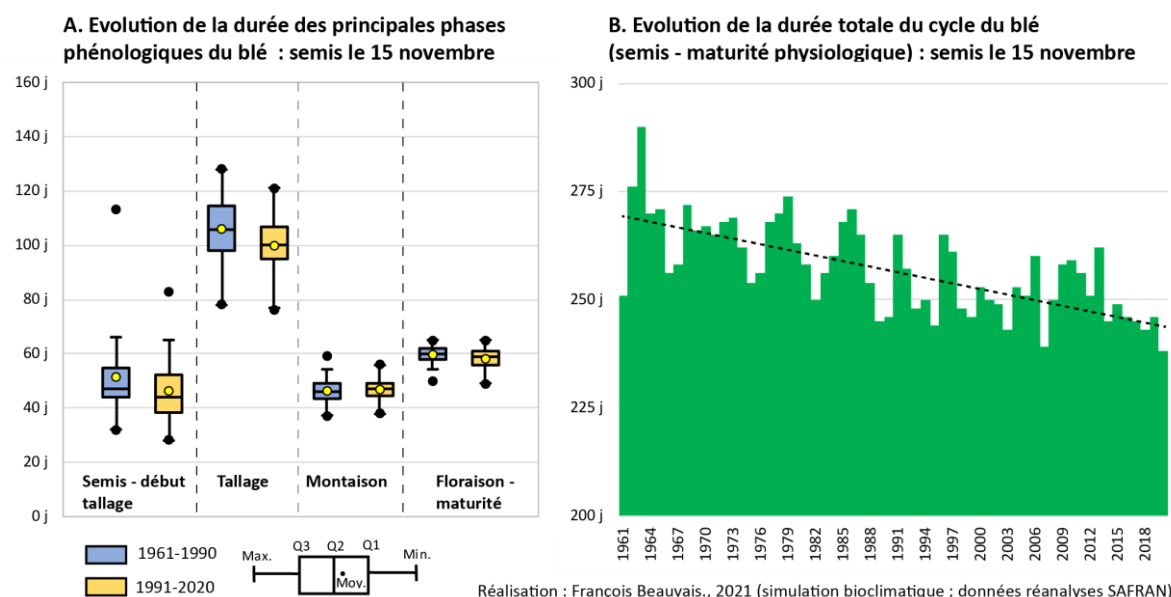
	Semis le 15 novembre	
	1961-1990	1991-2020
Semi - Levée	7	7,6
Levée - Début tallage	5,6	6,4
Début tallage - Mi-tallage	5,9	6,4
Mi-tallage - Epi 1 cm	9	9
Epi 1 cm - Stade 2 nœuds	10,7	9,9
Stade 2 nœuds - Meiose	12,3	12,5
Meiosé - Epiaison	14,3	14,6
Epiaison - Floraison	14,7	15,1
Floraison - Grain laiteux	16,2	16,1
Grain laiteux - Grain pâteux	16,9	17,8
Grain pâteux - Maturité	17,1	18

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN Météo-France)

Toutefois, si la durée de la montaison et du remplissage des grains évolue peu, ces phases apparaissent plus tôt dans le calendrier en raison des périodes phénologiques précédentes raccourcies (Figure 155).

Sur la Normale 1961-1990, les épis sortent le 6 juin et les fleurs le 16 juin. Sur les 30 dernières années l’épiaison a lieu le 26 mai et l’anthèse le 5 juin. Ce constat s’opère également pour la maturité physiologique qui est avancée du 4 août au 23 juillet, ce qui anticipe les récoltes du 19 au 5 août. Au final, la totalité du cycle s’est réduit de 14 jours entre les deux Normales climatiques.

Figure 155 : Evolution de la durée des phases phénologiques et du cycle entier du blé tendre de 1961 à 2020



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulation bioclimatique ; données réanalyses SAFRAN)

6.1.2. Légère diminution des jours disponibles pour la vernalisation

En Plaine de Caen, le blé tendre de précocité intermédiaire n'est pas exposé à un déficit de vernalisation. La montaison peut alors s'enclencher au début du printemps. La fertilité n'est pas mise en danger et le blé peut passer de l'état végétatif à reproducteur. En effet, sur la Normale 1961-1990, il dispose de plus de 92 jours de basses températures. Sur la Normale 1991-2020 plus de 82 jours sont recensés. Une réduction de 12 jours est toutefois constatée (MK significatif), principalement en raison de la réduction en durée de la phase de tallage, qui réduit la phase d'exposition.

En revanche, cette évolution démontre que les variétés de type hiver, nécessitant 60 jours de vernalisation, ne doivent pas être semées trop tard pour assurer une exposition suffisante au froid. Sur l'ensemble de la période, 7 années sur 60 sont concernées par un nombre de jours permettant la vernalisation, inférieur ou égal à 70. Six se concentrent après la rupture de 1987, ce qui démontre que ce risque est plus récurrent en raison du réchauffement. Dans ce cas, la montaison s'effectue plus tard même si le besoin en température est satisfait, ce qui suppose que les conditions atmosphériques offrent des jours disponibles dans les semaines qui suivent alors même que l'on avance dans le printemps météorologique. Le déficit de vernalisation le plus important est relevé en 1963, non pas cette fois à cause de la douceur mais en raison d'un hiver exceptionnellement long et froid avec des températures inférieures à 3 °C de la fin du mois de décembre jusqu'au mois de février.

6.1.3. Augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique

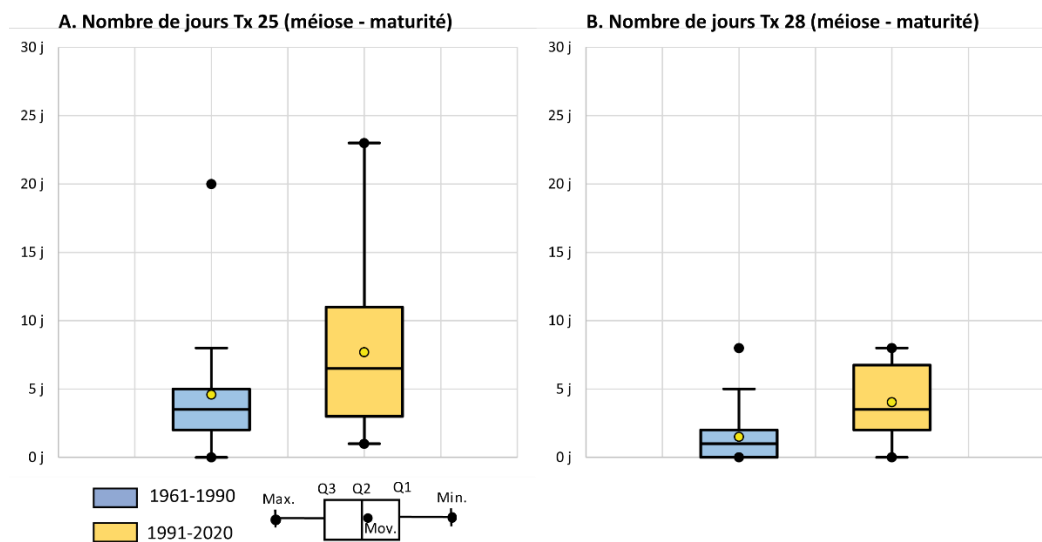
L'occurrence de l'échaudage thermique est de 4,6 jours sur la Normale climatique 1961-1990. Sur la suivante, de 1991 à 2020, elle est 7,7 jours, soit une hausse de 3,1 jours (**Figure 156 A** ; MK significatif). On notera ici, que l'avancée de la date de maturité physiologique contribue à contenir en partie l'augmentation de ces journées de chaleur. En effet, la période de remplissage des grains a lieu 12 jours plus tôt ce qui tend à réduire la phase d'exposition. Sans cette anticipation, c'est-à-dire en calculant cet aléa jusqu'au 24 juillet et au 4 août (dates de maturité de la Normale 1961-1990), le blé serait en moyenne exposé à 4 jours d'échaudage supplémentaires (soit environ 12 jours au total).

En s'intéressant au seuil de 28 °C associé à une non reprise du remplissage des grains après arrêt, on constate que cet aléa qui était en moyenne de seulement 1,5 jour, est désormais de 4 jours, soit une augmentation de 2,5 jours (**Figure 156 B** ; MK significatif).

Derrière ces moyennes, l'exposition à cet aléa est très variable d'une année à l'autre. Certaines années ne sont pas échaudantes telles que 1966, 1972 et 1988 sur la première Normale. Ce n'est plus le cas pour la seconde, ce stress étant observé chaque année, même si certaines restent peu échaudantes avec seulement une à trois journées. En revanche, le blé peut parfois être exposé à des stress thermiques conséquents comme en 1976 ou en 2006 (jusqu'à 23 jours !). Le réchauffement climatique engendre une augmentation des années où l'échaudage est marqué. Sur l'ensemble de la période 1961-2020, 15 années cumulent au moins 10 jours d'échaudage et 11 sont postérieures au début des années 1990. On constate par ailleurs que 19 années de la seconde Normales ont un

nombre de jours d'échaudage supérieur ou égal au troisième quartile de la Normale 1961-1990. Concernant le dépassement de seuil de 28 °C, 11 années sont épargnées sur la première Normale, mais sur la seconde toutes les années sont concernées à l'exception de 1993. Le premier quartile de la Normale 1991-2020 est supérieur au troisième quartile de la Normale 1961-1990.

Figure 156 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique entre 1961 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : François Beauvais, 2021 (simulations bioclimatiques pour une date de semis le 15 novembre ; données SAFRAN Météo France)

Les autres stress thermiques tels que les journées où la température maximale excède 30°C autour de la méiose et de la floraison ne sont pas observés.

6.1.4. Stabilisation du déficit hydrique

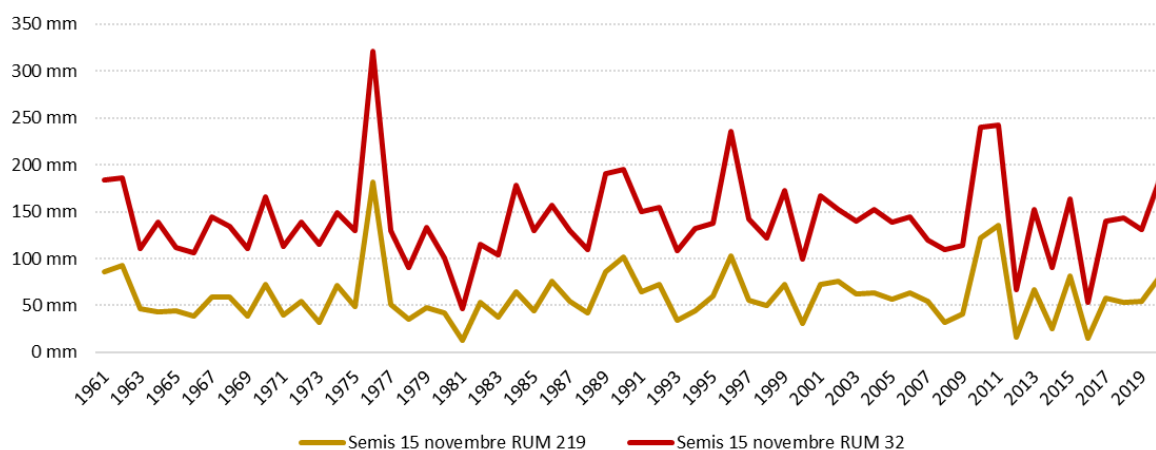
En re-simulant le bilan hydrique sur la période 1961-2020 - phénologie et besoins en eau du blé tendre pris en compte -, on constate un manque d'environ 60 mm d'eau au cours du cycle lorsqu'il est cultivé sur les sols profonds et limoneux du nord de Caen. Les pertes associées sont de l'ordre de 7 à 10 q/ha. En revanche, sur les sols minces et caillouteux du sud de Caen, le déficit hydrique est de l'ordre de 140 mm. Le rendement est alors amputé d'environ 30 q/ha. Ces résultats coïncident avec les observations de la filière agricole.

Derrière les valeurs moyennes se cache une forte variabilité interannuelle du déficit hydrique. Plusieurs années défavorables se démarquent telles que 1976, 1996, 2010 et 2011 (**Figure 157**). La première citée est la plus connue. Les précipitations sont faibles, seulement 57 mm entre avril et juillet (-71 % par rapport à la Normale 1961-1990) et le mois de juin quasi sec (1,8 mm). La montaison est alors affectée tout comme le remplissage des grains, d'autant plus qu'au déficit pluvial s'ajoute des températures élevées engendrant une forte demande évapotranspiratoire, notamment lors de la canicule du 22 juin au 6 juillet. En 1996, les mois de juin et juillet cumulent seulement 27 mm (-73 % par rapport à la Normale), pénalisant ainsi le remplissage des grains. En 2010 et en 2011 c'est la montaison qui s'effectue avec un manque d'eau. Les mois d'avril et mai 2010 sont déficitaires à hauteur de 60 % tandis que pour 2011 l'offre climatique d'avril à juin est plus faible que la Normale à hauteur de 76 %. D'autres années, au contraire, sont marquées par un

faible déficit hydrique. Il peut être inférieur à 30 et 100 mm respectivement pour les sols épais et minces. Parfois il est encore plus faible, inférieur à 20 voire 10 mm pour les sols profonds et autour de 50 mm pour les sols squelettiques. C'est le cas en 1981, 2012 et 2016.

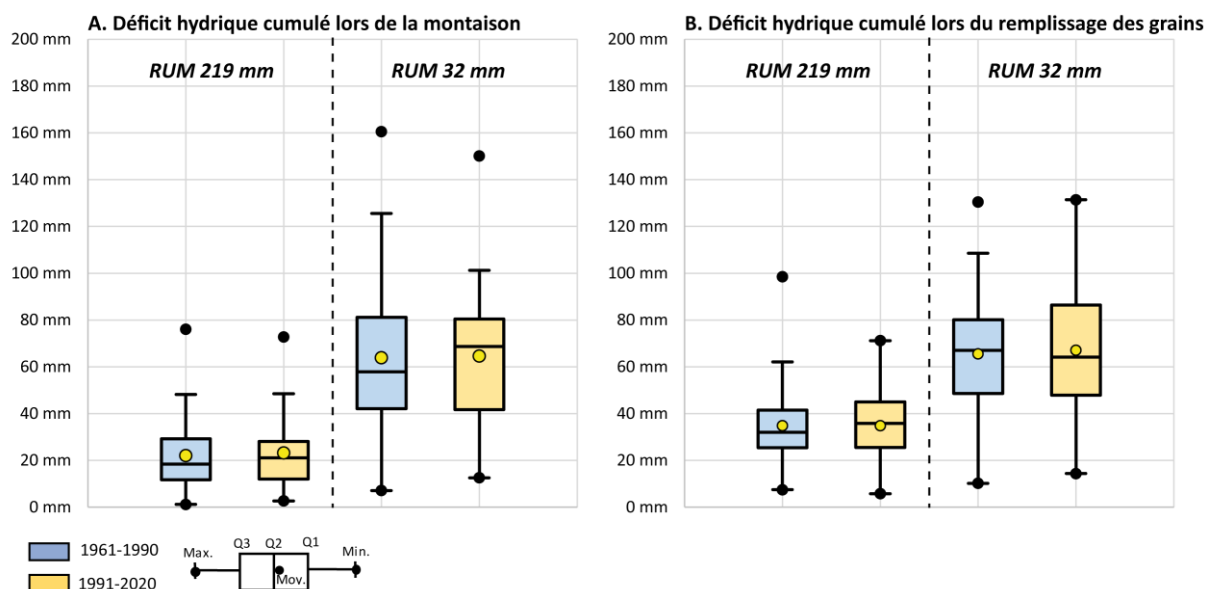
Lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble de la période 1961-2020, on constate qu'il n'y a pas de tendance significative à la hausse ou à la baisse du déficit hydrique pour le blé tendre, que ce soit pendant la montaison ou le remplissage des grains (Figure 158). L'ETP a certes augmenté, mais elle est compensée par une légère hausse des précipitations et surtout par l'anticipation de la date de maturité qui évite au blé de prolonger sa maturation en condition de sol dépourvu en eau.

Figure 157 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé en Plaine de Caen pour un sol profond et mince de 1961 à 2020



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données des ré-analyses SAFRAN)

Figure 158 : Evolution du déficit hydrique au cours de la montaison et du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques pour une date de semis le 15 novembre ; données SAFRAN Météo France).

En reprenant l'équation de la réponse du PMG de la variété Arminda (p 129) à l'interaction « jours d'échaudage thermique x déficit hydrique » en contexte de sol profond, il est possible d'estimer l'effet conjugué de ces deux aléas entre l'épiaison et la maturité physiologique (indépendamment

des autres stress). Bien que cette formule soit relative à une variété, elle permet de donner une idée des conséquences de l'évolution de ces aléas sur le rendement. En retenant un PMG de 45 g (variétés à petits grains) et 18 000 grains/m², le rendement est estimé à 89 q/ha sur la Normale 1961-1990 qui comptabilise 4,6 jours d'échaudage thermique et 42 mm de manque d'eau. Sur la Normale suivante (1991-2020), le rendement théorique est de 84 q/ha pour 7,7 jours d'échaudage thermique et 47 mm de déficit hydrique. Le déficit hydrique restant stable, l'échaudage thermique explique à lui seul cette réduction de 5 q/ha¹⁰⁸.

6.1.5. Réduction des gelées au cours du cycle et des basses températures à la méiose

Le blé semé le 15 novembre peut être exposé aux gelées inférieures à -5 °C lors de la levée. Sur la Normale 1961-1990, 7 années sur 30 sont concernées par cet aléa dont 6 avec moins de 5 occurrences. En revanche, lors de l'hiver exceptionnel 1962-1963 déjà évoqué, les températures négatives ne permettent pas le développement et la croissance de la plante. Le tallage ne peut s'enclencher et la plante reste au stade « levée » en raison de 25 jours de gelées inférieures à -5°C. Pour la Normale 1991-2020, il s'agit de 6 années sur 30 rencontrant ces basses températures avec cependant moins de 5 jours d'occurrence, à l'exception de l'hiver 1996-1997 et ses températures minimales inférieures à -5 °C durant 10 jours lors de la vague de froid du 24 décembre au 11 janvier.

Les gelées inférieures à -20°C au cours du tallage ne sont pas recensées en Plaine de Caen. Au seuil de -10°C, seulement 6 années sur 60 sont concernées sur l'ensemble de la période 1961-2020. Il s'agit à chaque fois que d'une à deux journées, ce qui peut tout de même suffire pour engendrer des dégâts sur un blé non endurci. Enfin, le blé en Plaine de Caen n'est pas concerné par le gel d'épis à la montaison dans la mesure où les sommes de températures mobilisées et les dates de semis n'engendrent pas un stade épi 1 cm au cours de l'hiver. Néanmoins, dans le cas d'une variété précoce cet aléas peut survenir, d'autant plus en raison de l'adoucissement des hivers, comme en témoignent certains exploitants.

La concomitance entre les basses températures et la période proche de la méiose est plutôt rare en Plaine de Caen avec une occurrence d'une à trois années sur dix (**Tableau 38**). Il n'y a pas d'évolution significative de ce risque jusqu'à présent. Lorsque ces basses températures sont associées à un faible rayonnement, les dégâts occasionnés peuvent être plus prononcés. Néanmoins aucune concomitance de ce type n'est observée sur l'ensemble de la chronique 1961-2020.

¹⁰⁸ La profession considère souvent qu'un jour d'échaudage thermique engendre une perte de 1,5 q/ha. Dans ce cas la perte de rendement calculée est de -4,5 q/ha, ce qui correspond à l'ordre de grandeur calculé avec l'équation de la variété Arminda.

Tableau 38 : Occurrence de basses températures au cours de la période proche méiose pollinique en Plaine de Caen sur la période 1961-2020

	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020
Nb années avec au moins une occurrence	0/10a	01/10a	02/10a	0/10a	02/10a	02/10a
Nbj max	-	2 j	1 j	-	2 j	1 j

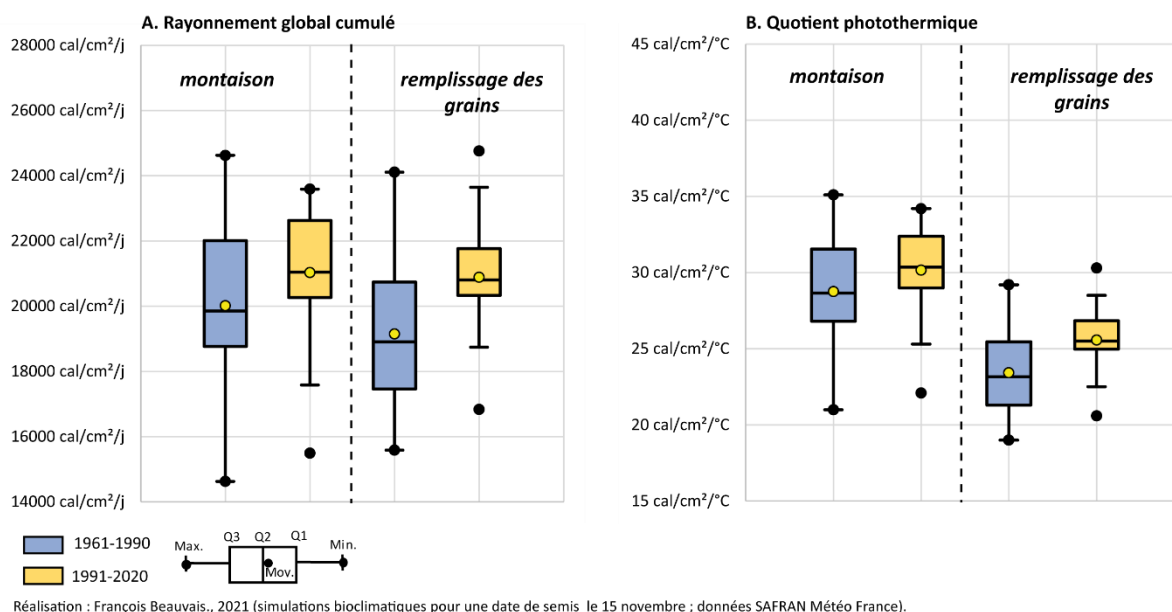
Réalisation : François Beauvais., 2021 (données CNRM-2014)

6.1.6. Augmentation du rayonnement et du quotient photothermique

Sur l'ensemble de la montaison du blé, le rayonnement solaire global augmente de 5 %, passant de 20 013 à 21 032 cal/cm² (**Figure 159 A**). Entre 1961 et 2020, la montaison est marquée par certaines années au faible rayonnement, comme en 1963, 1964, 1981, 1983 et 1993 avec moins de 17 000 cal/cm². Mais ce type d'évènement tend à se raréfier avec notamment une réduction de la variabilité interannuelle depuis le début des années 2000. Le constat est en revanche différent pour le remplissage des grains. La hausse du rayonnement disponible est de 9 %, passant de 19 150 à 20 887 cal/cm². Elle s'explique d'une part par l'augmentation du rayonnement printanier et estival mais également par le fait que le remplissage des grains débute plus tôt et ne se prolonge plus jusqu'au mois d'août. Cette dernière grande étape de l'élaboration du rendement s'amorce à la fin du mois de juin, moment de l'année où les jours sont longs. C'est à la fin des années 1990 et au début des années 2000 que le blé profite le plus du rayonnement pour le remplissage de ses grains avec plusieurs années à plus de 24 000 cal/cm². La décennie 2010 est marquée par deux années au cumul plus faible : 2012 et 2016 avec respectivement 18 553 et 17 288 cal/cm², soit un cumul équivalent à celui observé lorsque le cycle se clôturait à la mi-août dans les années 1960 et 1970. D'ailleurs, ces faibles rayonnements constituent une des raisons de la chute des rendements en 2016.

Grâce à cette augmentation du rayonnement global, le potentiel de grains/m² est maintenu, voire amélioré. En effet, l'augmentation de la température moyenne pendant les périodes phénologiques composant la montaison et le remplissage des grains du blé est plus que compensée. Le quotient photothermique augmente légèrement (**Figure 159 B**). Il passe de 28,8 à 30,2 pendant la montaison et de 23,4 à 25,6 au cours du remplissage des grains, ce qui correspond respectivement à des hausses de 5 et 9 % (MK significatif).

Figure 159 : Evolution du rayonnement global cumulé et du quotient photothermique au cours de la montaison et du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen

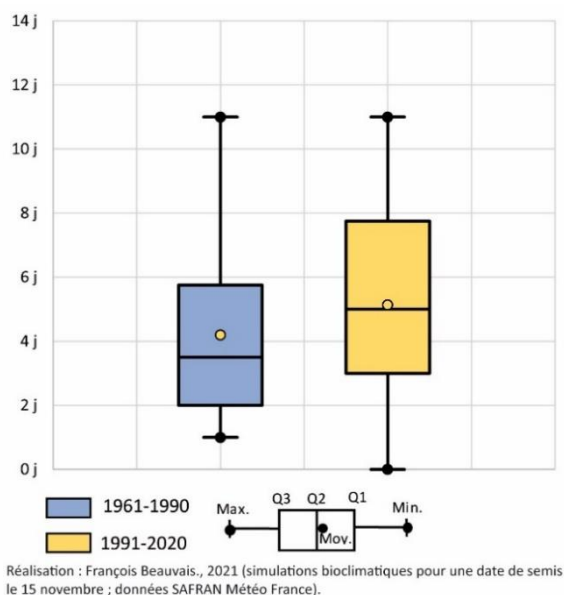


6.1.7. Baisse des jours disponibles pour les récoltes

Pour mieux approcher les conditions de récolte du blé tendre, nous proposons d'observer le nombre de jours de pluie sur les 15 jours suivant la date de maturité (270 °CJ après la maturité physiologique). En moyenne, près de 5 jours de pluie sont constatés après la maturité récolte, ce qui laisse une dizaine de jours de disponible pour moissonner (**Figure 160**). Toutefois, certaines années ont pu être défavorables avec plus de 8 jours de précipitation, voire 10 jours. Dans ce cas on suppose que les récoltes furent retardées comme au cours de l'été 2021¹⁰⁹. Il n'y a pas de tendance significative (test MK) des jours de pluie après la maturité récolte, même si une légère augmentation de 0,9 jour est constatée. Sur les boxplots, la valeur maximale reste équivalente entre les deux Normales, mais on constate une hausse de l'écart interquartile en raison des étés un peu plus humides.

¹⁰⁹ En 2021 le blé était mûr à la fin du mois de juillet mais les précipitations ont repoussé les moissons à la 3^e semaine d'août. Les grains humides ont dû être séchés.

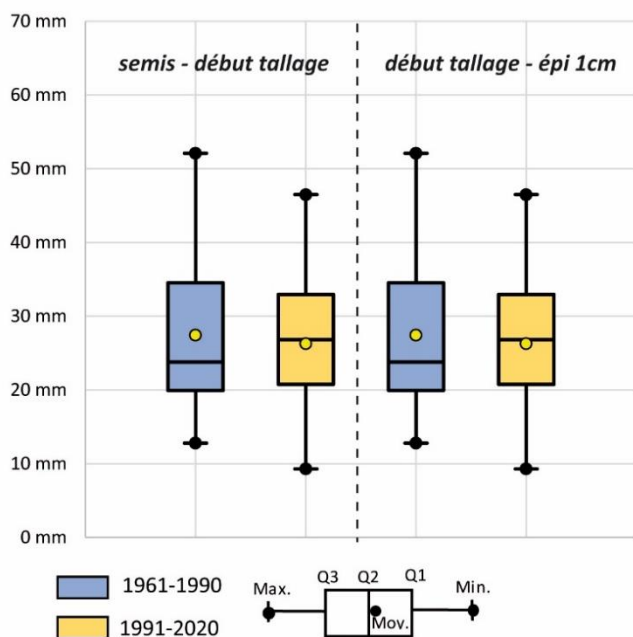
Figure 160 : Evolution du nombre de jours de précipitations dans les 15 jours suivant la date de maturité récolte de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



6.1.8. Absence d'évolutions significatives des excès d'eau en surface du sol

Les excès d'eau considérés correspondent à la quantité d'eau en surplus déduite de la part allant à l'écoulement lorsque le sol est en situation de capacité au champ. Lorsque ces excès sont conséquents, de l'eau peut stagner en surface du sol et envoyer la culture, engendrant une asphyxie de la plante. Le développement racinaire est également perturbé ainsi que l'assimilation des minéraux. Les phases de levée et de tallage de la plante s'effectuent à un moment de l'année où le sol est en capacité au champ. L'eau précipitée ne peut pénétrer dans le sol et constitue le surplus. Par conséquent, de l'eau excédentaire est constatée chaque année pendant ces phases phénologiques. Il s'agit d'une vingtaine de mm entre le semis et le début du tallage, soit entre les mois de novembre et de décembre selon la date de semis (**Figure 161**). Lors du tallage, qui s'effectue jusqu'à la sortie de l'hiver, il s'agit d'une trentaine à une quarantaine de mm d'excédent. La montaison s'effectuant au printemps est moins soumise aux excès d'eau. D'ailleurs, lorsqu'ils sont recensés, il s'agit plus particulièrement de la période épi 1 cm-2 nœuds. Les surplus sont rares pour les stades phénologiques qui succèdent à la première partie de la montaison. De 1961 à 2020, aucune tendance significative de l'évolution de ces excès d'eau n'est constatée.

Figure 161 : Evolution des excès d'eau en surface du sol du semis au stade épi 1 cm de 1961 à 2020 en Plaine de Caen



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques pour une date de semis le 15 novembre ; données SAFRAN Météo France).

6.1.9. Absence d'évolution significative des fortes précipitations

Les fortes pluies constituent un élément déclencheur de la verse du blé pendant le remplissage du grain. L'occurrence d'au moins une journée avec un cumul de pluie supérieur ou égal à 10 mm/j est d'environ 7 années sur 10 sur l'ensemble de la période 1961-2020 (Tableau 39). Parfois il s'agit de plusieurs journées, comme en 1963 où le remplissage est théoriquement exposé à 8 jours de fortes précipitations. Les pluies supérieures ou égales à 20 mm/j sont en revanche plus rares. Il n'y a aucune tendance significative de l'exposition du blé aux fortes précipitations sur la période 1961-2020.

Tableau 39 : Occurrence des jours de fortes précipitations au cours du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen

		1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020
RR 10	Nb d'années avec au moins une occurrence	09/10a	06/10a	06/10a	04/10a	07/10a	07/10a
	Nbj max	8 j	4 j	4 j	5 j	6 j	2 j
RR 20	Nb d'années avec au moins une occurrence	01/10a	01/10a	00/10a	02/10a	01/10a	01/10a
	Nbj max	1 j	1 j	-	4 j	1 j	1 j

Réalisation : François Beauvais., 2021

Enfin, le cycle du blé s'est raccourci d'environ 15 jours entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020. C'est surtout la phase de tallage hivernal dont la durée a été réduite. Les

autres périodes phénologiques étant anticipées dans le calendrier, elles ne sont pas soumises à des températures plus élevées pouvant raccourcir leur durée. Le nombre de jours de vernalisation est en baisse de 12 jours en raison de la réduction de la durée du tallage, mais les besoins d'une variété intermédiaire restent encore largement satisfaits. En revanche, le nombre de jours d'échaudage thermique est en nette hausse : +3 jours pour le seuil de 25 °C et +2,5 jours pour le seuil de 28 °C. Le quotient photothermique augmente de 5 et 9 % pour la montaison et le remplissage des grains. Le déficit hydrique sur l'ensemble du cycle n'a pas augmenté, en raison de l'avancée des stades. Aucune tendance significative n'est constatée pour les excès d'eau en surface du sol durant la levée et le tallage. Le même constat est effectué pour les précipitations estivales sur la période de récolte. L'ensemble de ces résultats se confirment également pour les trois plaines céréalières de Normandie : Pays de Caux, Plaine d'Evreux et le Perche (Annexe 10).

6.2. Evolutions phénoclimatiques aux horizons 2050 et 2100

De la même façon que pour la période historique, nous proposons une approche phénoclimatique où les indicateurs climatiques sont calculés sur les phases de développement du blé tendre d'hiver. Le cycle du mélange variétal observé dans la parcelle d'Anguerny est simulé aux horizons 2050 et 2100 avec les trois scénarios RCP, toujours pour une même date de semis (15 novembre).

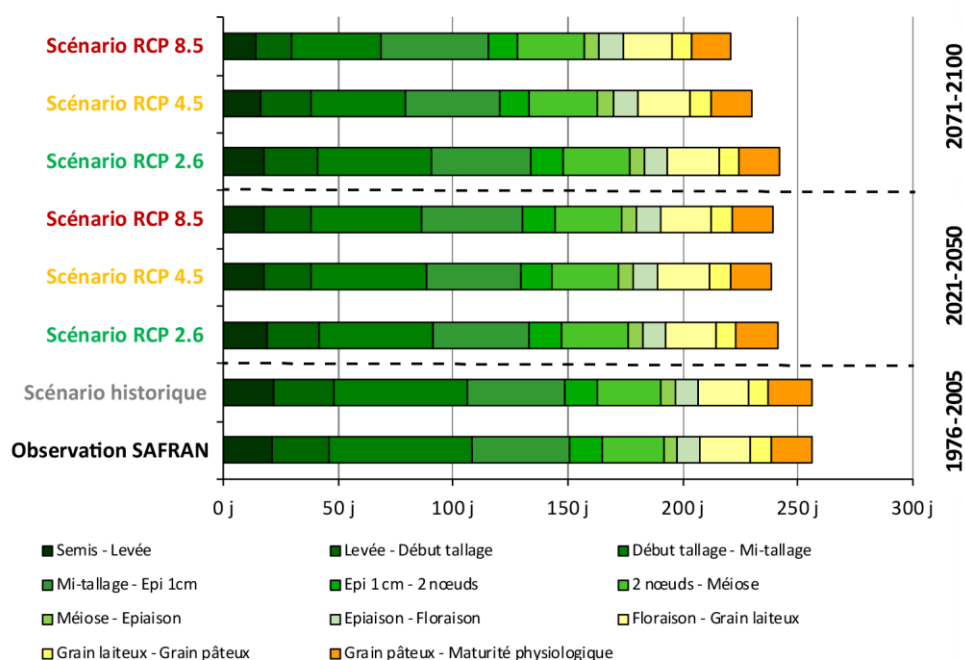
6.2.1. Anticipation de la phénologie et risque d'une infaisabilité du cycle

Le premier constat est une nette anticipation des stades phénologiques, liée à l'élévation de la température.

La réduction de la durée des phases phénologiques concernerait essentiellement la levée et tallage (**Figure 162**). Ainsi les premiers organes aériens apparaîtraient trois à quatre jours plus tôt d'ici l'horizon 2050 selon les scénarios. Les phases « levée-première talle » et du tallage (début tallage-épi 1 cm) seraient réduites respectivement d'environ 5 et 10 jours. Par conséquent, l'anticipation du stade épi 1 cm serait de l'ordre de 19 jours. La montaison débuterait alors à la fin du mois de mars. Les périodes phénologiques suivantes se déroulent plus tôt dans le calendrier. De ce fait elles rencontrent des températures équivalentes à la période de référence et leur durée resterait équivalente. La phase « épi 1 cm - 2 nœuds » s'effectuerait même sur 29 jours au lieu de 27. L'épiaison et la floraison auraient lieu deux semaines plus tôt, respectivement début mai et mi-mai contre fin mai et début juin en période de référence (**Figure 163**). Le remplissage des grains s'effectuerait toujours en 50 jours. La maturité physiologique interviendrait mi-juillet au lieu de la fin juillet. Dans l'ensemble, l'avancement moyen pour les 30 prochaines années correspond à celui observé lors des années les plus chaudes de ces 20 dernières années.

A la fin du 21^e siècle, les évolutions rattachées au scénario RCP 2.6 seraient quasiment équivalentes avec celles prévues à l'horizon 2050 avec ce même scénario. En revanche, les changements seraient plus prononcés avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5. La levée apparaîtrait 6 et 8 jours plus tôt, respectivement pour ces deux scénarios. La durée de la levée et du tallage étant réduite, la montaison débuterait le 14 mars et le 9 mars avec ces deux scénarios, en sachant que pour cette dernière projection, l'anticipation du stade épi 1 cm est limitée par la durée du jour. Autrement dit, le potentiel de température est atteint avant le début du mois de mars, mais l'épi ne monte pas en raison du critère photopériodique. Selon le même principe qu'à moyen terme, l'avancée des stades permet aux périodes phénologiques suivantes d'être exposées à des températures proches de celles qu'elles connaissent en période de référence (**Figure 164**). Ainsi, la durée de la montaison n'est pas raccourcie. En revanche, la fin du remplissage des grains avec le scénario RCP 8.5 connaîtrait des températures plus élevées c'est pourquoi elle serait plus courte de deux jours. L'épiaison aurait lieu en moyenne le 3 mai avec le scénario RCP 4.5 et le 27 avril avec le scénario RCP 8.5. La floraison s'effectuerait alors en première quinzaine du mois de mai. La maturité physiologique est estimée le 2 juillet pour le scénario intermédiaire, avec la récolte mi-juillet. Dans le cas du scénario le plus chaud, le grain serait mûre le 23 juin et battu au début du mois suivant. L'anticipation serait alors de 5 semaines. La date de maturité la plus précoce est simulée le 12 juin, la plus tardive le 8 juillet.

Figure 162 : Evolution de la durée moyenne des périodes phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 de Météo France ; critère photopériodique de 11h au stade épi 1 cm en considérant une vernalisation non limitante ; températures des projections en tenant compte du biais froid du modèle sur la base des écarts entre le scénario historique et l'observation sur la période post-rupture 1987).

Figure 163 : Evolution de la date moyenne d'apparition des stades phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP

	1976-2005		2021-2050			2071-2100		
	Observation SAFRAN	Scénario historique	2021-2050 RCP2.6	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2071-2100 RCP2.6	2071-2100 RCP4.5	2071-2100 RCP8.5
Semis	15-nov.	15-nov.	15-nov.	15-nov.	15-nov.	15-nov.	15-nov.	15-nov.
Levée	5-déc.	6-déc.	3-déc.	2-déc.	2-déc.	1-déc.	30-nov.	28-nov.
Début tallage	30-déc.	1-janv.	25-déc.	22-déc.	23-déc.	25-déc.	22-déc.	13-déc.
Mi tallage	1-mars	28-févr.	14-févr.	10-févr.	9-févr.	13-févr.	1-févr.	21-janv.
Epi 1 cm	13-avr.	11-avr.	27-mars	24-mars	24-mars	28-mars	14-mars	9-mars
Stade 2 nœuds	27-avr.	25-avr.	10-avr.	6-avr.	7-avr.	11-avr.	27-mars	22-mars
Méiose	24-mai	22-mai	9-mai	5-mai	6-mai	10-mai	26-avr.	20-avr.
Epiaison	30-mai	29-mai	15-mai	12-mai	13-mai	16-mai	3-mai	27-avr.
Floraison	9-juin	8-juin	26-mai	22-mai	23-mai	26-mai	14-mai	7-mai
Grain laiteux	30-juin	29-juin	16-juin	13-juin	14-juin	18-juin	5-juin	28-mai
Grain pâteux	9-juil.	8-juil.	25-juin	23-juin	23-juin	27-juin	15-juin	6-juin
Mâturité	28-juil.	27-juil.	13-juil.	11-juil.	11-juil.	14-juil.	2-juil.	23-juin
Récolte	12-août	11-août	28-juil.	25-juil.	25-juil.	28-juil.	16-juil.	06-juil.

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 de Météo France ; critère photopériodique de 11h au stade épi 1 cm en considérant une vernalisation non limitante ; correction des températures des projections en tenant compte du biais froid du modèle sur la base des écarts entre le scénario historique et l'observation sur la période post-rupture 1987).

Figure 164 : Evolution de la température moyenne au cours des stades phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP

	1976-2005 Safran obs	1976-2005 scénario hist	2021-2050 RCP2.6	2021-2050 RCP4.5	2021-2050 RCP8.5	2071-2100 RCP2.6	2071-2100 RCP4.5	2071-2100 RCP8.5
Semis - Levée	7,4	7,5	8,3	8,8	8,7	8,8	9,1	10,7
Levée - Début tallage	6,4	6,3	7,1	7,5	7,7	6,9	7,5	10,5
Début tallage - Mi-tallage	5,7	6,0	7,2	7,1	7,4	7,3	8,5	9,3
Mi-tallage - Epi 1cm	8,2	8,4	8,5	8,6	8,3	8,2	9,0	9,7
Epi 1 cm - 2 nœuds	10	9,8	10,2	10,9	9,9	10,1	10,6	10,7
2 nœuds - Méiose	12,3	12,2	11,4	11,2	11,3	11,5	11,3	11,5
Méiose - Epiaison	14,5	14,0	14,3	13,7	13,6	14,2	12,5	12,9
Epiaison - Floraison	15,1	15,0	14,6	14,2	14,6	14,5	14,0	14,3
Floraison - Grain laiteux	16	16,3	16,1	15,7	15,8	15,8	15,3	16,7
Grain laiteux - Grain pâteux	17,2	17,0	17,1	16,7	16,5	17,1	16,6	17,5
Grain pâteux - Maturité physio	17,6	17,3	17,8	17,9	17,9	18,3	18,0	18,9

Réalisation : François Beauvais, 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 de Météo France ; critère photopériodique de 11h au stade épi 1 cm en considérant une vernalisation non limitante ; températures des projections en tenant compte du biais froid du modèle sur la base des écarts entre le scénario historique et l'observation sur la période post-rupture 1987).

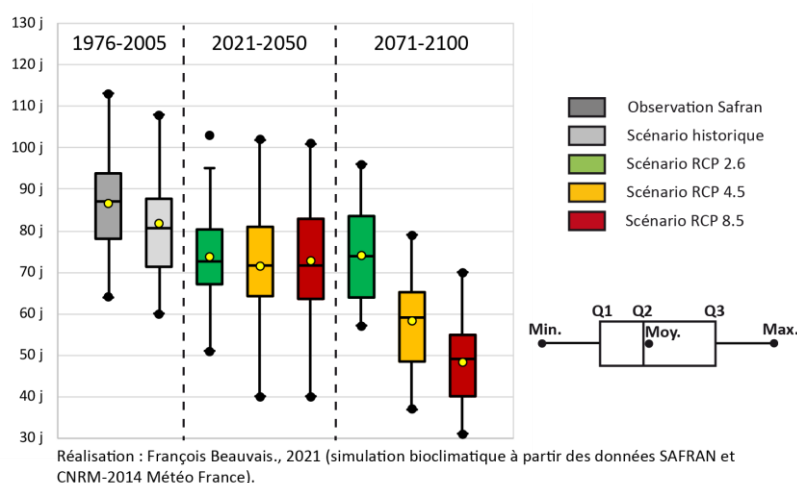
Ces résultats sont exposés en tenant compte d'un critère photopériodique. Par ailleurs, la vernalisation peut également constituer un frein à l'avancement de la végétation si les besoins d'exposition aux basses températures ne sont pas satisfaits. Autrement dit, si la somme de température pour le stade épi 1 cm est atteinte, que la durée du jour est suffisante, mais que le blé n'a pas cumulé assez de jours de froid, la montaison ne peut s'enclencher. Dans ce cas, elle aura lieu uniquement si la plante peut de nouveau accumuler une exposition au froid.

Sur la Normale 2021-2050, le nombre de jours de vernalisation accumulés avant que le besoin en température ne soit satisfait est d'un peu plus de 70 jours pour les trois scénarios, contre plus de 80 jours en période de référence (Figure 165). Néanmoins, lorsque l'on tient compte de la variabilité interannuelle, 7 et 6 années sur 30 pourraient cumuler moins de 60 jours de vernalisation dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5. Une variété de type hiver prolongerait alors son cycle pour déclencher sa montaison lorsque ce seuil est atteint. L'alternativité de la variété que nous avons observée au champ est intermédiaire et nécessite 45 jours de vernalisation. La non satisfaction du besoin en vernalisation lorsque l'exigence en température est satisfaite et que la durée du jour est suffisante, n'arrive qu'à 1 reprise sur les 30 années de la Normale climatique pour ces deux scénarios. Il manque alors 5 jours de basses températures à la plante, ce qui décale de quelques jours l'apparition du stade épi 1 cm. La solution pour limiter les risques serait alors de semer avant le 15 novembre de façon à anticiper la levée et d'accumuler plus tôt les basses températures. Dans la mesure où la plante ne peut entamer sa montaison pendant les jours courts, l'exploitant s'assure alors de ne pas s'exposer à une anticipation trop précoce du stade épi 1 cm qui pourrait alors craindre des gelées de fin d'hiver.

Sur la Normale 2071-2100, le nombre de jours de vernalisation à la date à partir de laquelle le besoin en température et de photopériode sont satisfaits serait de 74 jours avec le scénario RCP 2.6. Une seule année sur 30 se situerait sous le seuil de 60 jours et aucune sous celui de 45 jours. Avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5, le nombre de jours de basses températures cumulés s'élèverait à 58 et 48. La moitié et deux tiers de la Normale climatique cumuleraient moins de 60 jours de vernalisation avec ces deux scénarios. En descendant ce seuil à 45 jours, 5 années sur 30 sont concernées avec le scénario RCP 4.5. Pour quatre d'entre elles le blé ne décolle pas et le cycle n'aboutit donc pas. Pour la cinquième année, le stade 1 cm est retardé au 20 avril, date à partir de laquelle il finit de

cumuler les jours de froid nécessaires. Avec le scénario RCP 8.5, 12 années sur 30 sont concernées. Le blé reste alors à l'état végétatif en attendant d'avoir satisfait ses besoins en froid. Cependant, 9 années ne disposent pas d'assez de jours disponibles pour finir la vernalisation, c'est-à-dire qu'un tiers de la Normale climatique ne verrait pas le blé passer à l'état reproducteur. Par conséquent une année sur trois serait sans récolte. Les trois années où la vernalisation se poursuit, elle est satisfaite mi-avril. Pour garantir la faisabilité de la culture du blé tendre d'hiver pour toutes les années de la Normale climatique 2071-2100, il conviendra alors de semer des cultivars qui ne nécessitent pas plus de 40 et 30 jours de vernalisation, respectivement pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Figure 165 : Evolution du nombre de jours de vernalisation entre la levée et le stade épi 1 cm aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon trois scénarios RCP



A l'inverse, certaines variétés de blé peuvent être insensibles à la photopériode. Dans ce cas, la montaison s'enclenche dès que les besoins en température et en vernalisation sont satisfaits. En excluant le besoin en froid, la durée du jour bloque l'apparition du stade épi 1 cm avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 à 9 et 18 reprises sur la Normale 2071-2100. Dans le cas du scénario le plus chaud, ce stade apparaît au plus tôt le 9 février. La date d'apparition moyenne pour la Normale climatique serait alors avancée au 26 février. Cependant, en intégrant les besoins en basses températures de la plante, celle-ci devrait alors être tolérante à une exposition de seulement 20 jours de vernalisation pour assurer la continuité du cycle sur toutes les années concernées. En semant le blé plus tôt, le 25 octobre, la montaison pourrait débuter en moyenne le 29 janvier. Néanmoins, pour que ce potentiel s'exprime, les variétés devraient une nouvelle fois être tolérantes à une très faible exposition aux basses températures.

Finalement, la durée du cycle devrait se raccourcir de l'ordre de deux semaines à l'horizon 2050 et jusqu'à 5 semaines d'ici 2100 pour le scénario RCP 8.5. Néanmoins, pour que le cycle aille jusqu'à son terme, les cultivars devront être plus alternatifs. En effet, sur les trente dernières années du siècle, 4 et 9 années sur 30 seraient sans récoltes avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 si la plante nécessite au moins 45 jours de vernalisation. Si les cultivars sont intolérants à la photopériode, les stades phénologiques pourraient être d'autant plus avancés, mais cette thèse n'est plausible que dans le cas de variétés n'ayant presque plus besoin d'une exposition au froid.

De façon à produire une analyse phénoclimatique complète de la Normale climatique 2071-2100, nous considérons alors que l'exploitant disposera de variétés nécessitant seulement 30 jours de vernalisation.

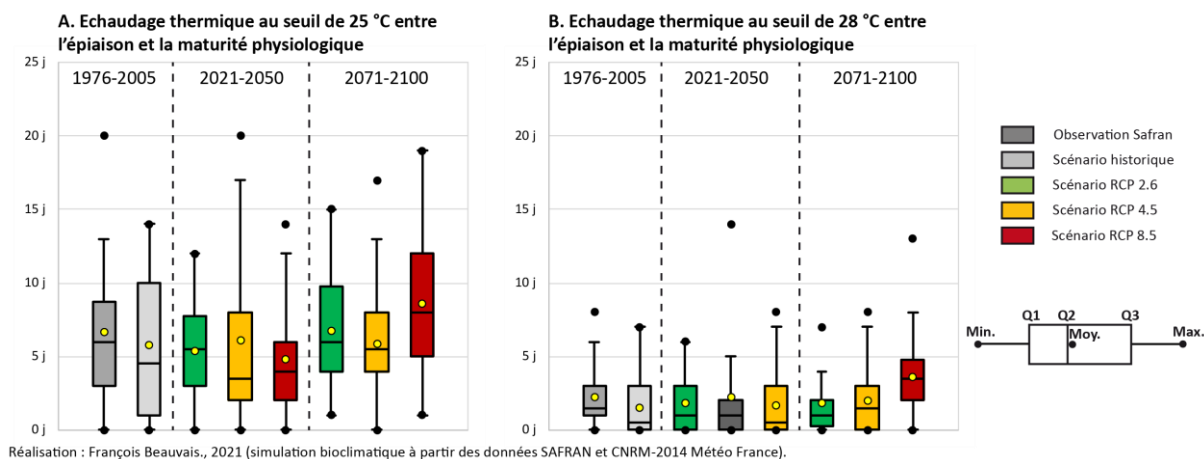
6.2.2. Hausse contenue de l'échauffage thermique

En moyenne, 7 jours d'échauffage thermique sont rencontrés entre l'épiaison et la maturité physiologique du blé tendre d'hiver en considérant les données du modèle SAFRAN sur la période 1976-2005 (**Figure 166 A**). Malgré la correction des données, le scénario historique sous-estime cet aléa d'une journée.

A l'horizon 2050, le nombre de jours d'échauffage thermique reste équivalent à la période de référence à l'exception du scénario RCP 8.5 où le cumul est réduit d'une journée. D'ici la fin du siècle, il n'y a pas d'évolution avec le scénario RCP 4.5. En revanche, une journée supplémentaire est constatée avec le scénario RCP 2.6. Pour le scénario RCP 8.5, la hausse est de 3 jours. Le potentiel de rendement pourrait alors être réduit en moyenne d'environ 5 q/ha. L'anticipation de la phénologie ne permet pas de contrecarrer totalement la hausse des jours de chaleur en fin de cycle de la plante. Néanmoins, elle la contient à seulement quelques jours puisque sans avancée des stades, le blé serait confronté aux chaleurs estivales. En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent que les indicateurs agroclimatiques à dates invariantes démontraient que, sans anticipation des stades, le blé serait confronté à près de 30 jours de chaleur, soit près de 4 fois plus qu'en tenant compte de la modification de la durée des stades végétatifs. Par ailleurs, la variabilité interannuelle augmente dans le cas du scénario RCP 4.5 à court terme et du scénario RCP 8.5 à long terme. Néanmoins, le record de 1976 (20 jours) ne serait pas dépassé.

Deux jours d'échauffage thermique atteignent le seuil de 28 °C en période de référence (**Figure 166 B**). Il n'y aurait pas d'augmentation de cet aléa dans les prochaines décennies à l'exception du long terme pour le scénario RCP 8.5 où une hausse de deux jours est constatée.

Figure 166 : Evolution du nombre de jours d'échauffage thermique entre l'épiaison et la maturité physiologique du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



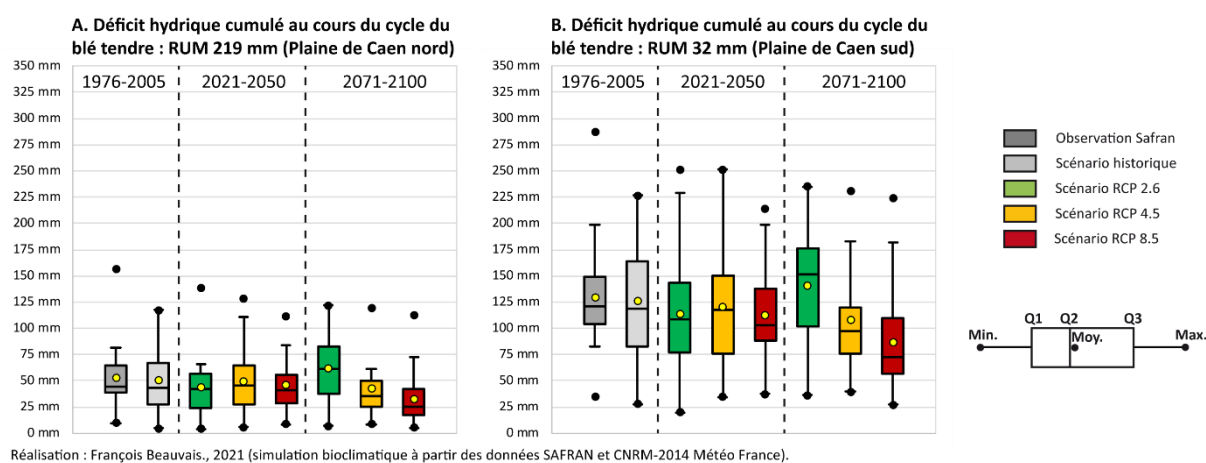
Outre l'échaudage, le blé est sensible aux excès thermiques (température supérieure ou égale à 30°C) à la méiose et à la floraison. Cet aléa n'est pas recensé en période de référence et il serait de même à l'avenir, à l'exception d'une unique occurrence à court terme dans le cas du scénario RCP 4.5. L'analyse à partir des indicateurs climatiques montre que ces températures extrêmes pourraient survenir au printemps dans les prochaines décennies. Néanmoins, le risque d'une concomitance entre les quelques jours de sensibilité de la plante et d'un jour de très forte chaleur reste faible, d'autant que les stades apparaissent plus tôt dans le calendrier.

6.2.3. Réduction du déficit hydrique cumulé et amélioration du confort hydrique

En période de référence, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle est estimé à 50 mm pour les sols épais du nord de Caen et à près de 130 mm pour les sols minces en plaine sud.

A moyen terme, grâce à l'avancement des stades phénologiques, ce déficit se situerait légèrement en dessous de ces valeurs, donc sans aucune conséquence supplémentaire pour la plante (**Figure 167**). En effet, le blé termine son cycle avant les sécheresses estivales présentées dans le cadre des indicateurs agroclimatiques à dates invariantes. A la fin du siècle, le constat est le même pour les RCP 4.5 et 8.5 puisque les déficits seraient de 43 et 32 mm pour le sol profond et de 108 et 87 mm pour le petit sol. Cette projection constitue une « bonne » nouvelle, notamment pour les sols les plus minces où le blé souffre régulièrement du manque d'eau. En revanche, c'est paradoxalement dans le cas du scénario « optimiste » RCP 2.6 que la situation serait plus préoccupante pour ce paramètre : la précocité des stades phénologiques ne serait alors pas suffisante, ce qui conduirait à un déficit hydrique supérieur d'environ 10 à 15 mm à celui de la période de référence. Enfin, notons que la variabilité interannuelle reste dans les gammes de la période de référence. Les années au manque d'eau le plus prononcé n'excéderaient pas les valeurs observées lors de la Grande sécheresse de 1976.

Figure 167 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



Lorsque l'on s'intéresse au confort hydrique, les mêmes conclusions sont effectuées (**Tableau 40**). C'est au début de la montaison que le rapport ETR/ETM commence à se dégrader. Les besoins

en eau de la plante augmentent. C'est le moment de l'année où l'ETP est en hausse et que la RUD commence à être sollicitée par le blé. Le confort hydrique¹¹⁰ à la fin du cycle se situe autour de 0,8 pour les sols épais du nord de Caen et de 0,6 pour les sols minces. Toutefois, lors des années sèches, cet indicateur peut être inférieur à 0,5. En 1976 il est même de 0 lors de l'épiaison et de la floraison. Sur la Normale 2021-2050, le confort hydrique serait globalement équivalent à celui de la période de référence, voire légèrement plus avantageux. A long terme, l'amélioration de cet indicateur du stress hydrique se poursuit puisqu'il serait de 0,8 et 0,9 lors du remplissage des grains avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 au nord de Caen. Au sud, il serait compris entre 0,6 et 0,7. Une légère dégradation est constatée avec le scénario RCP 2.6.

Tableau 40 : Evolution du confort hydrique du blé tendre d'hiver au cours de ses principales périodes phénologiques en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP

		1976-2005		2021-2050			2071-2100		
		SAFRAN	Scé hist	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
RUM 219 mm (Plaine nord)	Semis - levée	1	1	1	1	1	1	1	0,98
	Levée - début tallage	1	1	1	1	1	1	0,99	1
	Début tallage - mi -tallage	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mi-tallage - Epi 1cm	1	1	1	1	1	1	1	1
	Epi 1 cm - 2 nœuds	0,95	1	0,96	0,99	0,98	0,98	0,99	0,98
	2 nœuds - Méiose	0,92	0,9	0,94	0,95	0,94	0,94	0,95	0,98
	Méiose - Epiaison	0,87	0,9	0,91	0,91	0,88	0,88	0,91	0,93
	Epiaison - Floraison	0,84	0,9	0,88	0,86	0,87	0,85	0,87	0,9
	Floraison - Grain laiteux	0,78	0,8	0,85	0,81	0,84	0,8	0,83	0,85
	Grain laiteux - grain pâteux	0,76	0,8	0,81	0,78	0,86	0,71	0,8	0,86
	Grain pâteux - maturité	0,79	0,8	0,82	0,77	0,84	0,74	0,84	0,89
RUM 32 mm (Plaine sud)	Semis - levée	1	1	1	1	1	1	1,01	1,01
	Levée - début tallage	1	1	1	1	1	1	1	1
	Début tallage - mi -tallage	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mi-tallage - Epi 1cm	0,91	0,92	0,94	0,98	0,94	0,96	0,97	0,98
	Epi 1 cm - 2 nœuds	0,78	0,83	0,82	0,88	0,88	0,89	0,89	0,9
	2 nœuds - Méiose	0,72	0,69	0,78	0,77	0,71	0,74	0,79	0,81
	Méiose - Epiaison	0,63	0,7	0,68	0,7	0,61	0,64	0,69	0,69
	Epiaison - Floraison	0,59	0,65	0,65	0,6	0,65	0,56	0,6	0,65
	Floraison - Grain laiteux	0,51	0,6	0,66	0,56	0,65	0,55	0,6	0,62
	Grain laiteux - grain pâteux	0,49	0,61	0,57	0,63	0,76	0,49	0,62	0,69
	Grain pâteux - maturité	0,67	0,61	0,68	0,6	0,72	0,6	0,72	0,8

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

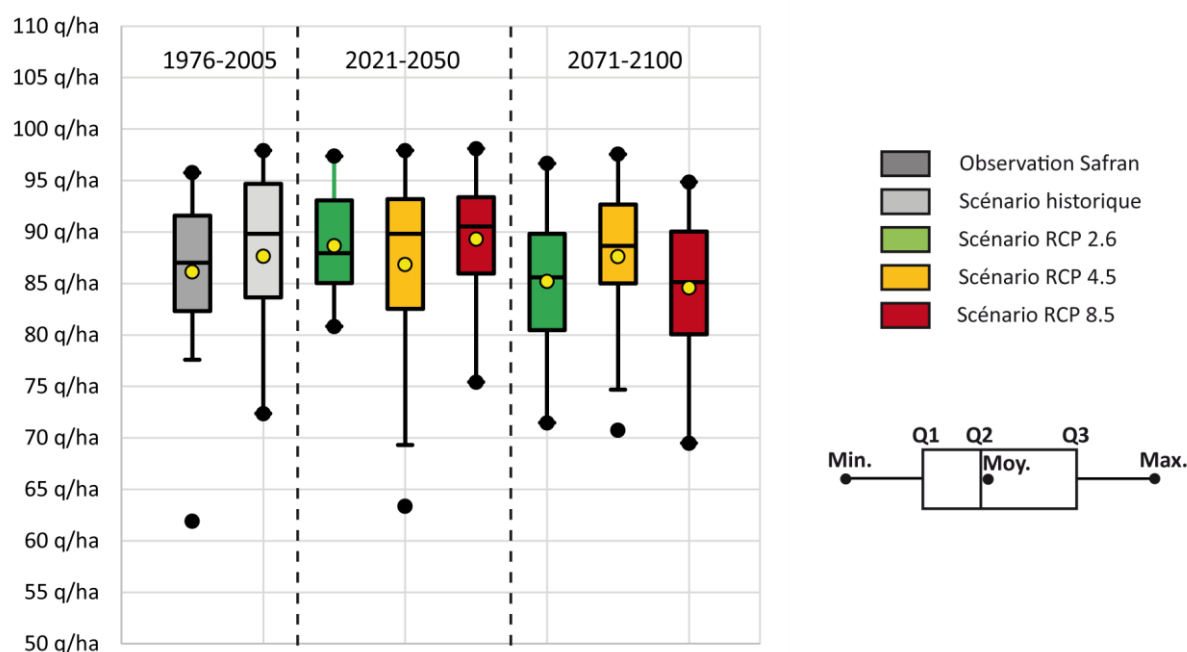
Pris séparément des autres indicateurs, l'évitement de la période estivale par l'anticipation des stades phénologiques avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 permettrait au blé de bénéficier de conditions plus favorables à la montaison et au remplissage des grains. Le calcul de ces indicateurs en tenant compte de l'évolution des stades de développement dans le calendrier expose des résultats différents de l'approche agroclimatique classique.

Pour estimer les conséquences de l'exposition du blé à l'échaudage thermique et au déficit hydrique, nous avons repris l'équation de réponse de la variété Arminda (chapitre 3) à ces facteurs limitants en contexte de sol profond (Gate, 1995). Certes, cette équation est valide pour une variété, mais

¹¹⁰ Pour rappel, le confort hydrique correspond au rapport ETR/ETM. C'est un indicateur de satisfaction en eau variant de 0 (stress hydrique exacerbé) à 1 (conditions optimales).

nous l'utilisons pour estimer l'impact de ces deux aléas sans autres facteurs limitants. En considérant qu'une variété à gros grains (PMG de 55 g ; variété à petits grains) pour 18 000 grains/m² réponde de la même manière qu'Arminda à cette interaction température x déficit en eau, le potentiel de rendement en période de référence est de 88 q/ha (**Figure 168**). Les 7 jours d'échaudage thermique et les 40 mm de déficit hydrique amputent donc le rendement de 12 q/ha. A moyen terme (2050), l'anticipation des stades permettant de stabiliser l'exposition du blé aux jours de chaleur et au manque d'eau, le rendement serait inchangé. C'est le même constat à long terme (2100) avec le scénario RCP 4.5. En revanche, avec le scénario RCP 2.6, la légère augmentation du manque d'eau engendre une réduction du rendement de -2 q/ha par rapport à la période de référence. Pour le scénario RCP 8.5, le rendement diminuerait de -3 q/ha. La diminution du déficit hydrique liée à l'évitement de la sécheresse estivale permet de « compenser », en partie, l'augmentation des jours de chaleur. L'anticipation des stades limite la perte de rendement qui resteraient relativement faible, notamment au regard de leur variabilité interannuelle qui peut atteindre parfois jusqu'à 20 q/ha d'une année à l'autre. Néanmoins, il conviendra de rester toujours vigilant à cette variabilité. A titre d'exemple avec le scénario RCP 4.5 à moyen terme, une perte de rendement équivalente à celle de 1976 ne serait exclue.

Figure 168 : Evolution du rendement théorique du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP (équation de réponse de la variété Arminda à l'interaction température x déficit hydrique)



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulation bioclimatique à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France ; calculs fondés sur l'équation de réponse du PMG de la variété Arminda à l'interaction déficit hydrique x nombre de jours d'échaudage thermique entre l'épiaison et la maturité physiologique en contexte de sol profond et sans autre stress (Gate, 1995) ; nous avons retenu un PMG de 55 g pour 18 000 grains/m²).

6.2.4. Une diminution des gelées

Les risques de gel à -20°C durant le tallage n'est pas présent en Plaine de Caen. En revanche, la température peut ponctuellement descendre à -10 °C l'hiver, ce qui peut affecter les blés non endurcis. Sur la période actuelle, le risque est estimé à 4 années sur 30 en Plaine de Caen (maximum

de 2 jours). A l'horizon 2050, l'occurrence diminuerait pour se situer autour de 1 à 2 années sur 30. A l'horizon 2100, une seule occurrence est relevée avec le scénario RCP 2.6 tandis qu'elles disparaissent avec les deux autres scénarios.

Les gelées au seuil de -5 °C lors de la levée sont également très rares. Sur la période de référence 1976-2005, elles sont observées seulement en 1996 (2 jours) et en 1998 (10 jours). Le scénario historique simule toutefois un excès de cette occurrence avec 9 années sur 30 avec au moins une journée de gel à -5 °C lors de la levée. Sur la Normale 2021-2050 seulement deux à trois années seraient concernées. A l'horizon 2100, une occurrence pourrait arriver au moins 4 et 6 années avec les scénarios RCP 2.6 et 4.5 tandis qu'elles disparaîtraient avec le scénario RCP 8.5. Il convient de préciser ici que, dans le cas de semis plus précoces, autour du 20 octobre, la levée n'est pas exposée à cet aléa, et ce, même en période de référence.

Sans surprise, l'élévation de la température hivernale engendrerait une diminution des gelées hivernales et donc du risque de disparition de plantes et de nécroses foliaires sur le blé. L'avancement de la phénologie ne serait pas assez conséquent pour rendre la floraison vulnérable aux dernières gelées printanières. Dans le cas du scénario RCP 8.5, simulant l'avancée des stades la plus prononcée, ces gelées tardives pourraient même disparaître.

6.2.5. Hausse de l'occurrence de basses températures sur la période proche de la méiose

Sur la période de référence 1976-2005, à Caen, 3 années sur 30 connaissent au moins 1 journée avec une température minimale inférieure ou égale à 4°C au cours de la méiose (maximum de 2 jours dans l'année ; **Tableau 41**). Cette exposition aux basses températures se renforcerait légèrement dans le futur proche avec entre 5 et 6 années sur 30 selon les scénarios RCP. A la fin du 21^e siècle, la vulnérabilité augmenterait encore un peu avec le scénario RCP 8.5 puisque 8 années seraient concernées. Les basses températures durant la méiose seraient donc un risque plus présent qu'actuellement du fait de la plus grande précocité dans le développement des plants de blé mais l'occurrence resterait relativement faible. Néanmoins, il convient de préciser que dans le cas de semis précoces (25 octobre), l'exposition à ces basses températures serait plus importante : 11 et 9 années avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 à long terme.

Tableau 41 : Evolution de l'occurrence de températures minimales inférieures ou égales à 4 °C en Plaine de Caen sur la période proche de la méiose aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP

	1976-2005		2021-2050			2071-2100		
	SAFRAN	Scénario historique	Scénario RCP 2.6	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 2.6	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Nb d'années avec au moins 1 occurrence	03/30a	03/30a	05/30a	05/30 a	06/30a	04/30a	05/30a	08/30a
Nbj max	2 j	2 j	2 j	4 j	2 j	2 j	4 j	3 j

Réalisation : François Beauvais (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

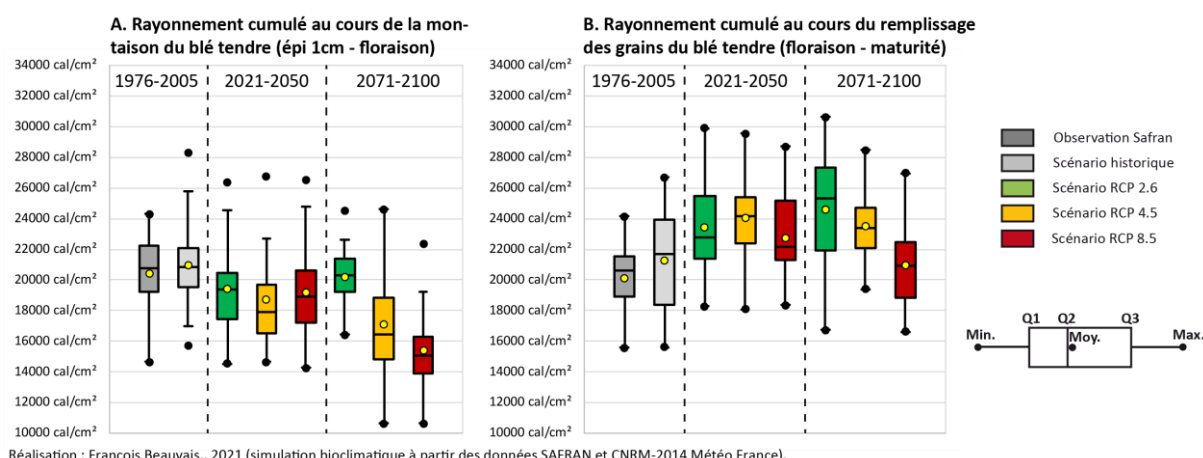
6.2.6. Déficit de rayonnement solaire en début de montaison

L'avancée des stades phénologiques pourrait également engendrer une diminution du rayonnement solaire cumulé lors de la montaison (**Figure 169 A**). A mesure que la température hivernale s'élève, le stade épi 1 cm arrive plus tôt, en sortie d'hiver météorologique pour les scénarios les plus chauds. C'est un moment de l'année où le rayonnement n'est pas aussi élevé qu'au printemps (jours courts et soleil bas¹¹¹). A relativement brève échéance (2021-2050), le rayonnement cumulé pourrait passer de 20 919 cal/cm² (scénario historique) à 19 435 cal/cm² avec le scénario RCP 2.6 ; à 18 739 cal/cm² avec le scénario RCP 4.5, et à 19 208 cal/cm² avec le scénario RCP 8.5. La réduction est de l'ordre de 7 à 10 %. A long terme, le déficit pourrait atteindre -18 % (17 076 cal/cm²) avec le scénario RCP 4.5 et -27 % (15 561 cal/cm²) avec le RCP 8.5. Pour illustrer ce déficit de rayonnement avec le dernier scénario, 29 années sur 30 auraient un rayonnement cumulé inférieur à celui du 1^{er} quartile de la série statistique relative à la période de référence. En s'intéressant plus particulièrement aux phases phénologiques composant la montaison, dans le cas du scénario le plus pessimiste, la réduction du rayonnement cumulé pourrait être de près de -50 % pour la période phénologique « épi 1 cm - 2 nœuds » et de -30 % entre le stade 2 nœuds et la méiose. Ensuite jusqu'à la floraison cette réduction est moins importante, autour de -10 %. C'est entre la méiose et la floraison, que le blé est le plus sensible au défaut de rayonnement car c'est à ce moment du cycle qu'est déterminé le nombre de fleurs fertiles. A l'exception du scénario RCP 8.5, le cumul de rayonnement resterait équivalent à la période de référence sur cette phase.

En revanche, le remplissage des grains profiterait d'un rayonnement plus important dès l'horizon 2050 (**Figure 169 B**). Il passerait de 21 273 cal/cm² avec le scénario historique à 23 403 cal/cm² avec le scénario RCP 2.6 ; 20 460 cal/cm² avec le scénario RCP 4.5 ; et 22 766 cal/cm² avec le scénario RCP 8.5. La hausse serait alors de +7 à +10 %. La tendance se poursuit à l'horizon 2100 avec une augmentation de +16 % (24 595 cal/cm²) et de +10 % (23 476 cal/cm²) pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5. Dans le cas du scénario RCP 8.5, la situation serait équivalente à la période de référence puisqu'en raison de l'avancée de la végétation, le blé ne profiterait pas de l'augmentation du rayonnement.

¹¹¹ A la latitude de la Normandie, la durée astronomique du jour et la hauteur du soleil à midi sont : 1^{er} mars (10,6 h et 25,2°) ; 1^{er} avril (12,4 h et 36,1°) ; 1^{er} mai (14,2 h et 45,8°).

Figure 169 : Evolution du rayonnement cumulé lors de la montaison et du remplissage des grains du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulation bioclimatique à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France).

Compte tenu de la réduction du rayonnement solaire cumulé au cours de la montaison, la température doit augmenter sur cette période du cycle pour que le quotient photothermique ne décline pas. Or, nous avons vu précédemment que l'avancée de la végétation dans le calendrier, en raison de la réduction des phases de levée et de tallage, exposerait la montaison et le remplissage des grains à des températures équivalentes à celles observées sur la période de référence, et ce, quel que soit le scénario. Par conséquent, le quotient photothermique serait plus faible au début de la montaison, du stade épi 1 cm à la méiose (Tableau 42). Ainsi ce quotient photothermique d'environ 30 cal/cm²/°C entre les stades épi 1 cm et 2 nœuds en période de référence, chuterait à environ 20 cal/cm²/°C à l'horizon 2050 et à 15 cal/cm²/°C à long terme pour le scénario RCP 8.5. Dans le futur proche, cet indicateur serait légèrement plus faible entre les stades 2 nœuds et méiose ce qui pourrait affecter le nombre de grains/épis. Mais c'est surtout à long terme que les scénarios RCP 4.5 et 8.5 seraient les plus défavorables : chute à 23 et 21 cal/cm²/°C contre près de 30 cal/cm²/°C en période de référence. Le bilan serait ensuite inchangé pour la toute fin de montaison, soit autour de la floraison. Ce quotient photothermique augmenterait ensuite pendant le remplissage des grains, avec un gain de 10 à 20 %, à l'exception du scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100.

Tableau 42 : Evolution du quotient photothermique des phases phénologiques comprises entre le stade épi 1 cm et la maturité physiologique en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP

	1976-2005		2021-2050			2071-2100		
	SAFRAN	Scénario hist	Scénario RCP 2.6	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5	Scénario RCP 2.6	Scénario RCP 4.5	Scénario RCP 8.5
Epi 1 cm - 2 nœuds	31,3	30,2	24,8	20,9	21,8	24,1	17,4	15,6
2 nœuds - Méiose	29,1	29,8	27,8	27,1	28,6	29,2	23,2	21,4
Méiose - Epiaison	28,1	27,9	27,8	26,4	28,2	28,1	28,7	24,9
Epiaison - Floraison	26,6	27,8	28,3	30,1	28,1	30,3	29,1	26,1
Floraison - Grain laiteux	26,1	27	28,7	29,2	27,6	30	28,6	25,2
Grain laiteux - grain pâteux	24,7	25,1	30	29,8	28	33,7	29,6	25,5
Grain pâteux - maturité	22,7	25	27,5	28,7	27,9	27,7	28,2	25,6

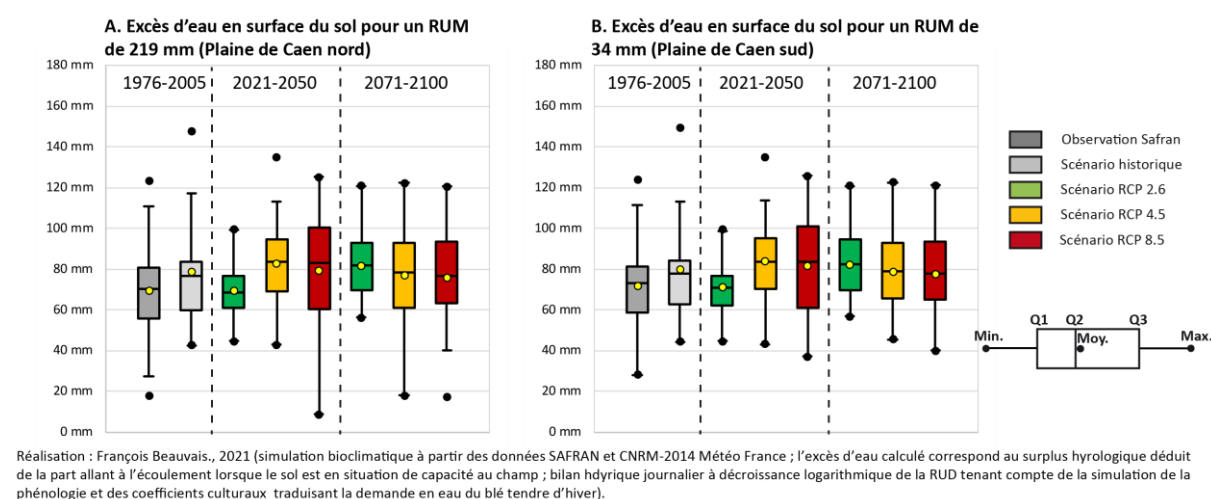
Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

Ici encore, avec ce paramètre, l'approche phénoclimatique rebat les cartes contrairement à l'approche agroclimatique qui, sans prise en compte de l'avancée de la phénologie, ne permet pas de mettre en avant l'exposition du blé à cet aléa.

6.2.7. Stabilisation des excès d'eau en surface du sol

L'excès d'eau en surface d'une parcelle de blé tendre entre le semis et le stade 2 nœuds en Plaine de Caen, en déduisant la part allant à l'écoulement, est de 70 mm sur la période de référence 1976-2005 (Figure 170). Il est quasi-équivalent entre les sols épais et minces de la Plaine de Caen car le semis débutant le 15 novembre, le sol est déjà en situation de capacité au champ¹¹². Lorsque le sol est en capacité au champ et que les surplus hydrologiques sont importants, l'eau stagnant en surface peut ennoyer la plante. Le scénario historique simule un excès d'eau de 80 mm. D'ici 2050 et 2100, il resterait globalement inchangé à l'exception du scénario RCP 2.6 à court terme où une baisse de 12 % est attendue. Les valeurs extrêmes restent dans les gammes de la période de référence.

Figure 170 : Evolution des excès d'eau en surface du sol entre le semis et le stade 2 nœuds en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



6.2.8. Hausse des fortes précipitations pendant le remplissage des grains

Sur la période de référence 1976-2005, 20 années sur 30 connaissent au moins une journée où le cumul pluviométrique journalier est supérieur ou égal à 10 mm (maximum de 5 jours) sur la période très sensible grain laitieux-maturité physiologique avec les données observées du modèle SAFRAN (Tableau 43). En moyenne, cet aléa intervient 1,2 jour par an au cours de cette phase du cycle. Le scénario historique ne simule que 15 années concernées sur 30. En se référant à ce scénario,

¹¹² Une différence serait observée entre les deux sols si on calculait ces excès d'eau plus tôt dans l'automne, puisque la RUD du sol épais mettant plus de temps à se recharger, les surplus sur la période précédant le cycle sont plus faibles que dans le cas du sol mince qui arrive plus vite à saturation. Aussi, l'excès d'eau est calculé en considérant un sol nu à l'automne avant le semis. Le coefficient cultural utilisé est par défaut de 0,1. La demande évapotranspiratoire est donc plus faible que pour un bilan hydrique classique, ce qui explique pourquoi le sol se recharge plus vite que pour les indicateurs agroclimatiques reposant sur un bilan hydrique classique sans coefficients culturaux (cf. sous-partie 5.1.7.)

L'occurrence devrait augmenter légèrement à l'horizon 2050 puisque le remplissage des grains serait exposé 18 à 21 années sur 30 à au moins une journée de fortes précipitations. La moyenne augmente légèrement jusqu'à 1,5 jour mais le nombre maximal de jours de fortes précipitations sur une année n'augmente pas. A long terme, l'occurrence reste équivalente au court terme avec les scénarios RCP 2.6 et 4.5 mais elle se renforce un peu plus avec le scénario RCP 8.5, avec 24 années sur 30 concernées par le risque et une moyenne de 1,6 jour.

Concernant les fortes précipitations journalières au seuil de 20 mm, seulement 3 années sur 30 sont concernées par au moins une occurrence sur la période 1976-2005. Elles restent équivalentes dans un futur proche, malgré deux années supplémentaires au bilan avec le scénario RCP 8.5. Egalement, il n'y a pas d'évolution avec les scénarios RCP 2.6 et 4.5 dans un futur lointain. Le nombre d'années concernées s'élève à 8 sur 30 avec le scénario RCP 8.5 mais il s'agit à chaque fois d'une seule occurrence.

Tableau 43 : Evolution de l'occurrence des fortes précipitations journalières aux seuils de 10 et 20 mm entre le stade grain laiteux et la maturité physiologique en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP

		RR 10 mm			RR 20 mm		
		Nb années avec au moins 1 occurrence	Moyenne	Nbj max	Nb années avec au moins 1 occurrence	Moyenne	Nbj max
1976-2005	SAFRAN	20/30a	1,2 j	5 j	03/30a	0,2 j	4 j
	Scénario historique	15/30a	1 j	5 j	03/30a	0,1 j	1 j
2021-2050	Scénario RCP 2.6	18/30a	1,1 j	4 j	03/30a	0,1 j	2 j
	Scénario RCP 4.5	19/30a	1,2 j	4 j	05/30a	0,2 j	3 j
	Scénario RCP 8.5	21/30a	1,5 j	5 j	05/30a	0,2 j	2 j
2071-2100	Scénario RCP 2.6	19/30a	1,3 j	5 j	05/30a	0,2 j	1 j
	Scénario RCP 4.5	21/30a	1,5 j	4 j	05/30a	0,2 j	1 j
	Scénario RCP 8.5	24/30a	1,6 j	4 j	08/30a	0,3 j	1 j

Réalisation : François Beauvais (données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France)

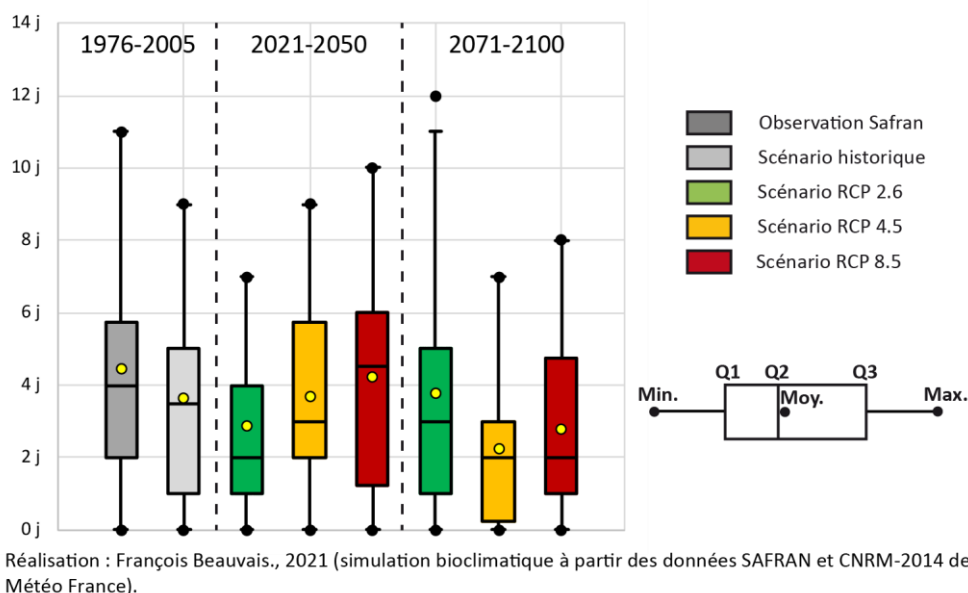
Par ailleurs, nous avons déjà vu que l'avancée des stades phénologiques exposerait la montaison du blé à des températures aussi fraîches qu'en période de référence. Ces basses températures favorisent l'allongement des entre-nœuds et donc la longueur des tiges, plus sensibles à la verse. Ces températures ont l'avantage de procurer un nombre d'épis et de grain par m² plus important, mais renforce également le risque de verse. L'élongation de la tige est plus importante lorsque la durée du jour est faible, or l'anticipation des stades irait dans ce sens (jours courts).

6.2.9. Une réduction des jours de pluie lors de la période de récoltes

Il pleut en moyenne un peu plus de 4 jours au cours des deux semaines succédant à la « maturité récolte » du blé avec les données observées du modèle SAFRAN sur la période 1976-2005. Avec le scénario historique ce bilan est d'un peu moins de 4 jours (**Figure 171**). A l'horizon 2050, il n'y a pas d'évolution hormis une réduction d'une journée de précipitation avec le scénario RCP 2.6. A

long terme, le bilan reste inchangé avec le scénario RCP 2.6. Mais les simulations relatives aux scénarios RCP 4.5 et 8.5 montrent une amélioration avec seulement 2 jours de pluie sur les 15 jours succédant à la récolte. Une réduction de la variabilité interannuelle serait observée. Le maximum de jours de pluie n'excéderait pas 7 à 8 jours.

Figure 171 : Evolution du nombre de jours de pluie dans les 15 jours succédant la maturité récolte en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP



Finalement, l'élévation des températures entraînerait une réduction de la durée des périodes phénologiques hivernales (levée et tallage). De ce fait, les dates d'apparition des stades phénologiques seraient avancées dans le calendrier. Cette anticipation serait plus ou moins prononcée selon les scénarios. A long terme, la maturité physiologique interviendrait 2 à 5 semaines plus tôt. Les travaux de récolte pourraient alors s'effectuer au début du mois de juillet, voire fin juin dans le cas d'années très précoces.

Cette anticipation des stades phénologiques permettrait, dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5, un évitement naturel du chevauchement de la fin du cycle avec la période estivale et ses contraintes. L'exposition du remplissage des grains à l'échaudage thermique serait alors contenue. Le déficit hydrique cumulé au cours du cycle pourrait même être légèrement réduit. Ces résultats pourraient constituer une bonne nouvelle pour la céréaliculture caennaise puisque ces deux aléas sont les plus redoutés par la filière dans la mesure où la stagnation des rendements français de blé tendre observés sur la période historique leur est attribuée. Toutefois, cette observation cache l'apparition future de nouvelles conditions défavorables jusqu'à présent ignorées. La méiose aurait lieu plus tôt dans l'année ce qui pourrait l'exposer davantage à de basses températures. Il en va de même pour la montaison qui s'effectuerait plus tôt, à un moment de l'année où le rayonnement est plus faible. Ces aléas pourraient perturber d'une part la fécondation du blé, mais également sa croissance et notamment le nombre d'épis/m². Les hivers doux, quant à eux, provoqueraient une diminution de la pression liée aux gelées mais engendreraient une baisse importante du nombre de jours de vernalisation. Dans le cas de variétés non alternatives, ces dernières ne pourraient pas entamer leur montaison à la sortie de l'hiver et le blé n'enclencherait pas son passage de l'état végétatif à

reproducteur. L'évolution de la vulnérabilité à ces aléas selon les trois scénarios aux horizons 2050 et 2100 sont synthétisés par le **Tableau 44**. La **Figure 172** présente quant à elle l'exposition aux aléas pour le scénario RCP 8.5, le plus pessimiste mais probable puisqu'il correspond à la prolongation de la trajectoire actuelle des émissions de GES.

Pour le scénario RCP 2.6 visant la réduction des gaz à effets de serre à l'horizon 2100 (forçage de 2,6 W/m² contre 3,18 en 2020), les changements climatiques envisagés sont limités. Cependant, la faible élévation de la température n'engendrerait pas une anticipation phénologique suffisante pour contrer la légère hausse du déficit hydrique. Sur ce paramètre, le scénario « optimiste » apparaît donc paradoxalement plus défavorable, alors même qu'il simule les sécheresses estivales les moins prononcées.

Ces tendances sont également constatées pour le sud-est de la région, dans la plaine d'Evreux (Beauvais et al., 2019a et 2019b).

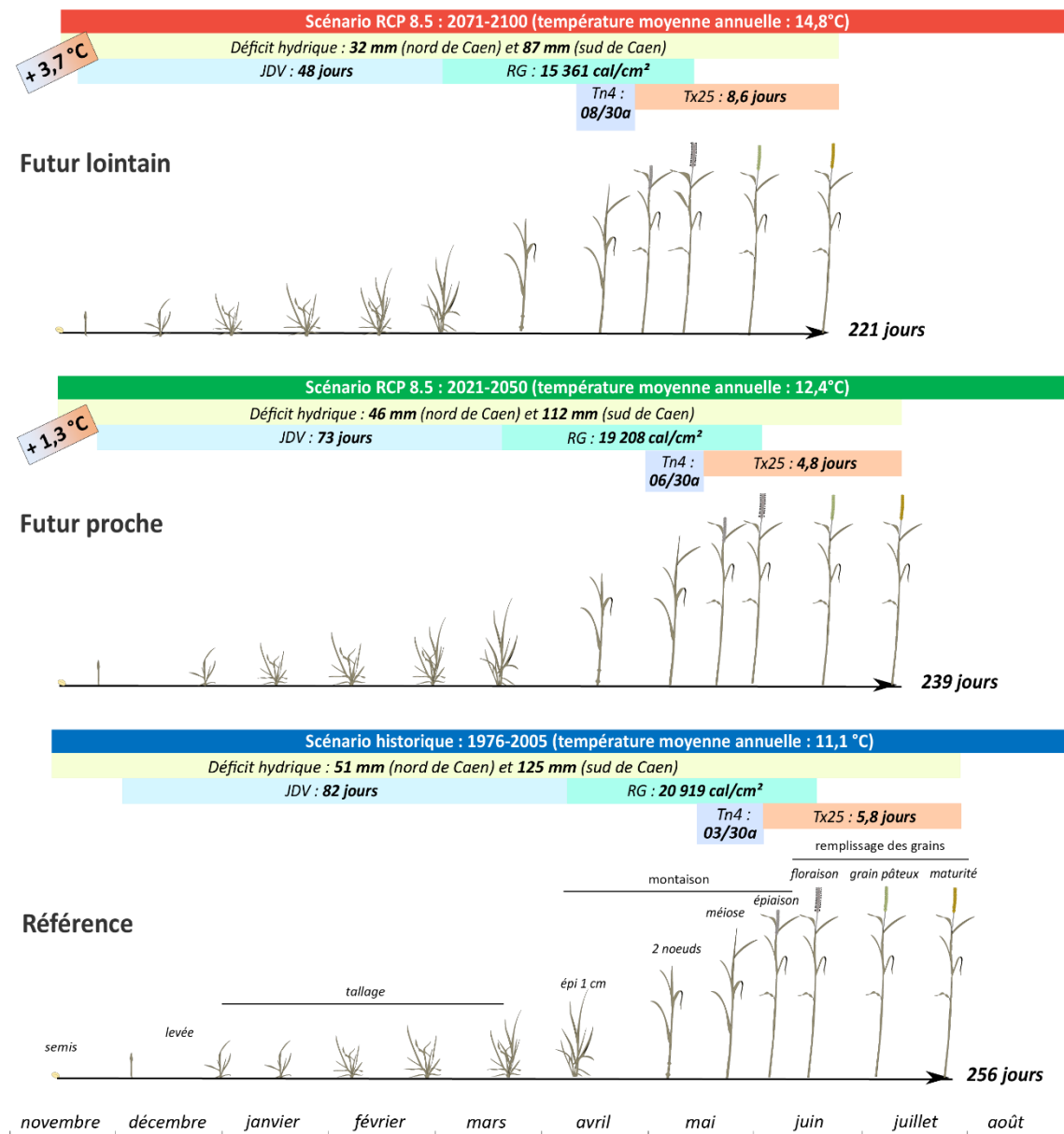
Les résultats de ce chapitre coïncident avec les tendances observées dans l'état de l'art (partie 2.1.5.3), notamment pour ce qui concerne la réduction de la durée du cycle. Toutefois, l'anticipation des stades, constatée dans cette recherche, est plus prononcée d'une dizaine de jours que pour les études de Gate (2008) et de Gouache et al (2012), ce qui pourrait s'expliquer notamment par l'utilisation de modélisations climatiques, de scénarios et de sites différents. C'est probablement la raison pour laquelle l'évitement des stress de fin de cycle est renforcé pour notre étude par rapport à ces deux dernières. Le même constat est également effectué en comparaison des résultats du programme CLIMATOR (2007-2010), exposant que l'anticipation des stades ne serait pas suffisante pour contrer l'augmentation du déficit hydrique et des jours d'échaudage thermique. En s'intéressant aux résultats dégagés par Trnka et al (2014) à l'échelle européenne, la réduction de la durée du cycle à moyen terme (horizon 2060) est similaire. Il en va de même pour l'augmentation des jours de chaleur pendant le remplissage, le faible risque de sécheresse (détecter sur certains sites à l'exception du sud de l'Europe) et la baisse du rayonnement solaire cumulé par la plante en raison de l'avancée des stades dans le calendrier. Mais contrairement à cette publication, nous ne dégageons pas, en Plaine de Caen, d'augmentation du surplus hydrologique entre le semis et la floraison. Trnka et al (2014) détectent par ailleurs une hausse du risque des gelées de printemps en Europe (en lien avec l'avancée de la phénologie), non simulée dans cette thèse (à l'exception des basses températures à la méiose) ce qui peut s'expliquer par le climat océanique de la Normandie.

Tableau 44 : Synthèse de l'exposition du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 à partir d'une approche phénoclimatique

Aléa	Périodes phénologiques	Conséquence associée	Safran	Scé hist	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
			1976-2005	1976-2005	2021-2050	2021-2050	2021-2050	2071-2100	2071-2100	2071-2100
Réduction durée du tallage	1ère talle - épi 1 cm	Baisse du nombre de pieds/épis			+	+	+	+	++	+++
Réduction durée remplissage des grains	Floraison- maturité	Baisse du poids des grains								
Déficit de vernalisation	Levée - épi 1 cm	Le blé ne passe pas à l'état reproducteur			+	+	+	+	++	+++
Déficit hydrique RUM 219 mm	Totalité du cycle	Réduction de la photosynthèse et de l'asimilation du CO ₂ ; impact sur le remplissage des grains	+	+	+	+	+	+	+	+
Déficit hydrique RUM 34 mm	Totalité du cycle		+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Echaudage thermique	Floraison- maturité	Arrêt du remplissage des grains	+	+	+	+	+	+	+	++
Excès thermique	Période proche méiose et floraison									
Basses températures méiose	Proche méiose	Déficit de fécondation	+	+	+	+	++	+	+	++
Gelées levée	Levée	Disparition de plantes	+	+	+	+	+	+	+	
Gelées tallage	1ère talle - épi 1 cm	Nécroses foliaires	+	+						
Gelées montaison	Epi 1 cm - floraison	Gel d'épis								
Déficit de rayonnement (montaison)	épi 1 cm - floraison	Impact sur la croissance et baisse du nombre d'épis/m ²	+	+	++	++	++	+	+++	+++
Faible quotient photothermique (montaison)	épi 1 cm - floraison	Baisse du nombre d'épis/m ²	+	+	++	++	++	+	+++	+++
Déficit de rayonnement	Floraison- maturité	Impact sur le remplissage des grains	+	+						
Excès d'eau	Semis - 2 nœuds	Asphyxie, mauvaise assimilation des minéraux	++	++	++	++	++	++	++	++
Fortes précipitations (verse)	Grain laiteux - maturité	Risque de verse physiologique	+	+	+	+	+	+	+	++
Précipitations récoltes	maturité récolte + 15 jours	Retard de la récolte	++	++	++	++	++	++	+	+

Légende : exposition faible (+) ; exposition moyenne (++) ; exposition forte (+++) ; l'absence de signe signifie que l'aléa est inexistant ou très faible.
 Exposition du blé tendre d'hiver aux aléas climatiques déterminée par approche experte d'après les résultats des simulations bioclimatiques (indicateurs phénoclimatiques).
 Réalisation : François Beauvais (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 Météo France),

Figure 172 : Evolution des principaux stades de la phénologie du blé tendre et des principaux indicateurs phénoclimatiques associés aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon le scénario RCP 8.5



François Beauvais., 2020

Simulation bioclimatique (simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 de Météo France ; critère photopériodique de 11h au stade épi 1 cm en considérant une vernalisation non limitante ; températures des projections en tenant compte du biais froid du modèle sur la base des écarts entre le scénario historique et l'observation sur la période post-rupture 1987). Avec :

JDV = jours disponibles pour la vernalisation (température moyenne entre 3 et 10°C) pendant le tallage herbacé hivernal ;

RG = rayonnement solaire cumulé au début de la montaison ;

Tx25 = nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 25°C pendant le remplissage en amidon des grains ;

Tn4 x/30a = nombre d'années avec au moins une journée où la température minimale est inférieure à 4°C (période proche méiose).

Conclusion du chapitre 6

En simulant la phénologie du blé sur la période historique, on constate que le cycle s'est raccourci de deux semaines entre les Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020. Cette anticipation des stades permet en partie de limiter l'exposition à l'échaudage thermique, avec un chevauchement moins long de la période de remplissage des grains sur la saison estivale. Toutefois, trois jours d'échaudage supplémentaires sont constatés, ce qui peut expliquer une réduction théorique du rendement de 5 q/ha. En contrepartie, l'augmentation du rayonnement solaire disponible (modification de la nébulosité) permet une légère amélioration du quotient photothermique pour la montaison (+5 %) et le remplissage des grains (+ 9 %), ce qui traduit théoriquement une augmentation du nombre de grains/épis. Le déficit hydrique cumulé sur la totalité du cycle n'a quant à lui pas augmenté, grâce à l'avancée des stades. De ce fait, on pourrait faire l'hypothèse que la stagnation des rendements observée depuis les années 1990 serait principalement liée à l'occurrence plus importante des jours de chaleur sur le cycle de la plante.

D'ici 2100, le cycle pourrait se réduire de 2 à 5 semaines, selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5, en comparaison à la période de référence 1976-2005 retenue pour la modélisation. Dans l'hypothèse du scénario le plus chaud, la moisson aurait lieu entre la fin du mois de juin et le début du mois de juillet. Le blé évite alors les vagues de chaleurs de ce dernier mois. L'augmentation de cet aléa serait alors limitée en moyenne à trois jours. L'avancée des stades permettrait également de contrer la sécheresse estivale. De ce fait, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle serait même en légère diminution, permettant de compenser en partie les pertes de rendement liées à la hausse des jours de chaleur. En ne considérant que ces deux aléas, le potentiel de rendement serait réduit de 3 q/ha. Néanmoins, cette anticipation des stades pourrait rendre le blé tendre vulnérable à de nouveaux aléas. La montaison débutant plus tôt dans le calendrier, elle serait exposée à un déficit de rayonnement tandis que les températures rencontrées seraient équivalentes à la période de référence à cause, une nouvelle fois, de cette avancée des stades. En conséquence le quotient photothermique serait drastiquement réduit, passant à titre d'exemple de 30 à 21 cal/cm²/°C sur la période phénologique « 2 nœuds – méiose ». Ce dernier stade se déroulerait à la fin du mois d'avril, contre fin mai en période de référence. Les basses températures sur cette phase sensible du cycle seraient donc plus nombreuses, ce qui représente un risque pour la fertilité du blé. L'occurrence d'au moins une journée où la température minimale est inférieure ou égale à 4 °C passerait de 3 à 8 années sur 30 sur la période proche méiose. La douceur hivernale engendrerait quant à elle une disparition des fortes gelées lors du tallage mais également une réduction drastique des jours de vernalisation, ce qui pose la question de l'alternativité des variétés.

Conclusion de la partie 2

Le blé en Plaine de Caen peut être exposé à plusieurs aléas climatiques et pédoclimatiques (échaudage thermique, déficit hydrique, défaut de rayonnement, excès d'eau, etc.). C'est pourquoi les exploitants adaptent les dates de semis et les variétés en conséquence afin que les stades se déroulent aux moments opportuns. Un contraste apparaît entre le nord de la Plaine agricole et le sud. La première entité est recouverte de sols épais, dotés de bonnes réserves en eau ce qui limite le stress hydrique de la plante. Ce n'est pas le cas dans la seconde où les exploitants doivent semer des variétés au cycle plus court pour éviter les sécheresses de la fin du cycle.

Malgré la crainte de ces aléas climatiques, le changement climatique ne semble pas constituer une inquiétude prononcée pour les agriculteurs rencontrés. Des évolutions climatiques sont toutefois constatées par certains d'entre eux, principalement : la hausse des températures hivernales, l'avancée des récoltes, les moissons perturbées par les précipitations et le déficit hydrique pour quelques-uns.

De 1961 à aujourd'hui, le climat de la Plaine de Caen a évolué. Le déficit hydrique pour la végétation a augmenté sur la période du printemps et du début de l'été (avril - juillet). La légère augmentation des précipitations sur ces saisons ne compense pas celle de l'évapotranspiration. Sur cette même période de l'année le rayonnement disponible pour la photosynthèse est en légère hausse. Les jours d'échaudage thermique pendant la formation et le remplissage des grains sont plus nombreux. Le nombre de jours disponibles pour la vernalisation diminue mais les variétés de type hiver ne sont pas encore remises en cause. D'ici 2050 et 2100, ces évolutions devraient se renforcer fortement.

Mais en mobilisant une approche phénoclimatique, notre étude montre que la modification des cycles végétatifs du blé tendre d'hiver l'expose différemment aux aléas. Entre 1961 et 2020, en considérant que la variété observée au champ aurait été semée chaque année à la même date, le cycle s'est raccourci d'environ deux semaines. Les périodes phénologiques ont lieu plus tôt. Par conséquent, il n'y a pas d'évolution significative du déficit hydrique sur cette période en raison d'un chevauchement moins important de la fin du cycle sur la période estivale. Néanmoins, cette anticipation n'est pas suffisante pour contrer complètement la hausse du nombre de jours d'échaudage thermique bien qu'elle permet de la limiter. La montaison et le remplissage des grains s'effectuant plus tôt, ces phases phénologiques ne profitent pas de la hausse du rayonnement global disponible. Mais le cumul reste stable et le quotient photothermique est en légère hausse grâce à l'augmentation de la température. D'ici 2050, la réduction du cycle du blé pourrait être de l'ordre de deux semaines par rapport à la période de référence. A la fin du siècle elle serait même de cinq semaines avec le scénario le plus chaud. Le cycle du blé se clôturerait avant le début de l'été et la céréale échapperait alors aux sécheresses estivales. Néanmoins, il convient de préciser ici que sans réduction des émissions de gaz à effet de serre, le déficit hydrique serait un peu plus prononcé à cause d'un évitement moins important. L'anticipation des stades phénologiques contiendrait également l'exposition aux fortes chaleurs puisque l'augmentation de l'échaudage thermique serait d'environ trois jours. La montaison pourrait souffrir d'un déficit de rayonnement puisqu'elle s'effectuerait dès la sortie de l'hiver, moment de l'année où les jours sont courts. Également, la méiose ayant lieu plus tôt, elle ne profiterait également pas de la hausse du rayonnement solaire et

pourrait être exposée à de basses températures. Enfin, les hivers doux ne permettraient pas aux variétés de blé de cumuler assez de jours de froid. Des conséquences sont alors attendues sur la fécondation du blé tendre d'hiver, sa croissance et le remplissage des grains.

Cette recherche démontre l'intérêt des modèles phénoclimatiques dans le cadre des études d'impacts réalisées en amont de l'adaptation de la filière agricole au changement climatique.

Partie 3

Approches expérimentales et multiscalaires pour l'étude bioclimatique des agrosystèmes

Introduction

Les résultats présentés dans la partie 2 reposent sur une analyse stationnelle puisque la résolution des mailles SAFRAN de 8x8 km amène à considérer le climat de la Plaine de Caen comme une entité homogène. Pourtant les témoignages des exploitants montrent que les conditions climatiques vécues par le blé tendre d'hiver diffèrent au sein de la Plaine agricole. Nous supposons alors qu'elles ne sont pas les mêmes en tous points de cette région agricole, ce qui pourrait exposer des différences d'exposition de la plante à certains aléas. Nous avons voulu vérifier cette hypothèse sur la diversité du climat à méso-échelle en effectuant une analyse comparative des données météorologiques des stations de la Plaine de Caen. Par ailleurs, ce réseau de mesure ne couvrant pas l'ensemble de la Plaine, nous avons effectué une démarche exploratoire de mesures expérimentales mobiles à deux reprises pour des températures diurnes et nocturnes. Le but est d'observer si la topographie et l'occupation du sol peuvent expliquer à échelles fines (petites plaines agricoles et vallées) des différences de températures. Cette même question s'est posée au sein de la parcelle d'Anguerny. Au-delà des conditions atmosphériques, cette partie présente un autre essai de mesures expérimentales en pédologie pour comparer la RUD calculée avec le bilan hydrique et celle déterminée à partir de relevés de terrain.

Par ailleurs, l'approche multiscalaire peut également être mobilisée à une échelle supérieure. L'agrosystème céréalier normand s'intègre dans l'agrosystème céréalier français. Par conséquent, pour analyser les possibles conséquences du changement climatique sur la céréaliculture française nous proposons de dupliquer la méthode phénoclimatique mobilisée dans la partie 2 pour 7 plaines céréalières françaises, dont la Plaine de Caen. L'idée est également d'estimer si la Normandie pourrait rester une place forte de la céréaliculture par rapport aux autres régions agricoles productrices de blé tendre d'hiver dans un contexte climatique différent. Enfin, les agrosystèmes céréaliers intègrent dans leurs rotations culturales d'autres productions végétales ayant par ailleurs des débouchés essentiels dans l'équilibre économique des exploitations agricoles. C'est pourquoi cette approche a également été dupliquée pour la culture de lin fibre de printemps en Plaine de Caen.

Chapitre 7

L'approche multiscalaire en géographie pour estimer les limites sur le terrain et compléter l'étude bioclimatique

Introduction

La partie 2 retient une méthodologie centrée sur une approche à l'échelle du topoclimat en raison de la résolution des mailles SAFRAN des modèles climatiques. Cette approche apporte des résultats concluants et permet de dresser un diagnostic de l'évolution des moyennes et de la variabilité des indicateurs phénoclimatiques du blé tendre pour la Plaine de Caen. Néanmoins, on suppose qu'il subsiste une diversité spatiale du climat dans la Plaine agricole. C'est pourquoi nous avons simulé le cycle du blé avec les données de cinq stations météorologiques de cet espace sur la période 2002-2021. Nous nous sommes aussi essayés aux relevés de terrain pour vérifier cette hypothèse et discuter de l'approche bioclimatique. Par ailleurs, le bilan hydrique constitue une simplification de la réalité. Nous avons voulu vérifier si la RUD calculée à partir de cette technique d'analyse est conforme à la réalité du terrain. C'est pourquoi nous avons procédé également à des relevés pédologiques sur la parcelle d'Anguerny lors de la montaison et du remplissage des grains de la campagne 2018-2019.

Figure 173 : Station météorologique disposée dans un champ de blé tendre d'hiver en Plaine de Caen



7.1. Diversité spatiale de la température à différentes échelles

La diversité spatiale des températures dans la Plaine de Caen et de Falaise peut s'aborder à plusieurs échelles. Elle est perceptible à l'échelle de la région agricole, notamment en raison de la distance à la mer. Mais des contrastes de température sont également relevés à des échelles plus fines en raison d'effets d'abri locaux occasionnés par les formes de reliefs ou encore l'occupation du sol. Des relevés de terrain ont été menés dans deux petites vallées de la Plaine de Caen mais également aux marges de cette région agricole, dans la vallée de l'Odon, là où les dénivelés sont plus prononcés (jusqu'à environ 150 m).

7.1.1. Diversité des conditions climatiques à l'échelle de la Plaine de Caen

Si à méso-échelle régionale la Plaine de Caen forme un climat homogène, une diversité spatiale du climat est constatée à l'intérieur de cette entité en fonction de l'éloignement à la mer et de la topographie. Par conséquent, les conditions climatiques ne sont pas équivalentes en tous points de la Plaine pour le blé. Les données des stations Météo-France de Bernières-sur-Mer, Caen-Carpique, Saint-Sylvain, L'Oudon-Lieury et Damblainville sont mobilisées sur leur période de commune d'enregistrement, soit depuis le 1^{er} septembre 2001 (**Figure 174**).

La température moyenne est équivalente sur toutes les stations (11,7 °C), à l'exception de l'Oudon où elle est légèrement plus faible (11,4 °C).

La température minimale annuelle de Bernières-sur-Mer est la plus douce, avec 8,2 °C, ce qui s'explique par le fait qu'elle soit localisée sur le littoral et profite de l'inertie thermique de la Mer de la Manche. Dans les terres, les minimales sont plus faibles : 7,7 °C à Caen-Carpique ; 7,2 °C à Saint-Sylvain ; 6,4 °C à L'Oudon-Lieury. Plus l'éloignement à la mer est important et plus les températures minimales sont faibles. On notera également que la topographie locale peut accentuer les basses températures. La station de l'Oudon-Lieury est située dans un léger creux topographique, favorisant la formation et la stagnation d'air froid plus dense, ce qui peut expliquer les températures plus faibles qu'à Damblainville, pourtant un peu plus éloignée de la mer. Cette dernière station est située sur les Monts d'Eraines à 155 m d'altitude NGF et enregistre une température minimale de 7,7 °C. A l'inverse, la température maximale augmente à mesure que l'on entre dans les terres. Elle est de 15,0 °C à Bernières-sur-Mer ; 15,6 °C à Caen-Carpique ; 15,9 °C à Saint-Sylvain ; 16,3 °C à L'Oudon –Lieury et 15,6 °C sur la hauteur de Damblainville.

Ce constat pour les valeurs minimales et maximales se retrouve dans la fréquence des gelées et des jours de chaleur. Sur le littoral, il gèle en moyenne 19 fois dans l'année. 15 km dans les terres, ce cumul s'élève à 29 jours (station de Caen-Carpique). Mais ce bilan n'augmente pas en allant davantage au sud puisqu'on observe 30 jours à Saint-Sylvain et à Damblainville. Dans la vallée de l'Oudon, la situation topographique particulière favorise davantage les gelées puisque 53 jours sont observés en moyenne chaque année. Le nombre de jours de chaleur est faible à Bernières-sur-Mer avec seulement 9 occurrences dans l'année. A Caen-Carpique le seuil de 25 °C est franchi à 25 reprises. En partie sud de la Plaine, 32 et 33 jours sont recensés à Saint-Sylvain et Damblainville tandis que 38 jours sont concernés à l'Oudon-Lieury. Logiquement, le nombre d'heures atteignant ou dépassant le seuil de 25 °C est plus important à mesure que l'on pénètre dans les terres de la

Plaine de Caen. A titre d'exemple, en juin 2020, le remplissage des grains à Bernières-sur-mer n'est stoppé que durant 3 h contre 49 h dans la vallée de l'Oudon (**Tableau 45**). La brise de mer agit sur le dépassement de ce seuil. Par temps clair et calme à la fin du printemps et en été, lorsque le continent se réchauffe, une brise de mer se lève et vient rafraichir la Plaine nord de Caen. Ce fût par exemple le cas le 25 juin 2020 (**Figure 175**). D'après les données de l'analyse SST de Medspiration d'une précision d'environ 2 km, disponibles sur le site internet Météociel¹¹³, la température de la mer ce jour-là est de 16 °C. La température de l'air augmente au cours de la matinée pour atteindre 27 °C à 11h à Bernières-sur-Mer. Mais la brise se lève et la température chute et descend sous le seuil de l'échaudage thermique une heure plus tard. La température maximale atteint pour les autres stations est alors de 31,4 °C à Caen-Carpiquet, 34,7 °C à Saint-Sylvain et 35,2 °C à L'Oudon-Lieury (avec au final pour la journée plus de 12 h d'échaudage contre 3 h à Bernières).

S'il ne s'agit pas ici du principal objet de discussion, nous pouvons tout de même préciser que les précipitations varient également dans l'espace. Le cumul annuel est de l'ordre de 700 mm à Bernières-sur-Mer et Caen-Carpiquet. Le même cumul est mesuré à Damblanville qui bénéficie de son exposition sur les Monts d'Eraines pour compenser une position d'abri derrière les collines de Suisse-Normande. A Saint-Sylvain et L'Oudon-Lieury, la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 670 mm, alors même qu'il s'agit du secteur le plus sujet aux déficit hydriques en raison des sols superficiels.

Ces différences de conditions climatiques dans la Plaines agricole caennaise sont bien connues des exploitants agricoles. L'adaptation de la précocité des variétés aux sols et aux fortes chaleurs, exposée dans le chapitre 4 en témoigne. Cette connaissance est également perceptible dans les discours et visible sur le cycle de la plante.

Entretien avec l'exploitant « N3 » le 03 février 2016 :

« Tu vas de là à là [montre le nord et le sud de Caen], l'été, tu prends ta bagnole. Bah tiens tu pars de là de Courseulles ou de Bernières, tu passes Caen, tu prends entre là et là tu as 5/6 degrés. Ça c'est dingue moi j'exploitais de la terre à Anisy (entre Caen et la mer) et on a une moissonneuse avec des copains, bon il a de la terre sur Carpiquet. Et bah tu moissonnes là-bas c'est mûr, mais là tu ne moissonnes pas là ! T'as la route de Creully, la route de Courseulles et l'A13 [qui constituerait des seuils dans l'espace]. Et tu te dis comment ça se fait c'est pas possible moi j'ai de la terre à Anisy, tu arrivais là [secteur Rosel] y a pas moyen [de moissonner] ! Et il y a 5/6 km ! Comme tout c'qu'est récolte c'est une somme de température, t'arrives là-bas et bah il en manque. Bah si tu as un degré, deux degrés tous les jours et bien au bout d'un moment ... tu décales de trois à quatre jours. Mais le gars qu'exploite tout dans le même secteur ne s'en rend pas compte de ça ... tu vas là il va geler [sud de Caen], tu vas là [littoral] il ne gèle pas. [...] L'autre jour je suis allé à la chasse près du Haras-du-Pin [département de l'Orne], à Argentan nickel, bah 5 km même pas, 4 km d'Argentan il y avait ça de neige [montre quelques centimètres de hauteur]. Il pleuvait à une place, il neigeait à l'autre. C'est une histoire d'un km, c'est une histoire de hauteurs en fait. C'est les hauteurs parce que la Plaine de Falaise c'est plus haut ! Tu as le climat maritime puis tu entres dans les terres ».

Entretien avec l'exploitant « N7 » le 15 février 2016 :

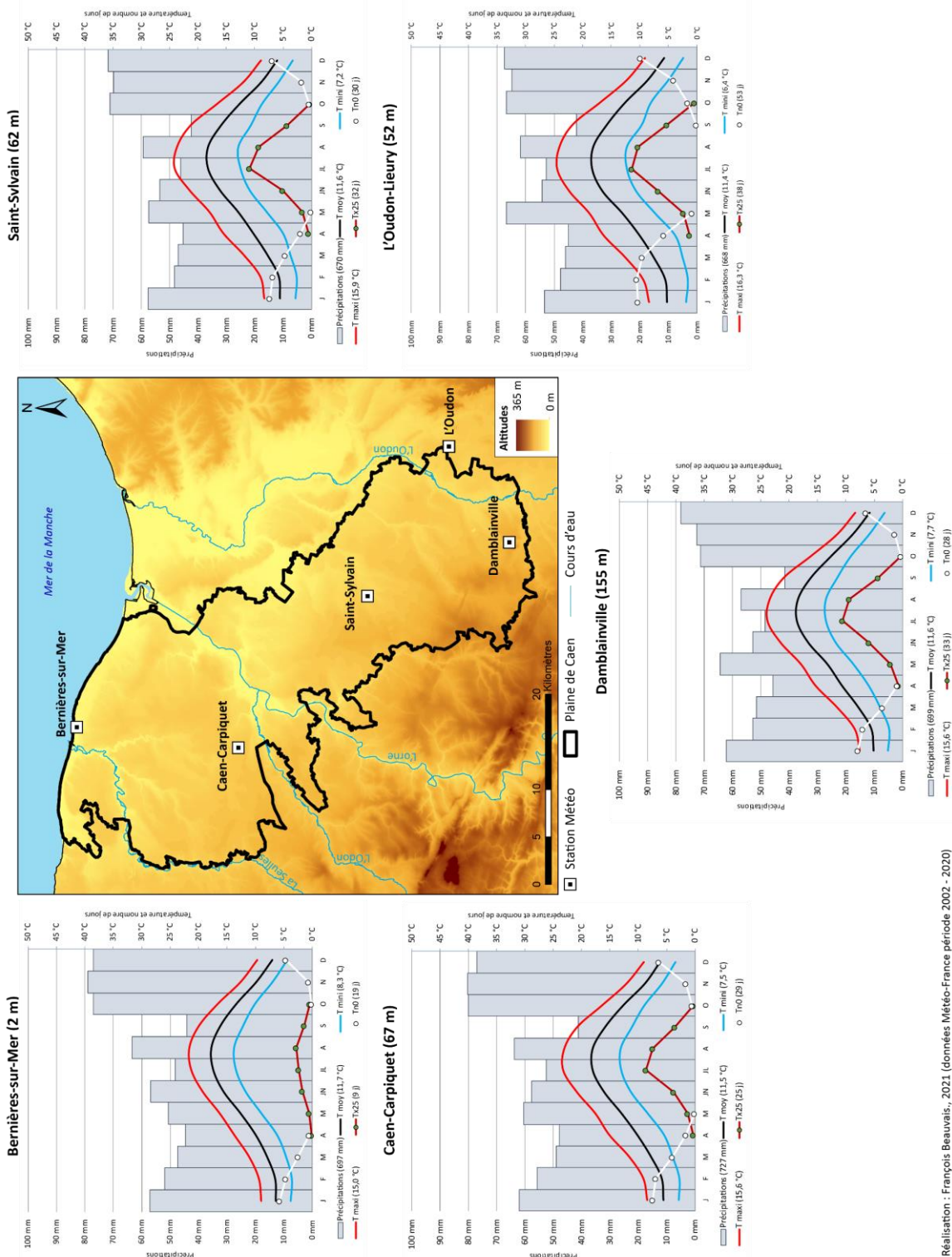
« Comme ça se réchauffe plus vite en Plaine sud et bien les cultures de printemps partent plus vite en végétation. On a des cousins qui habitent dans la Plaine sud vers Frénouville, Cagny, pas là ... et avant on allait faire la moisson chez eux, on avait le temps de faire toute leur moisson et après eux ils venaient chez nous et on faisait notre moisson. Donc notre moissonneuse partait là-bas pendant 8-10 jours, on avait le temps de tout faire et après eux venaient là et on faisait la nôtre. Et personne n'avait commencé là. Maintenant cet écart-là il diminue est on arrive plus à aller chez eux [...] alors est-ce que c'est parce que nous on a avancé notre date de semis ? C'est possible ... c'est possible ».

Exploitant agricole à Anguerny, le 31 octobre 2018

¹¹³ <https://www.meteociel.fr/accueil/sst.php?jour=25&mois=6&annee=2020&mode=0&sub=OK®ion=>

« Nous on a des fois des températures plus douces qu'au sud de Caen. Au sud de Caen ils ont deux degrés de moins [en parlant des jours de froid]. Il gèle un peu plus. Nous c'est l'air de la mer qui maintient, il gèle rarement. Enfin il gèle quand même, mais pas autant qu'au sud de Caen. La barrière de Caen ... ça change. Des fois j'ai des copains ils disent « bah nous il fait par exemple -2 °C, bah j'dis nan nan nous il fait 1 degré ou 2 degrés. Bah oui donc ça change tout pour l'avancée du blé ! Eux quand il fait 0 ou -2 °C, il ne pousse plus l'blé ! Dans l'Eure il fait plus froid donc ils peuvent semer plus vite car à un moment il est bloqué le blé ».

Figure 174 : Diagrammes ombrothermique pour 5 stations météorologiques de la Plaine de Caen sur la période 2002-2020



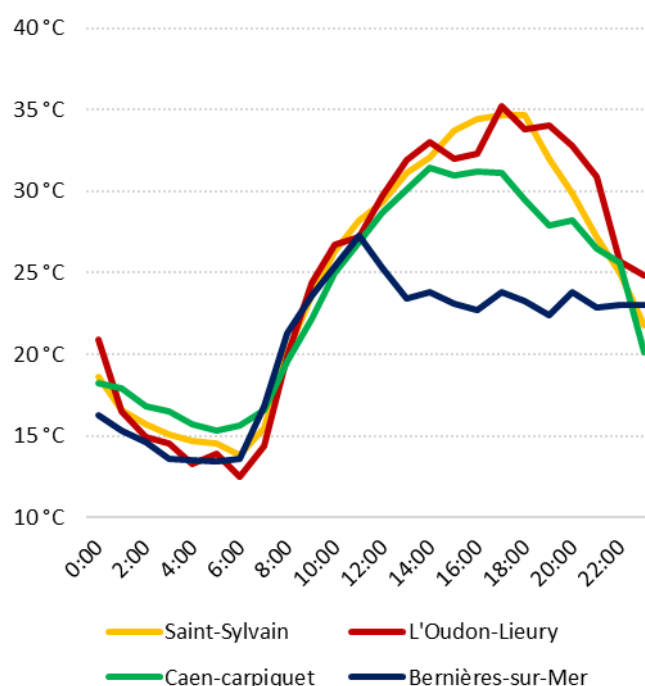
Réalisation : François Beauvais., 2021 (données Météo-France période 2002 - 2020)

Tableau 45 : Comparaison du nombre de jours de chaleur et d'heures $\geq 25^\circ\text{C}$ pour 4 stations de la Plaine de Caen du 1er au 30 juin 2020

	Bernières-sur-Mer	Caen-carpiquet	Saint-Sylvain	L'Oudon-Lieury
Nbj Tx $\geq 25^\circ\text{C}$	1	4	6	6
Nb h T $\geq 25^\circ\text{C}$	3	28	39	49
Tx moyenne	20,1	21,2	22,4	22,7

Réalisation : Olivier Cantat., 2020 (données Météo-France)

Figure 175 : Comparaison de température entre 4 stations de la Plaine de Caen le 25 juin 2020



Pour avoir une idée des différences sur la phénologie et l'exposition aux aléas entre ces sites en raison de la diversité spatiale des conditions climatiques, nous avons choisi de simuler le cycle du blé tendre d'hiver à partir des données des 5 stations météorologiques sur la période 2002-2021. Les sommes de température mobilisées sont celles relatives à la variété de précocité intermédiaire observée dans la parcelle d'Anguerny pour deux dates de semis : le 15 novembre et le 15 octobre.

Tout d'abord, pour une même date de semis, le début de la montaison est plus tardif à mesure que l'on s'éloigne du littoral (Tableau 46). Ce constat s'explique par les températures hivernales plus froides à l'intérieur des terres qui limitent la croissance et le développement de la plante. En partie sud de la Plaine, il faut donc davantage de jours pour que le besoin en chaleur relatif au démarrage de cette période phénologique soit atteint. A titre d'exemple, en semant le blé le 15 novembre, le stade épi 1 cm est observé en moyenne le 30 mars à Bernières, tandis qu'il faut attendre un peu plus d'une semaine supplémentaire à Caen et Saint-Sylvain, et même jusqu'à deux semaines dans la vallée de l'Oudon et sur les Monts d'Eraines. Cependant, la fin du printemps et le début de l'été sont plus chauds à l'intérieur des terres. Par conséquent, un rattrapage s'opère. A la floraison l'écart n'est plus que de quelques jours avec la Plaine nord, alors que la maturité physiologique intervient quasiment à la même date sur tous les sites. Ainsi, sur la période froide, la durée du tallage est plus

courte dans la Plaine nord grâce à son climat adouci que dans la Plaine sud. Mais, avec des températures diurnes printanières et estivales plus chaudes dans les terres, la montaison et le remplissage des grains s'effectuent sur une durée plus courte au sud qu'au nord.

Tableau 46 : Date de réalisation des stades phénologiques du blé tendre d'hiver pour 5 stations météorologiques de la Plaine de Caen sur la période 2002-2021

Station météo	Semis 15-nov			Semis 15-oct		
	Epi 1 cm	Floraison	Maturité physio	Epi 1 cm	Floraison	Maturité physio
Bernières-sur-Mer	30-mars	01-juin	20-juil	07-mars	17-mai	09-juil
Caen-Carpiquet	07-avr	04-juin	22-juil	10-mars	18-mai	08-juil
Saint-Sylvain	08-avr	04-juin	22-juil	11-mars	17-mai	08-juil
L'Oudon-Lieury	13-avr	07-juin	23-juil	13-mars	20-mai	09-juil
Damblainville	12-avr	05-juin	21-juil	13-mars	17-mai	06-juil

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données Météo-France ; sommes de températures variété de précocité intermédiaire)

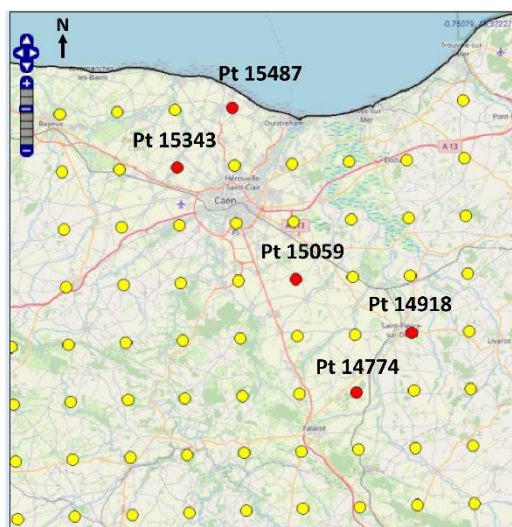
Dans le cas d'un semis le 15 novembre, seulement 3 jours d'échaudage thermique sont recensés à Bernières-sur-Mer. Le cumul est plus important à Carpiquet, Saint-Sylvain, Damblainville et L'Oudon-Lieury puisque 10, 13, 14 et 16 jours sont relevés. Le blé est alors beaucoup plus vulnérable à cet aléa dans la partie sud de la Plaine de Caen. On comprend pourquoi les exploitants agricoles utilisent des variétés au cycle précoce ou anticipent les semis. En effet, en semant par exemple mi-octobre, le nombre de jours de chaleur entre la méiose et la maturité du blé est réduit de quatre jours pour les quatre sites méridionaux. Dans ce cas, la maturité physiologique a lieu plus tôt, à la fin de la première décade de juillet. Cela permet également au remplissage des grains de rencontrer une température moyenne un peu plus faible qui participe à rallonger le remplissage des grains et donc le temps d'élaboration du rendement. En contrepartie, le blé risque davantage d'être exposé au gel d'épis en début de montaison. Le stade épi 1 cm rencontre une année sur deux au moins une journée dont la température minimale est inférieure ou égale à -4°C au début de la montaison. En 2003, 2020 et 2021, un semis précoce a même pu exposer le blé jusqu'à 5 journées gélives à ce seuil. Il en va de même pour la méiose qui, trop avancée, rencontre de basses températures qui limitent sa fertilité. Soulignons que ces aléas peuvent être rencontrés dans le cas d'un semis tardif. Le gel d'épis est survenu en 2017, 2018, 2019 et 2020 en raison d'une phénologie avancée par des températures hivernales douces (ces mêmes gelées tardives eurent également des conséquences désastreuses pour l'arboriculture et la viticulture dans de très nombreux sites en France). Les gelées ont même perduré sur le site de l'Oudon mais ici l'exposition aux basses températures sur la période proche méiose est habituelle (1,5 jour/an en moyenne ; maximum de 4 jours). En revanche, sur la frange littorale les semis précoces concernent les variétés tardives. Une variété de précocité intermédiaire engendre une anticipation trop importante de la montaison et expose l'épi au gel. Malgré le climat très océanique, des jours de gel peuvent survenir. Ainsi, un semis le 15 octobre engendre un stade épi 1 cm le 7 mars. Mais admettons une variété d'une même précocité non limitée par la photopériode, ce stade intervient le 9 février. Au moins une occurrence d'une température inférieure ou égale à -4°C est rencontrée 5 années sur 20. La simulation pour l'année 2012 calcule même un début de montaison le 19 janvier avec 4 journées pouvant ensuite potentiellement geler les épis. Ce même raisonnement tient également pour le risque de basses températures à la méiose qui se déroulerait le 10 avril.

La modélisation numérique du climat simule des conditions relativement homogènes sur l'ensemble de la Plaine agricole, à l'exception des mailles jouxtant le littoral (chapitre 3 ; p 150). Les températures sont assez proches pour l'ensemble des mailles, tout comme le nombre de jours de gel et de chaleur. Si le nombre jours d'été est bien plus faible sur le littoral, il ne se renforce pas à mesure que l'on pénètre à l'intérieur des terres. Que l'on soit au nord-ouest de Caen ou à l'extrême sud-est de la Plaine, le nombre de jours dépassant le seuil de 25 °C n'est que de 14 à 15 jours sur la période 1976-2005. Par ailleurs, aucune maille ne simule un total pluviométrique inférieur à 700 mm en partie sud de la Plaine. **Evidemment, les données interprétées pour les stations étant celles de la période 2002-2020, les valeurs ne sont pas directement comparables. Néanmoins, quelle que soit la plage temporelle déterminée nous devrions retrouver les contrastes de températures. La maille de 8x8 km ne permet pas d'apprécier ces différences locales de températures bien que celles-ci existent,** comme en témoignent les relevés des stations Météo-France qui traduisent la réalité des conditions stationnelles.

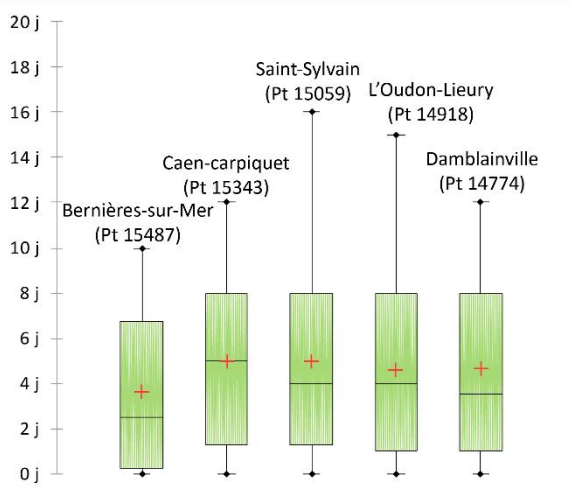
En simulant le cycle du blé pour les 5 mailles SAFRAN se surimposant à la localisation des 5 stations Météo-France de la Plaine de Caen, on constate que seule la maille de bordure littorale se distingue (**Figure 176**). Les dates de réalisation des stades sont équivalentes pour les autres mailles avec au maximum 3 jours d'écart entre elles au stade épi 1 cm. Le nombre de jours d'échaudage thermique associé à la simulation du cycle du blé pour la maille de Bernières est de 3,6 jours. Pour les autres, cette valeur est comprise entre 4,6 et 5 jours. Les différences entre Caen-Carpique, Saint-Sylvain, l'Oudon et Damblainville ne ressortent donc pas. Par conséquent, la diversité des conditions climatiques en Plaine de Caen pour le blé tendre ne se retrouvent pas avec le modèle climatique régional de résolution 8x8 km.

Figure 176 : Comparaison de la date des stades phénologiques et du nombre de jours d'échauffage thermique du blé tendre pour 5 points de grille de la maille SAFRAN 8x8 km en Plaine de Caen sur la période historique 1976-2005

A. Sélection des points de grilles des mailles SAFRAN



B. Comparaison du nombre de jours d'échauffage thermique sur la période 1976-2005 (méiose - maturité) pour 5 points de grilles de la Plaine de Caen



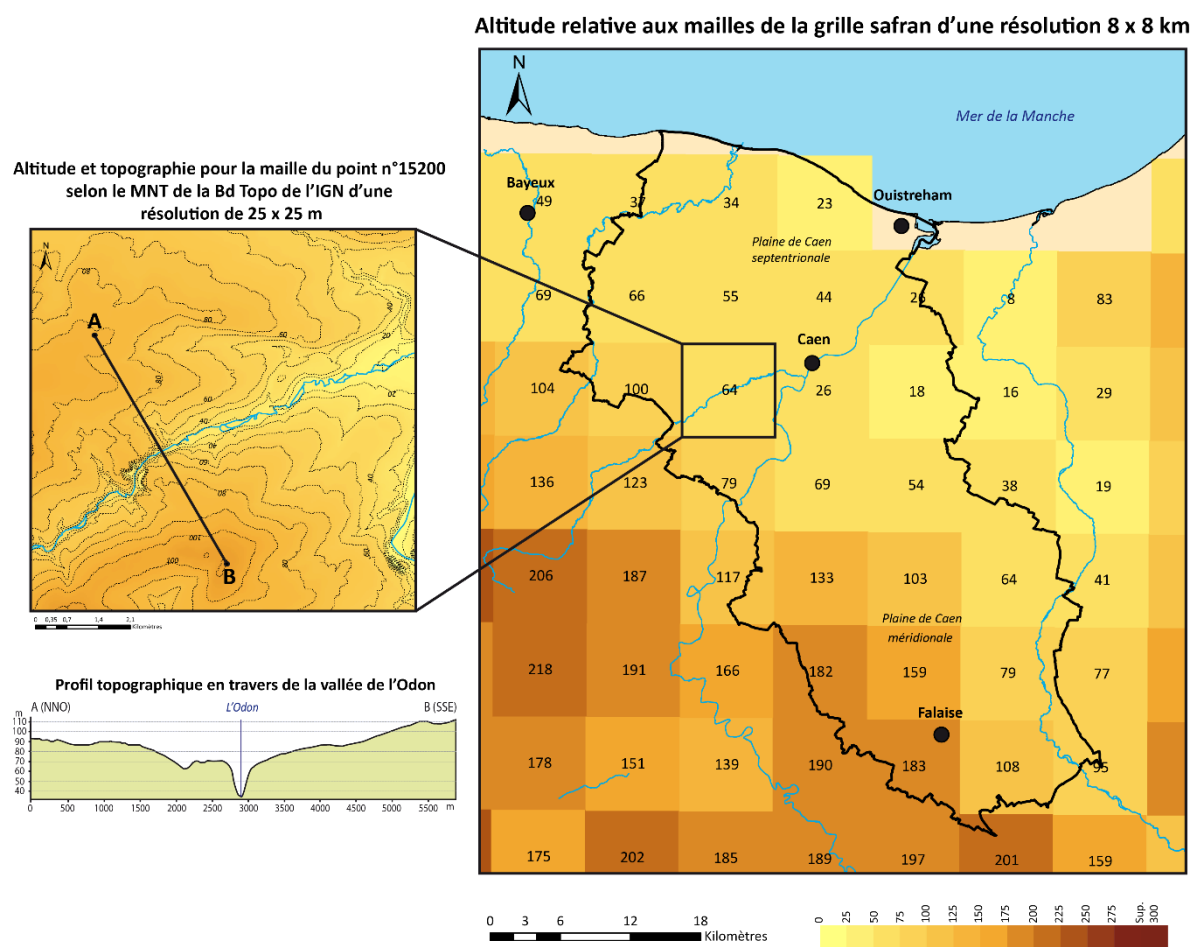
C. Comparaison des dates de réalisation des stades épi 1 cm, floraison et maturité physiologique du blé tendre d'hiver sur la période 1976-2005 pour 5 points de grilles de la Plaine de Caen

	Bernières-sur-Mer (Pt 15487)	Caen-Carpiquet (Pt 15343)	Saint-Sylvain (Pt 15059)	L'Oudon-Lieury (Pt 14918)	Damblainville (Pt 14774)
Epi 1 cm	11-avr.	16-avr.	15-avr.	14-avr.	17-avr.
Floraison	11-juin	13-juin	13-juin	12-juin	14-juin
Maturité physio	1-août	2-août	2-août	1-août	3-août

Réalisation : François Beauvais., 2021 (données CNRM-2014 scénario historique - biais froid non corrigé ; simulations bioclimatiques sur la période 1976-2005)

La continentalisation de la Plaine de Caen qui s'observe en quelques dizaines de kilomètres est difficile à simuler pour le modèle, car la maille de 8x8 km simplifie la topographie. Le MNT de l'IGN expose d'ailleurs que l'altitude n'est pas équivalente en tous points en interne d'une maille (Figure 177). De ce fait, la situation particulière de la vallée de l'Oudon est 'gommée' par le modèle et est donc invisible pour celui-ci.

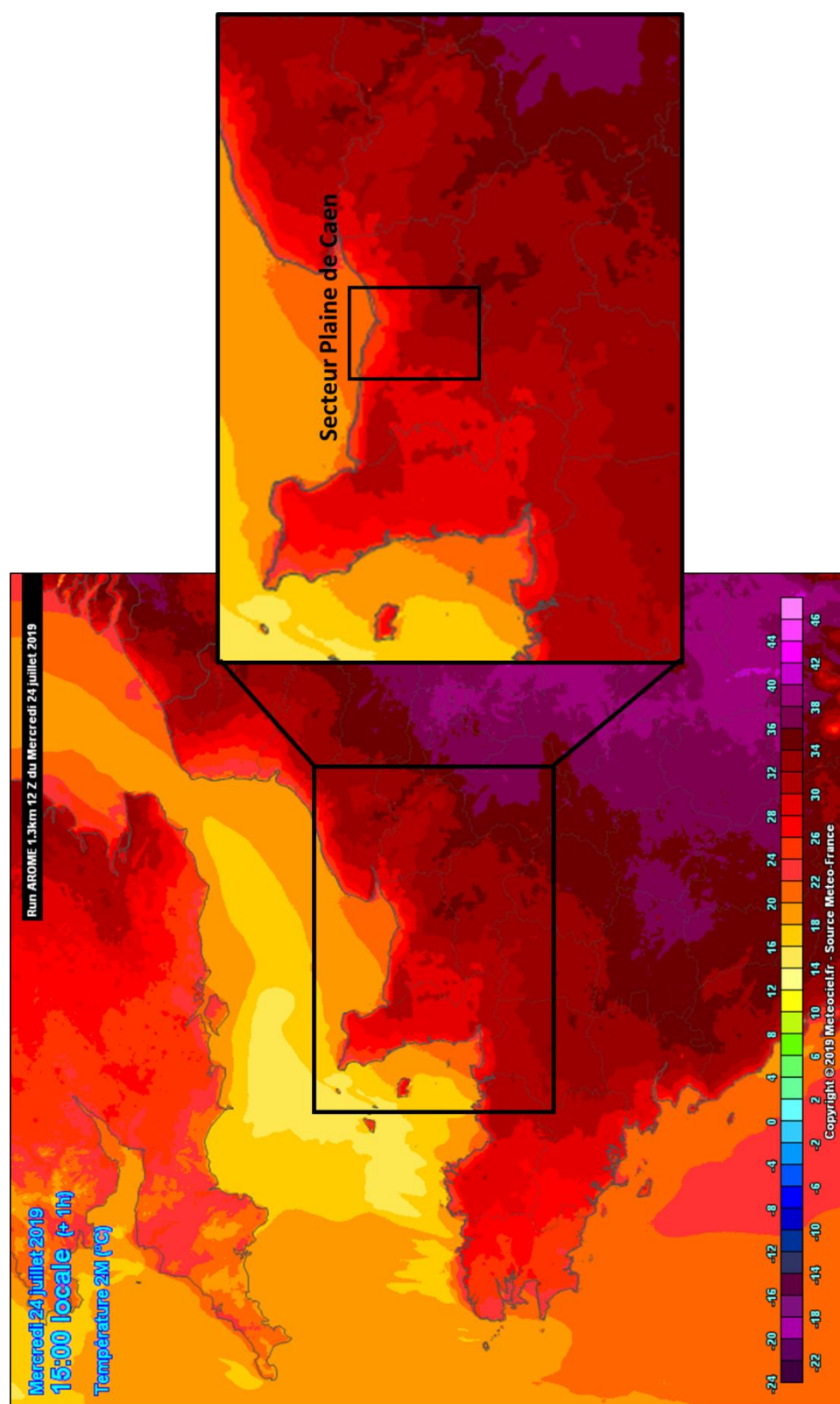
Figure 177 : Altitude des mailles SAFRAN 8x8 km comparée au MNT 25 m de l'IGN



François BEAUVAIS, 2017 (d'après les données de la grille Safran et le MNT 25 m de l'IGN)

La diversité de la température à échelle fine n'étant pas détectable avec les modèles régionaux d'une résolution de 8 x 8 km, **des projections avec des mailles kilométriques telles que celles du modèle AROME permettraient d'affiner ces discussions (Figure 178)**. Pour apprécier cet élément nous pouvons nous référer aux prévisions météorologiques de ce modèle qui montrent la précision de ces mailles à fine résolution. Par exemple, le 24 juillet 2019, dans le Nord-Ouest de la France on constate des écarts de températures importants entre l'intérieur des terres et les parties littorales. En s'intéressant plus précisément aux différences internes à un secteur on constate l'apport de la maille kilométrique. La température simulée pour le nord de la Plaine de Caen est de l'ordre de 26 °C tandis qu'elle est supérieure à 34 °C dans l'extrême sud de cette région agricole. Ces valeurs sont cohérentes avec les relevés sous abri de Météo-France puisque qu'à cette même heure on enregistrait 24°C sur la côte à Bernières, 26°C à Englesqueville-la-Percée (un peu en retrait de la mer), 30°C à Bayeux et à Caen, 32°C à Lisieux et 34°C à St-Sylvain, L'Oudon et Damblainville.

Figure 178 : Prévion météorologique de la température le 24 juillet 2019 à 15h à partir du modèle AROME de Météo-France (maille de 1,3 km)



7.1.2. Différences de températures dans la Plaine agricole en contexte de faibles dénivelés

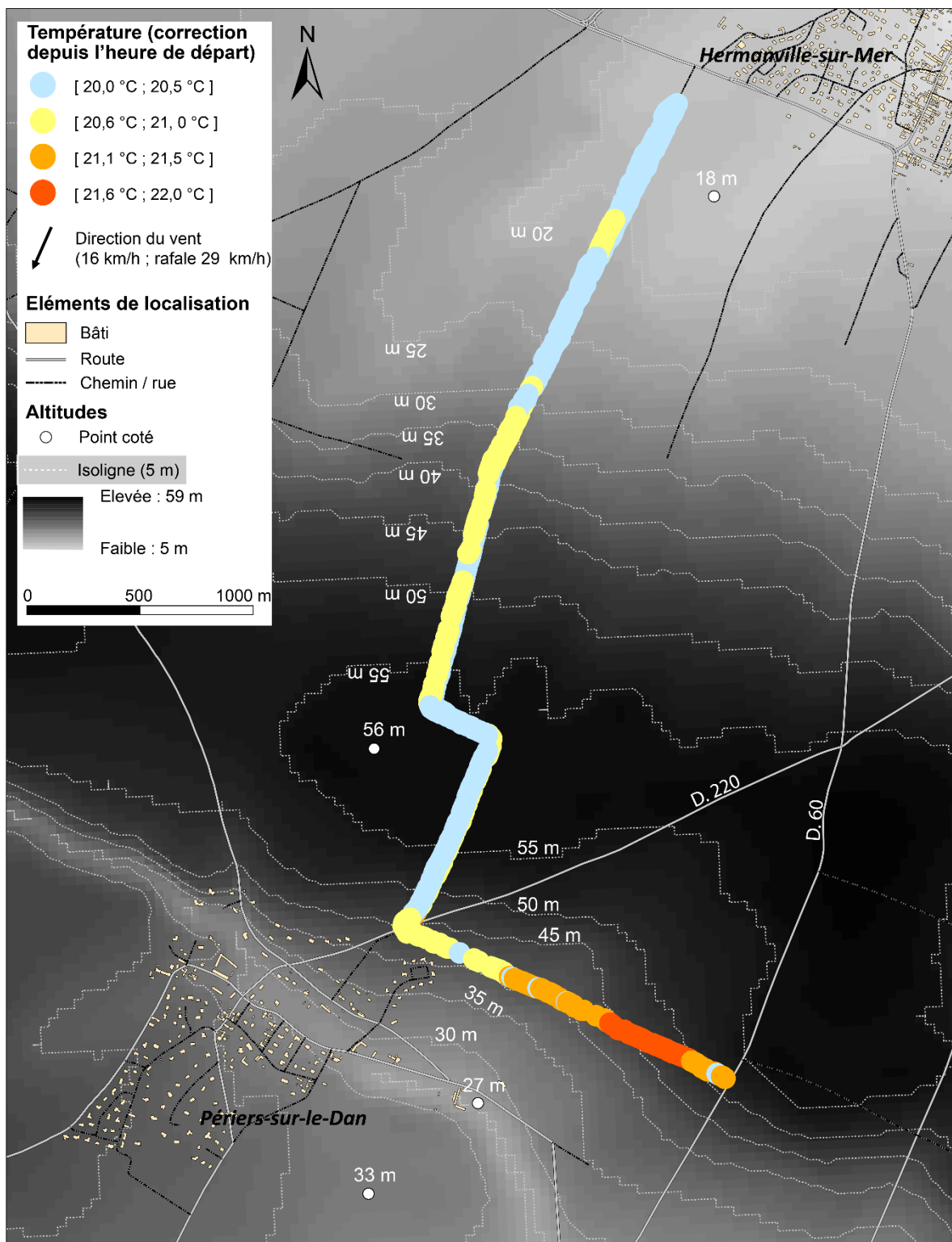
Une diversité des températures peut être observée à une échelle encore plus fine que celle de la région agricole. Deux mesures de terrain ont été réalisées à l'aide d'un enregistreur thermo-hygrométrique Wisemann Klein Datalogger WK 057 fixé dans un abri hélicoïdal Barani type standard, l'une dans le secteur d'Hermanville-sur-Mer et l'autre dans le secteur de Saint-Manvieu-Norrey. L'enregistrement est cadencé toutes les deux secondes et ces collecteurs ont été testés la veille pour calibrer les valeurs. Ces relevés en itinérance sont réalisés en maintenant l'abri météorologique à hauteur et sans le tenir le long du corps (à environ 40 à 50 cm).

Dans le secteur d'Hermanville-sur-Mer (littoral)

Les mesures entre Hermanville-sur-Mer et Périers-sur-le-Dan ont été réalisées de 14h27 à 15h36 (UTC + 2h) le 24 juin 2018 par beau temps et ciel dégagé. Le vent enregistré à la station de Caen-Carpique est d'orientation nord/nord-est (16 km/h ; rafale 29 km/h). Une station météorologique Davis disposée dans un jardin à Hermanville sert de référence pour la correction diurne de la température. Le versant orienté en direction du nord (Hermanville-sur-Mer) est exposé au vent, l'autre, exposé vers le sud (Périers-sur-le-Dan) est sous le vent. Les dénivelés sont respectivement de 40 et 20 mètres pour des pentes moyennes de 2 %. Le secteur est quasi entièrement composé de champs ouverts, à l'exception de toute la partie suivant un axe ouest-est à proximité de Périers-sur-le-Dan qui emprunte un chemin en creux bordé d'une haie arbustive. Le départ de l'itinéraire est situé à 2 700 m du rivage de la Mer de la Manche. Les résultats sont exposés dans les **Figures 179, 180 et 181**.

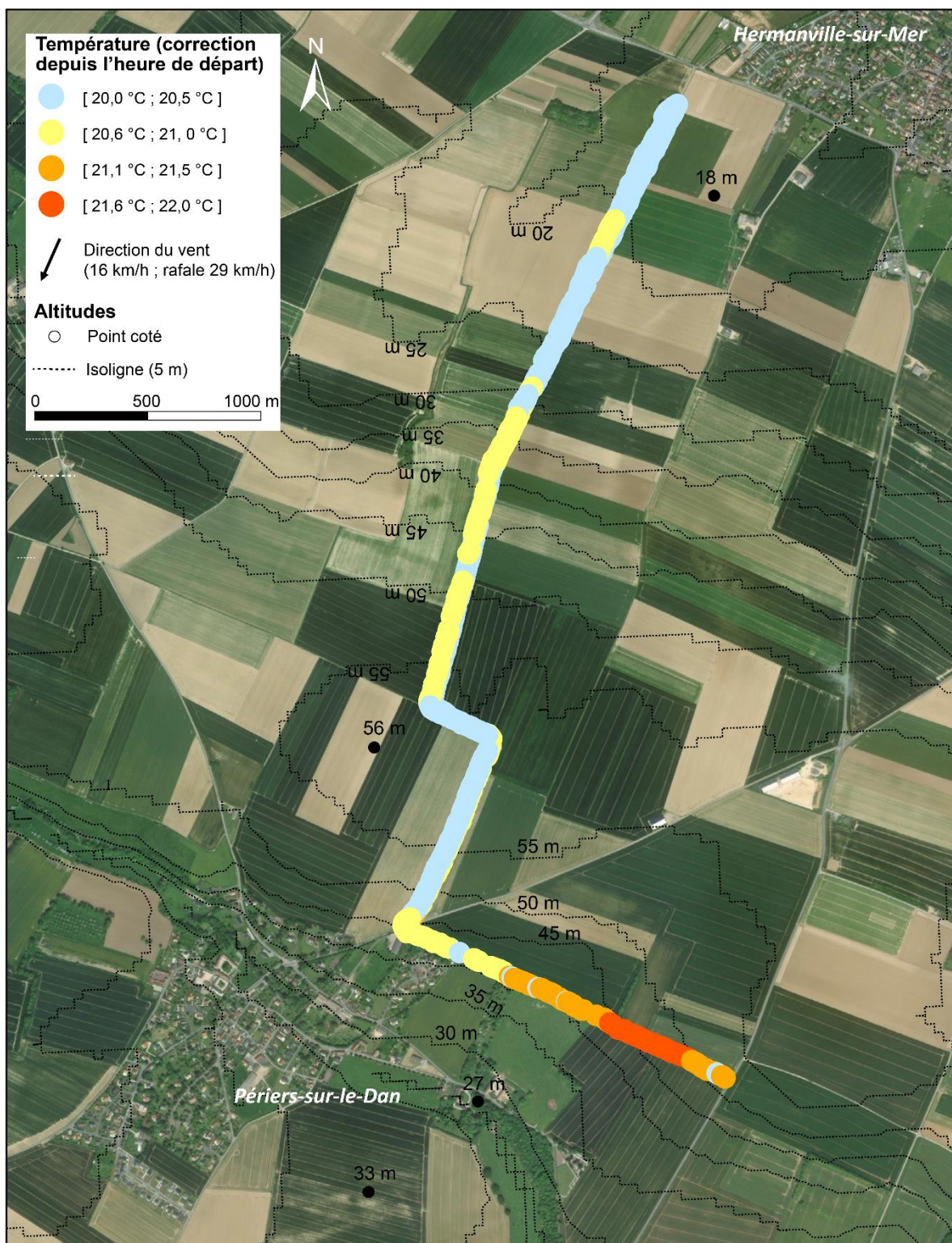
Le versant exposé au vent enregistre des températures comprises entre 20 et 20,5 °C sur sa première partie et entre 20,5 et 21,0 °C sur sa seconde partie. Compte tenu de la cartographie et de la discrétisation en classes de 0,5 °C, on pourrait alors penser au premier abord que l'écart est lié à la proximité du seuil de 20,5 °C et à son franchissement ce qui supposerait une température presque équivalente sur tout le versant. Pourtant la **Figure 181** expose une température de 20,1°C au début de l'itinéraire. Elle est proche de 21 °C sur le haut du versant mais baisse ensuite autour de 20,3 °C sur le plateau. C'est sur le versant situé au nord-est de Périers-sur-le-Dan que la température est la plus élevée, jusqu'à 21,7 °C. Si le faible encaissement peut jouer un rôle, il convient d'ajouter l'hypothèse de l'effet des haies présentes à cet endroit (**Figure 182**). La température maximale enregistrée correspond au secteur où le paysage se referme le plus et participerait de ce fait à renforcer l'abri du vent frais provenant de la Mer de la Manche. L'occupation du sol agricole joue probablement aussi un rôle. Ainsi les cultures de betteraves sont moins hautes (une vingtaine de centimètres) que les blés (90 cm), les féveroles (130 cm) ou encore le colza (150 cm), procurant de ce fait des abris différents.

Figure 179 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps entre Hermanville-sur-Mer et Périers-sur-le-Dan projetée sur le MNT de l'IGN



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger en itinérance (marche à pied) de 14h18 à 15h21 le 24/06/18 ; MNT 25 m et BD Topo de l'IGN 2016).

Figure 180 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps entre Hermanville et Périers-sur-le-Dan projetée sur l'image satellite



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger en itinérance (marche à pied) de 14h18 à 15h21 le 24/06/18 ; Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community).

Figure 181 : Evolution de la température et de l'altitude de 14h18 à 15h20 UTC + 2h associées au transect entre Hermanville-sur-Mer et Périers-sur-le-Dan

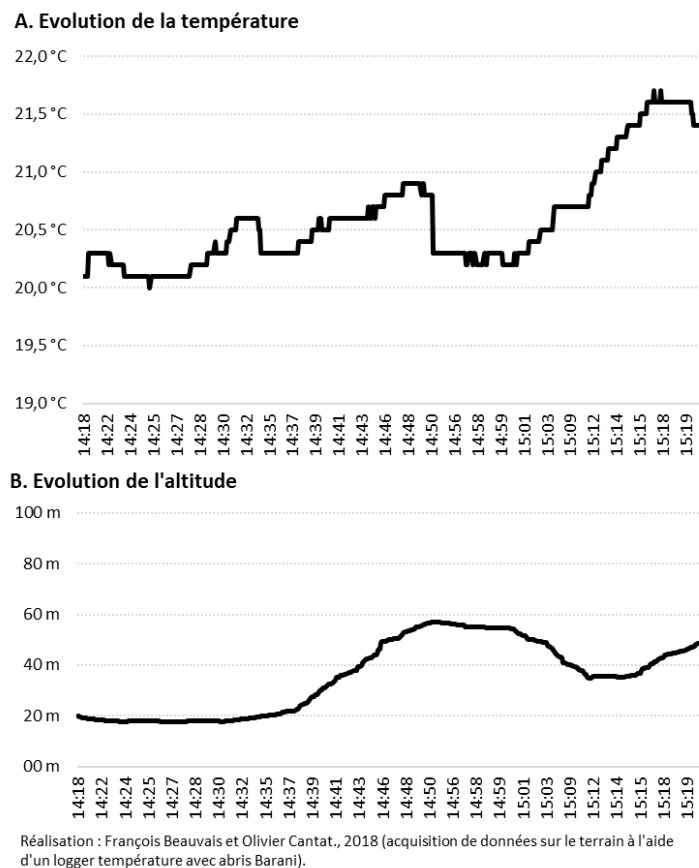
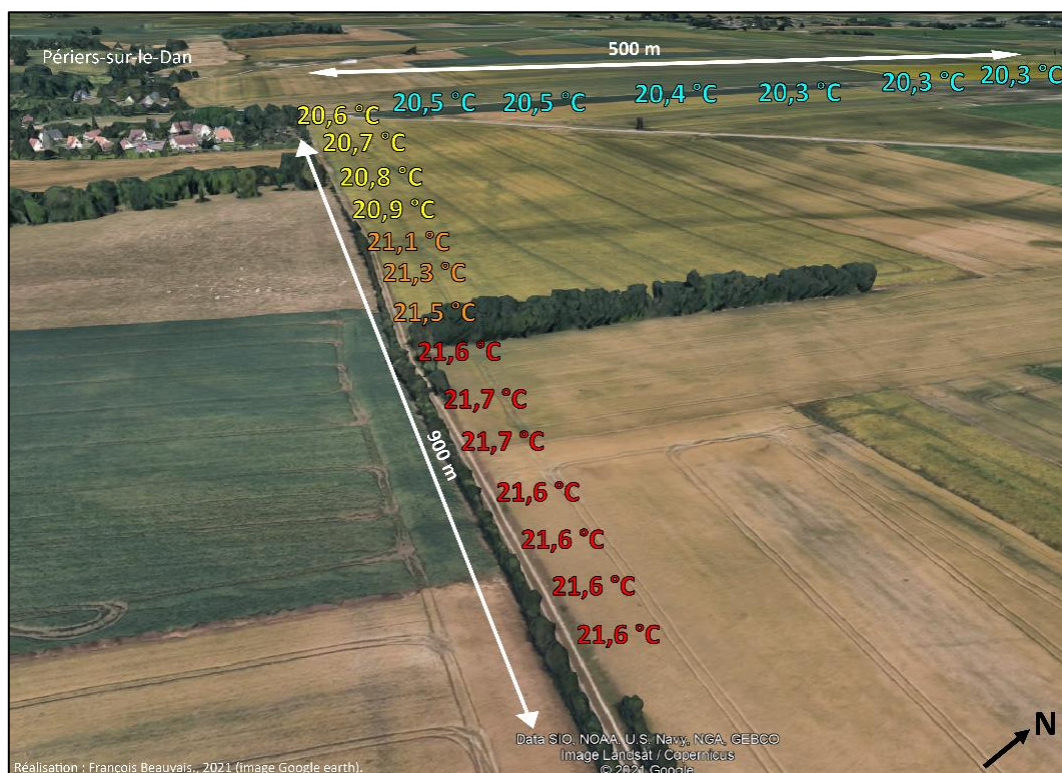
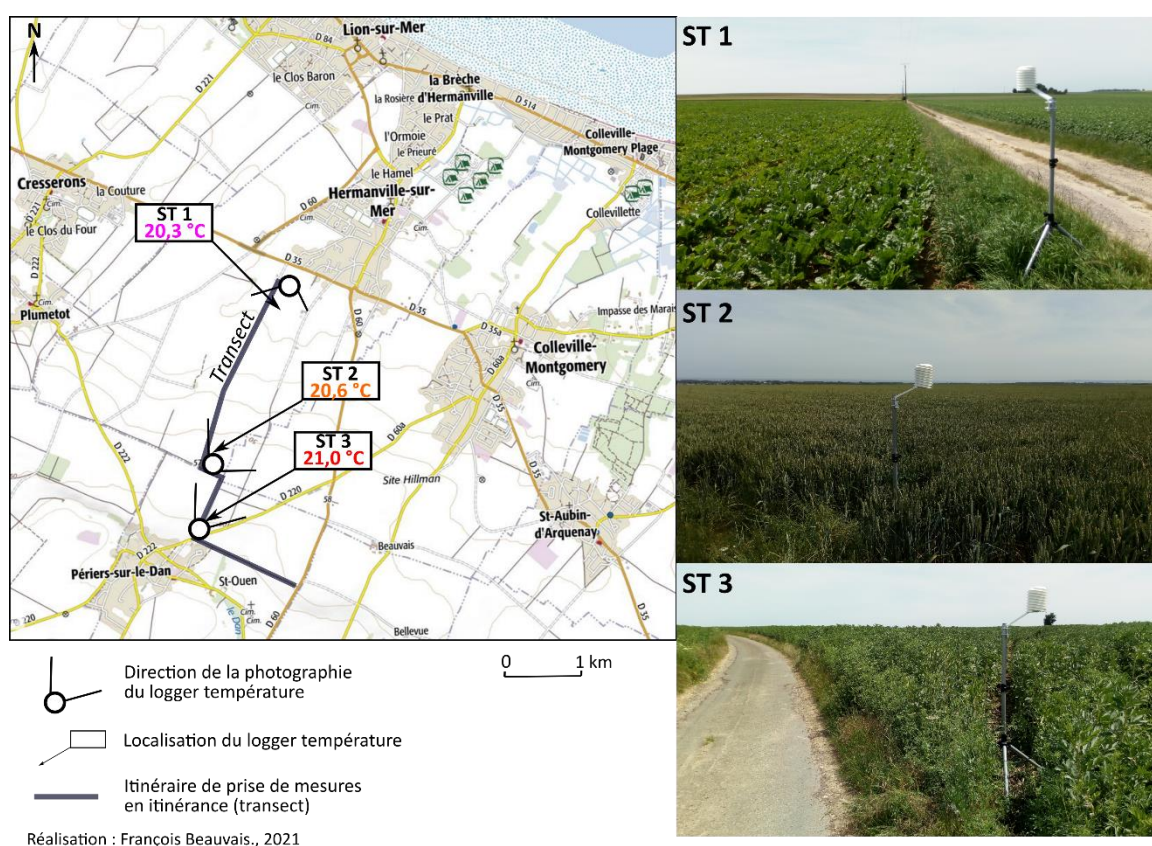


Figure 182 : Evolution de la température dans la partie la plus abritée du transect de 14h59 à 15h20 UTC + 2h (vue 3D Google Earth)



Sur cette campagne de mesure, nous avons disposé trois sondes de températures (également fixées dans un abri Barani ; **Figure 183**) avec un enregistrement de 13h51 à 15h36 (UTC +2 h). La première (ST 1) est disposée au nord du transect, en bas du versant (18 m NGF) exposé nord dans un champ de betteraves. La deuxième (ST 2) est située en haut de ce même versant (56 m NGF), à la rupture de pente avec le plateau en bordure d'une parcelle de blé. La troisième (ST 3) est placée sur la partie haute du versant (47 m NGF) de la vallée de Périers-sur-le-Dan, en contre-bas de la rupture de pente avec le plateau. Elle est installée dans un champ de féveroles. On constate une température moyenne de 20,3 °C ; 20,6 °C et 21,0 °C respectivement pour ST 1, ST 2 et ST 3. La station la plus abritée en raison de la topographie et de l'occupation du sol, mais également la plus éloignée de la mer, connaît la température la plus élevée. Un écart de 0,7 °C est noté entre ST 1 et ST 3.

Figure 183 : Localisation et photographie des trois sondes de températures fixes disposées sur le transect de 13h51 à 15h36 UTC + 2h



Dans le secteur de Saint-Manvieu-Norrey (intérieur des terres de la Plaine nord)

Les mesures dans la Plaine agricole de Saint-Manvieu-Norrey sont réalisées de 15h09 à 16h22 (UTC + 2h) le 27 juin 2018 par beau temps et ciel dégagé. Le vent est de direction nord. Le secteur est composé d'un plateau ondulé et de champs ouverts. Le sud de l'itinéraire s'effectue dans une petite vallée le long d'un versant orienté vers le sud et par conséquent abrité du vent. Son dénivelé est de 10 à 15 mètres selon l'emplacement. Les résultats sont exposés dans les **Figures 184, 185, 186 et 187**.

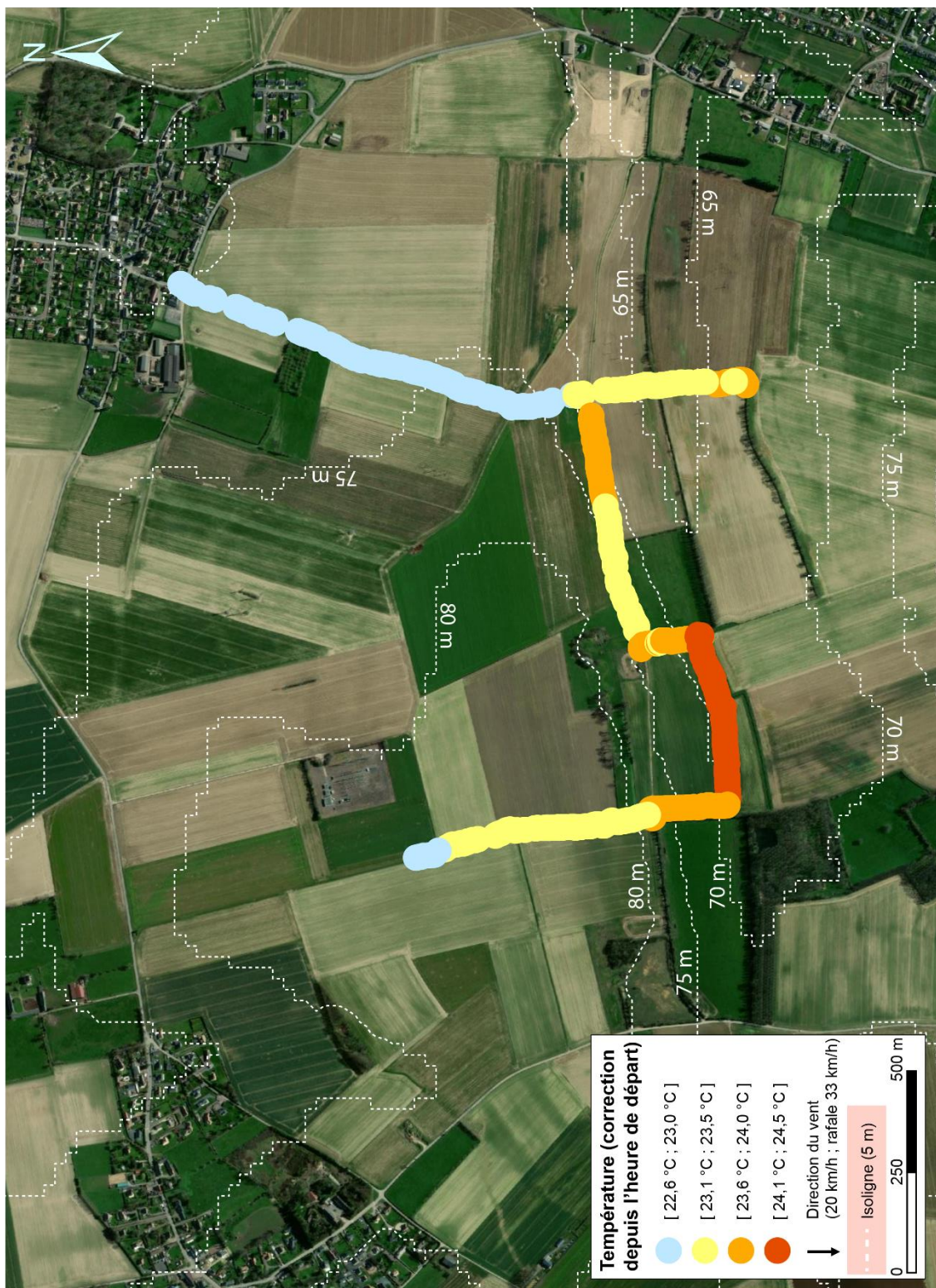
La température est inférieure à 23 °C sur le plateau. Mais elle augmente dès lors que l'on descend dans la petite vallée. Les 10 m de dénivelé et l'effet d'abri associé permet un gain de 0,5 °C. Il est plus prononcé dans une parcelle abritée là où la dénivellation est plus importante de 5 m puisque la température atteint 24,5 °C. D'ailleurs, un écart de 0,9 °C est relevé entre le haut et le bas de cette parcelle en seulement 150 m de distance pour un dénivelé de 7 m. La température redescend lorsque l'on se redirige en haut de ce versant pour rejoindre le plateau. Au final, entre le plateau et la zone la plus abritée, la différence de température est de 1,9 °C.

Figure 184 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps dans la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey projetée sur le MNT de l'IGN



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger en itinérance (marche à pied) de 15h09 à 16h05 le 27/06/18 ; MNT 25 m et BD Topo de l'IGN 2016).

Figure 185 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps dans la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey projetée sur l'image satellite



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger en itinérance (marche à pied) de 15h09 à 16h05 le 27/06/18 ; MNT 25 m et BD Topo de l'IGN 2016).

Figure 186 : Evolution de la température dans la parcelle de blé tendre la plus abritée du transect de la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey

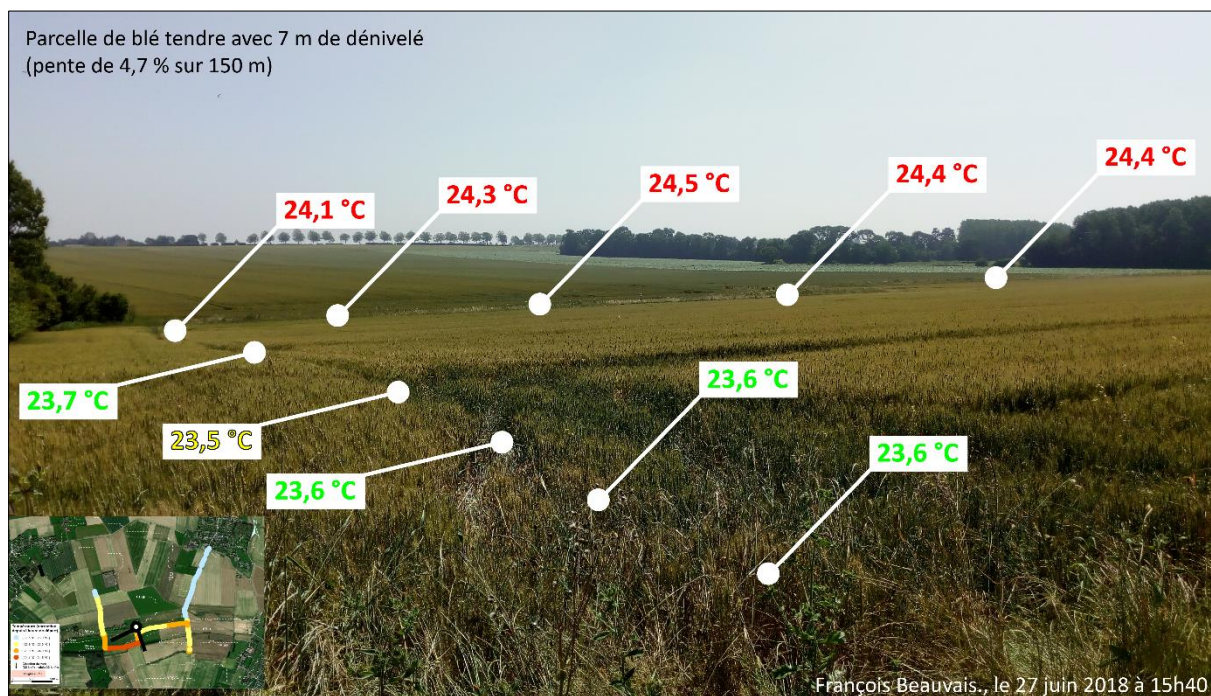
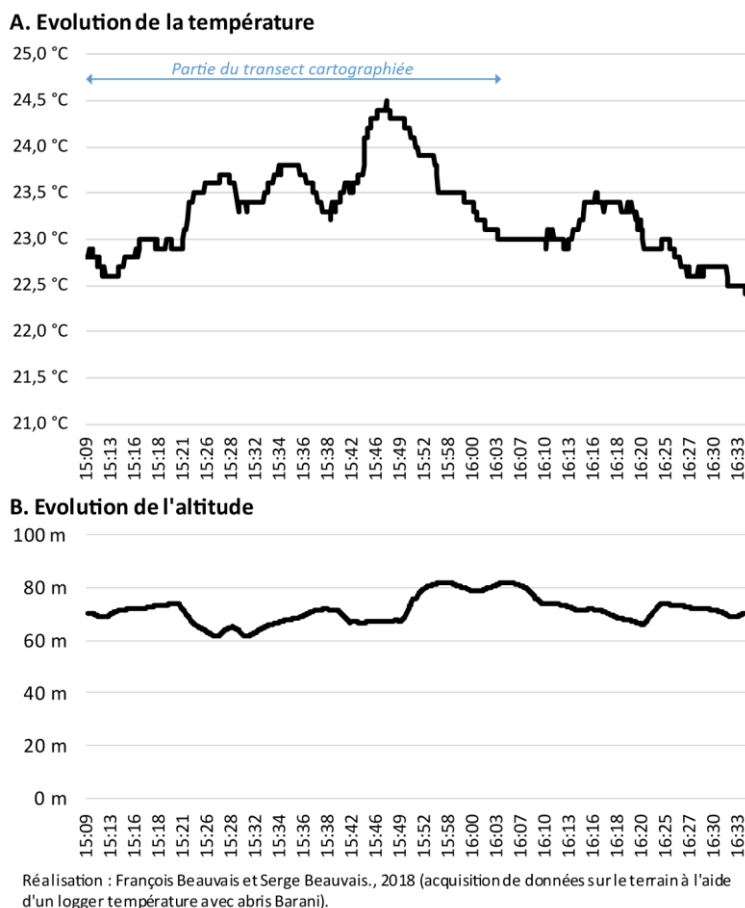


Figure 187 : Evolution de la température et de l'altitude de 15h09 à 16h05 (UTC + 2h) associées au transect de la Plaine agricole de Saint-Manvieu-Norrey



Ces mesures exposent des différences de température de quelques dixièmes à quelques degrés en quelques hectomètres. Par conséquent, **dans le cas de journées aux températures un peu plus élevées, on peut supposer que le dépassement du seuil de l'échaudage thermique pourrait être différent d'une parcelle à l'autre selon l'environnement.** A titre d'exemple, il n'y a que trois degrés d'écart entre le seuil d'échaudage avec arrêt du remplissage (25 °C) et celui où ce remplissage ne reprend plus (28 °C). Ainsi, il conviendrait de vérifier dans le cas de situations similaires aux températures un peu plus élevées si l'impact peut différer entre ces parcelles (ou dans des secteurs aux dénivelés plus importants) et **d'identifier les conséquences sur le potentiel de rendement.**

Ces faibles dénivellations pourraient également être le théâtre d'écarts de températures par inversion thermique lors de gelées nocturnes hivernales et printanières, par temps clair et calme. C'est d'ailleurs ce que nous avons tenté de vérifier dans la sous-partie suivante.

7.1.3. Contrastes de températures gélives dans la vallée de l'Odon

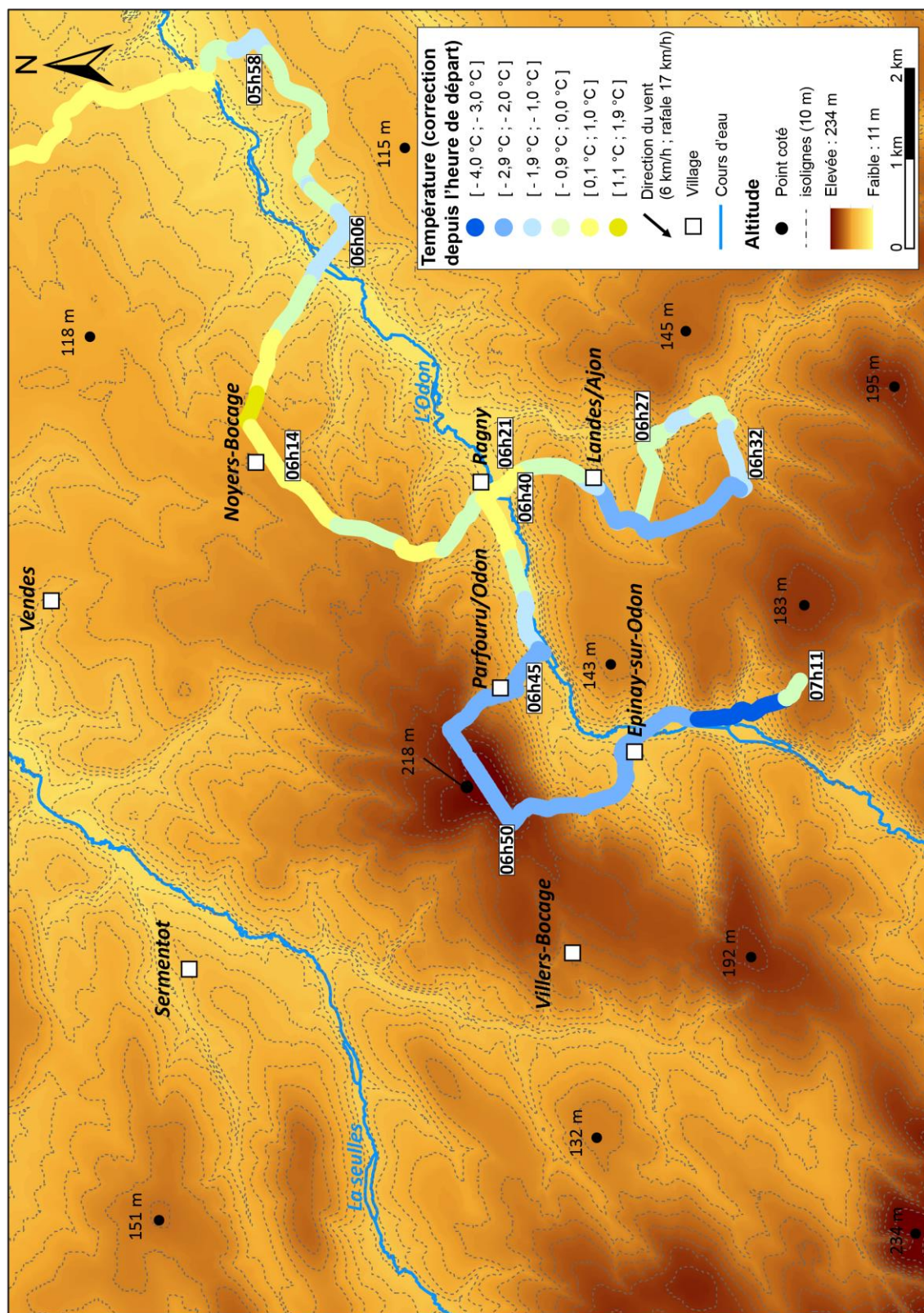
Des mesures ont été réalisées en fin de nuit à deux reprises dans la vallée de l'Odon en accrochant une sonde de température Wisemann Klein WK 057 à l'antenne d'une automobile (**Figure 188**). Ces enregistrements tentent de vérifier si une inversion thermique s'effectue par temps calme et clair, l'absence de vent et le rayonnement nocturne permettant à l'air froid plus dense de descendre le long des versants pour stagner dans les fonds de vallées ou creux topographiques (Cantat, 2015 ; Cantat et al., 2019)). Pour assurer une certaine homogénéité dans les relevés, la vitesse moyenne de déplacement est d'environ 30 km/h, régulière sur l'ensemble du transect.

Figure 188 : Data logger accroché sur l'antenne de l'automobile



Le 15 avril 2021, le temps n'est pas totalement clair (présence de nuages ; **Figure 253** et Annexe 11 ; p 524) avec un léger vent de nord-est (6 km/h de moyenne). Ces éléments ne sont donc pas totalement favorables à l'installation d'inversions thermiques. L'orientation du vent correspond à celle de l'axe de la vallée (sud-ouest/nord-est) ce qui lui permet de s'engouffrer dans celle-ci. Les températures du fond de vallée sont inférieures à celles des hauts de versant et du plateau à seulement deux reprises. Ainsi, au sud-est de Noyers-Bocage, la température est comprise entre -1,9 et -1 °C dans le fond de vallée, tandis qu'elle s'élève à mesure que l'on monte le versant pour atteindre plus de 1 °C à l'entrée de Noyers-Bocage (**Figure 189**). C'est ensuite à la fin du transect que les températures les plus froides sont observées, jusqu'à -4 °C. Il s'agit d'une route située à proximité de la rupture de pente entre la plaine alluviale et le versant exposé vers l'ouest (les températures restent inférieures à -3 °C jusqu'à mi-pente ; **Figure 189 et 257 ; Annexe 13 ; p 522**). C'est le secteur le plus abrité, ce qui a certainement permis à l'air froid de ne pas être chassé par le vent. Aucune inversion thermique n'est constatée sur le reste de l'itinéraire. Au contraire, les températures les plus froides sont même de façon inattendue observées sur les hauteurs de Parfouru-sur-Odon et de Landes-sur-Ajon (**Figure 189**).

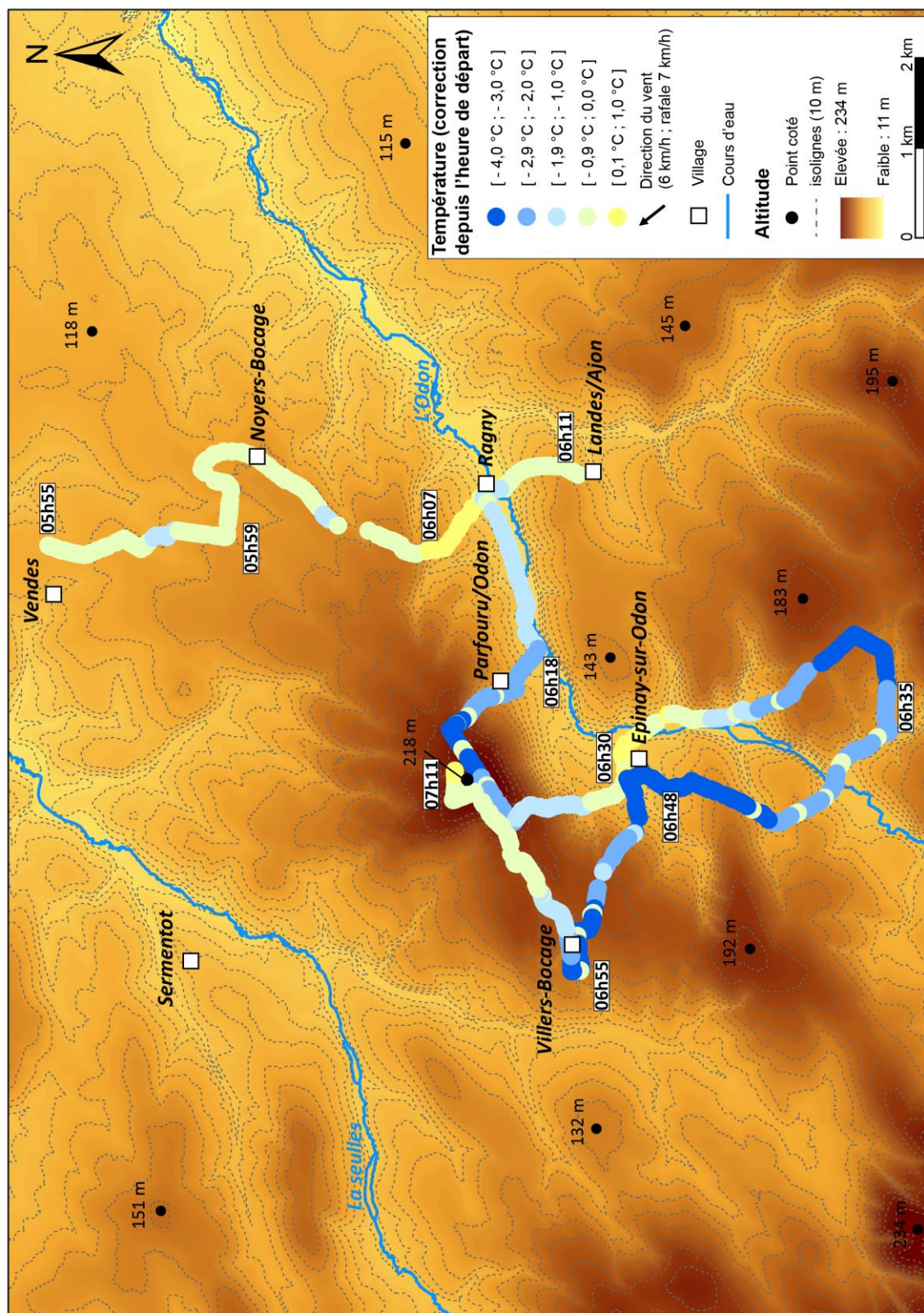
Figure 189 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 15 avril 2021



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger accroché sur l'antenne d'un véhicule de 05h48 à 07h11 le 15/04/21 ; vitesse moyenne de déplacement de 31,8 km/h ; MNT IGN 25 m).

Le 19 avril 2021, le temps est clair (**Figure 254** – Annexes) avec également un faible vent mais cette fois-ci avec une orientation du sud-est (6 km/h de moyenne). Les contrastes de température sont de la même ampleur que lors des relevés précédents, puisqu'ils vont de -4 à $+1$ °C (**Figure 190** et **Figure 258** ; p 523). Les mesures ne montrent pas d'inversions thermiques. Comme pour la carte du 15 avril, les températures les plus faibles sont observées dans la partie sud-ouest de l'itinéraire. Toutefois, les secteurs les plus froids du 15 avril ne correspondent pas avec ceux du 19 avril. En entrant dans la vallée de l'Odon, on peut supposer une inversion de température. En effet, elle est positive sur les versants de Noyers-Bocage et de Landes-sur-Ajon, tandis qu'elle est négative (entre -1 et -2 °C) dans le fond de vallée. La température chute à mesure que l'on monte sur les hauteurs de Parfouru-sur-Odon et descend même jusqu'à $-3,1$ °C au-dessus de 190 m d'altitude NGF (contre 80 d'altitude NGF pour le fond de vallée). Pourtant, la température est positive quelques dizaines de minutes plus tard en montant par le versant opposé, soit un écart de près de 5 °C sur une même colline. Ce même type de contraste est observé au sud-est de Villers-Bocage. Le premier passage dans le village d'Épinay-sur-Odon révèle une température autour de 0 °C alors qu'elle est comprise entre -3 et -4 °C quelques dizaines de minutes plus tard (**Figure 191**). Dans ces deux cas, la descente de l'air froid aurait-elle pu s'enclencher après le premier passage ? Le plus troublant réside dans certaines variations de températures en quelques mètres comme sur le versant de Parfouru-sur-Odon (**Figure 192**). Sur cette portion les températures sont inférieures à -2 °C mais elle est entrecoupée par quelques points à $-0,4$ °C dans le village à mi-versant ou encore $-0,5$ et $-0,7$ °C sur la partie haute. En quelques mètres, on passe de $-3,2$ à $-0,7$ °C. Ces variations de températures difficilement explicables ont lieu à plusieurs reprises au cours du transect (**Figure 258**).

Figure 190 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 19 avril 2021



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un data logger accroché sur l'antenne d'un véhicule de 05h55 à 07h01 le 19/04/21 ; vitesse moyenne de déplacement de 33 km/h ; MNT IGN 25 m).

Figure 191 : Evolution de la température sur le transect du 19 avril 2021 à Epinay-sur-Odon

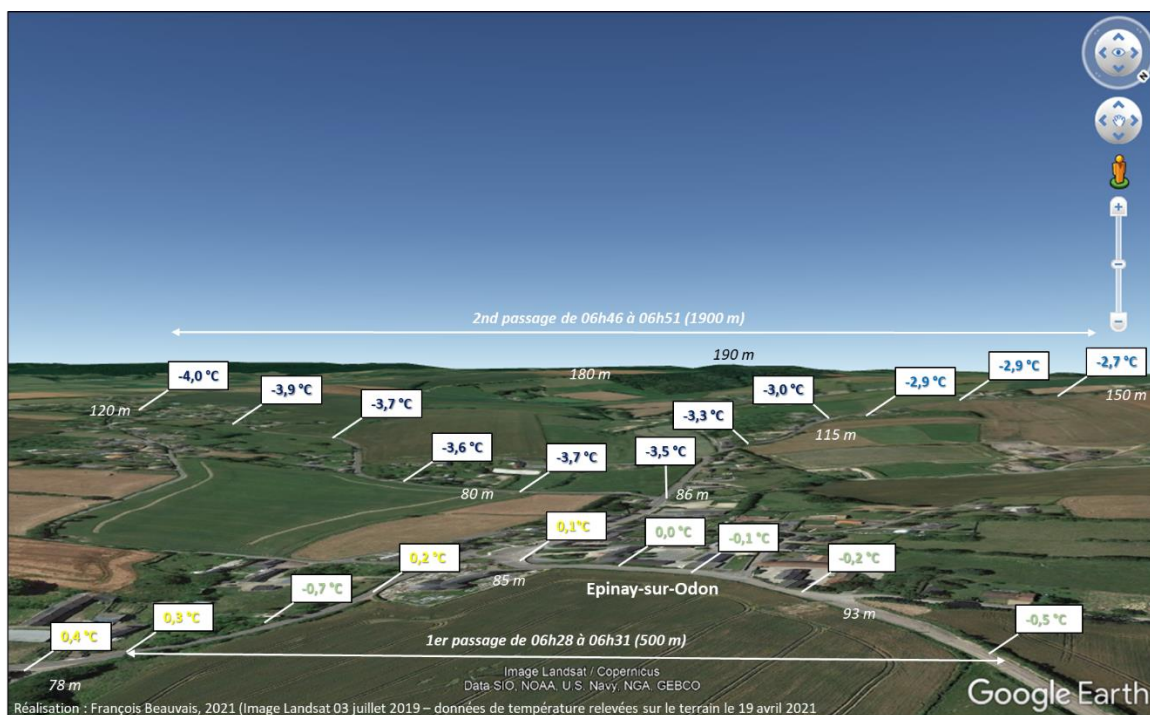
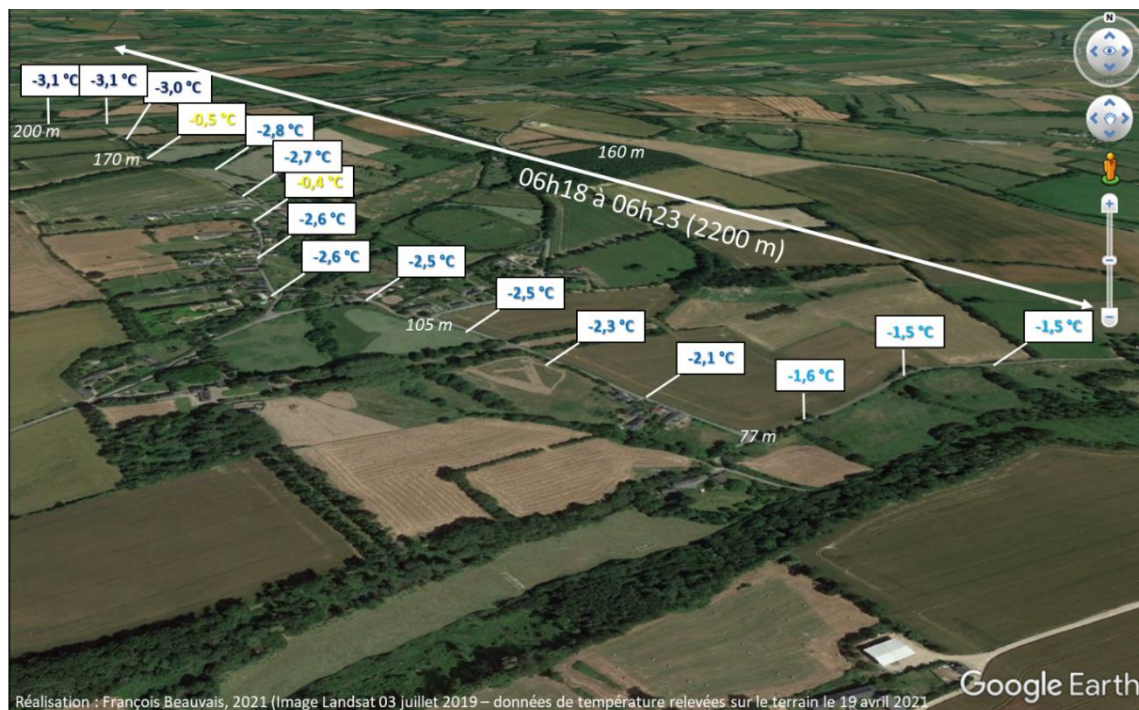


Figure 192 : Evolution de la température sur le transect du 19 avril 2021 à Parfouru-sur-Odon



Les conditions n'étaient probablement pas favorables à l'installation d'inversions de température sur ces deux jours de relevés puisque le temps n'était pas totalement clair et calme.

Toutefois, ces exemples de mesures en itinérance sur le terrain confirment une diversité spatiale des températures diurnes et nocturnes quelle que soit la saison. De jour par beau temps, des différences de quelques dixièmes de degrés peuvent être observées entre les versants au vent et

sous le vent, ou selon l'occupation du sol. Des contrastes plus importants de température ont été relevés pour des secteurs plus vallonnés, dans le cadre de situations gélives nocturnes, avec une répartition spatiale du froid parfois surprenante à première vue. En effet, dans le contexte atmosphérique en limite pour la formation d'inversions thermiques lors de nos expérimentations, nous avons ainsi traversé de petits réservoirs froids à mi-pente et au contraire été épargnés par ce phénomène en fond de vallée, là où on l'attendait... On propose ici une explication faisant intervenir une combinaison entre les facteurs géographiques d'échelle fine et le type de temps : le fond de vallée relativement large et ouvert est alors le siège d'un léger flux empêchant la formation d'une poche froide, alors que des secteurs plus confinés le long des pentes bénéficient d'une microtopographie propice à stagnation de l'air (talus, haies ; annexe 14).

Pour valider ces hypothèses, des études complémentaires seront nécessaires, notamment avec la réalisation de nouveaux transects en itinérances pour différents types de temps et également l'application de réflexion en cours sur les protocoles de mesures (protection de la sonde, vitesse de déplacement...) pour reproduire et valider les résultats des prochaines campagnes de mesures. Des relevés simultanés en postes fixes disposés le long des versants parcourus lors des itinérances permettront de mieux apprécier les mécanismes à l'œuvre et leurs dynamiques temporelles.

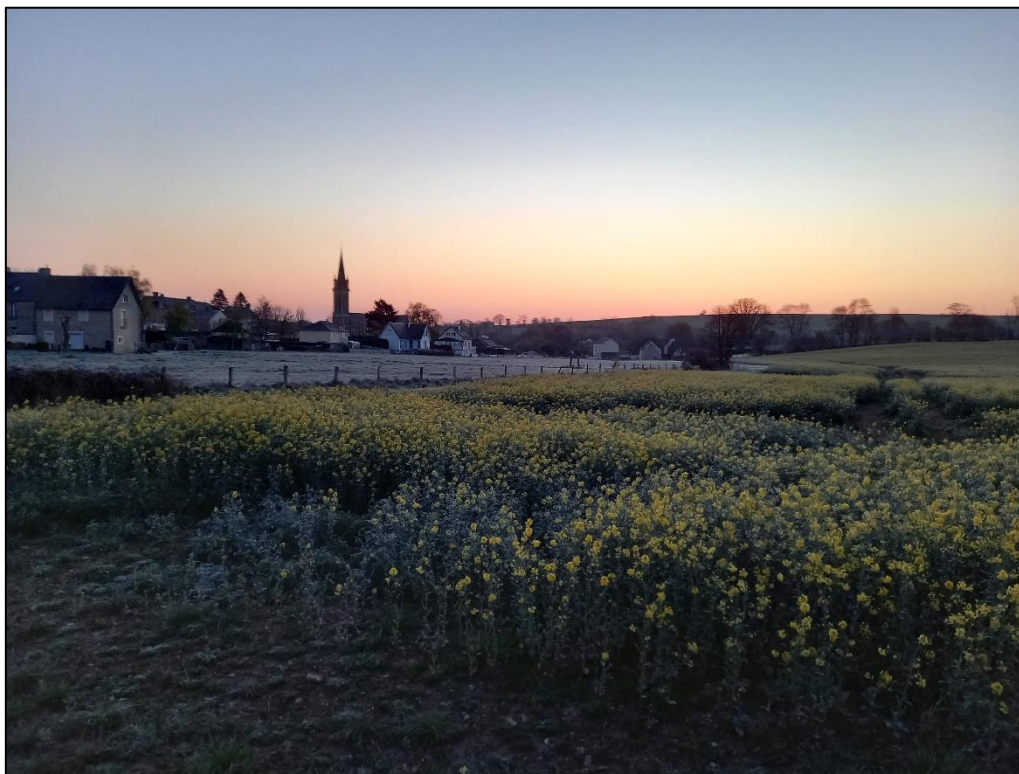
Malgré les limites évoquées ci-dessus, ces relevés de terrain ont vocation à exposer le fait que des contrastes de températures importants peuvent être observés localement. Les conséquences de la chaleur ou du froid sur les cultures peuvent ne pas être identiques selon la localisation et l'environnement propre à chaque parcelle sur un même secteur. Certaines peuvent être davantage touchées que d'autres avec des pertes de rendement inégales. Durant les deux transects réalisés en avril 2021, le blé tendre est en cours de montaison (**Figure 193**). Il est sensible à des gelées inférieures ou égales à - 4 °C. Nous avons également observé des stades montaison très avancés pour l'orge (épi + 27 cm) et floraison pour le Colza (**Figure 194**). D'ailleurs, Augustin Sallent, salarié agricole sur l'exploitation d'Eric Lemarinier, précise à la suite d'une réunion technique, qu'un technicien de la Coopérative de Creully a observé des dégâts sur les cultures situées dans les fonds de vallées autour de Villers-Bocage. Ces éléments sont également valables pour l'exposition aux températures élevées comme nous l'avons montré dans les plaines agricoles d'Hermanville et de Saint-Manvieu-Norrey pendant le remplissage des grains.

Figure 193 : Photographies associées au secteur le plus froid du transect du 15 avril 2021



A : blé tendre au stade épi 1 cm ; B : photo de la parcelle de blé tendre et d'orge ; C : orge épi 27 cm ; D : feuilles d'orge gelées (photographie : F. Beauvais., 15-04-2021)
Température relevée lors du passage sur la route entre ces deux parcelles : - 3,5 °C (bas des parcelles) et -3,3 °C (haut des parcelles) - derniers hectomètres du transect.

Figure 194 : Parcelle de colza en floraison dans le fond de vallée d'Epinais-sur-Odon le 19 avril 2021 à 06h49 (température relevée *in situ* : -3,6 °C)



Des études approfondies sur la vulnérabilité différentielle des parcelles agricoles permettraient d'apporter des connaissances pour le conseil agricole et le choix des assolements et rotations culturales pour la filière agricole selon les lieux. A titre d'exemple, dans les prochaines décennies, de nouvelles cultures pourraient être introduites dans les rotations culturales, dans le but de remplacer des cultures devenues délicates à produire en raison du changement climatique ou bien parce que le climat futur autoriserait la faisabilité de nouvelles cultures. Il conviendra alors de ne pas négliger la vulnérabilité à certains aléas qui peut différer en quelques kilomètres ou hectomètres.

Là encore, une meilleure précision de la résolution du modèle régional permettrait d'affiner les conditions climatiques simulées dans la Plaine agricole. Néanmoins, même dans le cas d'une résolution kilométrique, nous pouvons supposer qu'elle serait insuffisante pour représenter les contrastes de température que nous venons d'exposer à échelle très fine. Le recours à des descentes d'échelles environnementales depuis les données kilométriques en tenant compte des relevés de terrain pourraient alors être envisagées. Il s'agirait dans ce cas de tenir compte des écarts qui s'opèrent entre les stations disposées sur le terrain et les données de la maille selon des types de temps pour procéder à cette affinement des données dans l'espace. Dans ce cas la chaîne de traitements statistiques pourrait s'inspirer de la « *régression environnementale* » présentée par Martin et al en 2013.

7.1.4. Diversité de la température dans la parcelle agricole

Les résultats précédents démontrent des différences de températures en quelques hectomètres et donc possiblement à l'intérieur même de certaines parcelles agricoles. Ce constat est également observé dans la parcelle d'Anguerny en procédant à des enregistrements sur plusieurs journées consécutives. L'ensemble des caractéristiques relatives à l'expérimentation de la parcelle est exposé dans le chapitre méthodologique, mais nous rappelons ici brièvement quelques éléments de présentation. La parcelle d'Anguerny présente un faible dénivelé, de l'ordre de quelques mètres. Le bas de cette parcelle est bordé au nord par des habitations individuelles et des arbres d'environ 10 mètres de hauteur. Nous avons voulu vérifier si le bas de parcelle, plus abrité pouvait présenter des températures plus élevées que le haut. Pour cela, nous avons disposé un enregistreur à chacune des deux extrémités de la parcelle du 24 juin 2019 13h00 au 1^{er} juillet 2019 15h15 (logger 2 en partie basse et logger 6 en partie haute ; UTC + 2h).

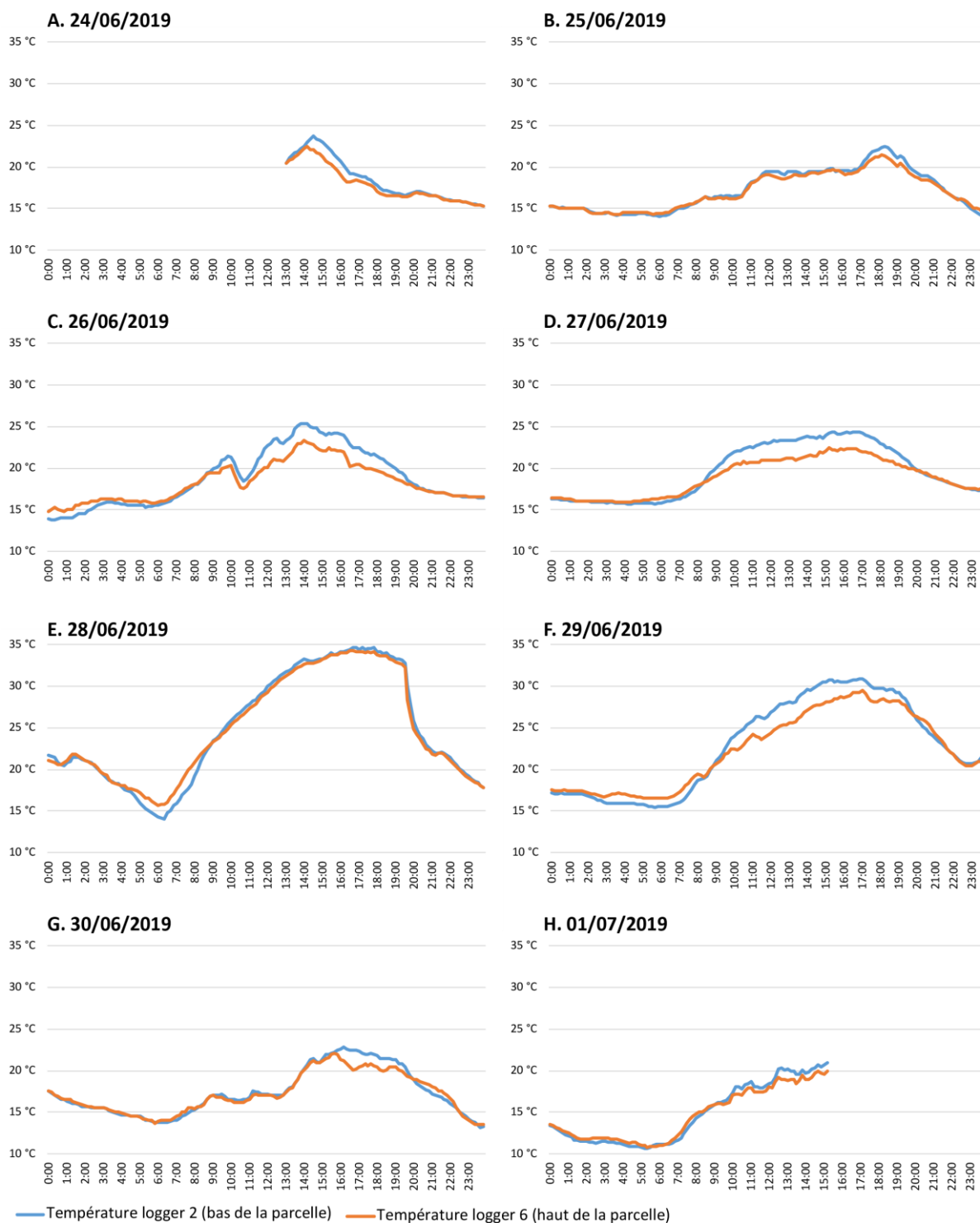
Sur l'ensemble de la période de mesure, la température moyenne mesurée est de 19,5 °C en bas de la parcelle contre 19,2 °C en haut. Toutefois, on constate que les écarts sont parfois beaucoup plus prononcés (**Figure 195**). Ils coïncident avec les phases où le vent est de direction nord en journée (**Tableau 47**). Le bas de la parcelle, plus abrité, connaît alors une température supérieure à la partie haute davantage exposée au vent. En effet, le haut du champ est plus éloigné des arbres et pavillons qui abritent le bas. Aussi, la légère surélévation de quelques mètres l'expose un peu plus au vent. Mais un écart est également constaté lorsque le vent est de secteur sud-est ou sud. Le bas de la parcelle est alors davantage sous le vent que le haut. Ce constat se matérialise notamment sur les températures maximales enregistrées au cours de la journée. La température maximale est en moyenne 1,2 °C plus élevée en bas qu'en haut de la parcelle.

La première heure d'enregistrement, le 24 juin 2019, ne révèle pas de différence de température puisque le vent est de secteur est et affecte de façon comparable les deux sites (**Figure 195 A**). Mais dès 14h00, il tourne au nord (**Tableau 47**). Jusqu'à 19h00, un écart d'un degré est relevé entre la partie abritée (bas du champ) et celle exposée au vent (haut du champ). La différence de température atteint au maximum 1,3 °C. Le jour suivant le vent est de secteur nord-ouest mais c'est à partir de 17h00 qu'il tourne au nord (**Figure 195 B** et **Tableau 47**). Une différence de température de 0,8 °C est constatée sur la période 17h00 – 21h00. Le 26 juin (**Figure 195 C**), le vent est au nord sur quasiment toute la journée (**Tableau 47**). Un écart de température entre les deux enregistreurs s'installe dès 9h00 jusqu'à 20h00. Il est en moyenne de 1,7 °C mais atteint jusqu'à 2,1 °C. La partie abritée de la parcelle est en échaudage thermique de 13h40 à 14h20 tandis que la partie haute ne dépasse pas ce seuil de la journée, c'est-à-dire que le bas de la parcelle est susceptible de cumuler davantage cet aléa. Elle est donc plus vulnérable à l'arrêt du remplissage des grains. Le 27 juin, la température du logger 2 est supérieure de 1,7 °C à celle du logger 6 (1,9 °C d'écart au maximum ; **Figure 195 D**). Le 28 juin, la température est équivalente entre le haut et le bas du champ mais le vent est orienté à l'est durant toute la journée (**Figure 195 E** et **Tableau 47**). De ce fait, la partie est de la parcelle étant découverte, que l'on se trouve en haut ou en bas, l'exposition est similaire. Mais le 29 juin, le vent est orienté sud-est et sud (**Tableau 47**). De 9h30 à 21h00, la température de la partie sous le vent est plus élevée de 0,6 °C (**Figure 195 F**). Le 30 juin, le vent est au nord-ouest mais il tourne au nord en fin de journée (**Tableau 47**). De 15h50 à 19h40 un écart de 1,3 °C est relevé (**Figure 195 G**). Pour autant celui concernant les températures maximales n'est que de 0,7 °C puisque la température du haut de la parcelle atteint son maximum juste avant

que le vent ne tourne, à 15h40 (22,1 °C) et que le bas de la parcelle l'atteint 30 minutes plus tard (22,8 °C). Le vent du nord ramenant un peu de fraîcheur engendre une baisse de la température, mais plus prononcée sur la zone non abritée. Enfin le 1^{er} juillet, un faible écart s'installe dès 09h30 jusqu'à ce que le matériel soit retiré (**Figure 195 H**).

Par ailleurs, des différences de température sont également observées le matin au lever du jour. C'est le cas le 28 juin et le 29 juin où la différence de température entre le haut et le bas de la parcelle atteint jusqu'à 1,4 (07h10) et 2,2 °C (07h40) après le lever du jour. Dans ce cas, la partie basse connaît une température plus faible. Le 28 juin, le vent est faible. Le 29 juin, il est orienté sud-est. Le temps clair favorise la fraîcheur au lever du jour et elle est plus prononcée dans les zones abritées. Lors de la nuit du 25 au 26 juin, une brume s'installe sur Anguerny. Le temps est clair et calme. Une différence de température est constatée. Elle atteint jusqu'à 1,5 °C à 00h20. Nous pouvons alors supposer, dans le cas par exemple de basses températures lors de la méiose qui se déroule au printemps, que le blé serait plus vulnérable dans le bas de la parcelle. Les températures plus fraîches en fin de nuit en bas du versant peuvent s'expliquer par la stagnation plus facile du froid, bloqué par les haies alors que sur le haut de la parcelle celui-ci a plus de mal à se former et à stagner en raison du caractère plus ouvert (pas de confinement) et de l'écoulement de l'air plus dense dans le sens de la pente.

Figure 195 : Comparaison de température entre le haut et le bas de la parcelle d'Anguerny du 24 juin au 1^{er} juillet 2019



François Beauvais., 2019 (données relevées sur la parcelle d'Anguerny du 24 juin 2019 13h00 au 01 juillet 2019 15h15 ; disposition de deux logge température avec abris Barani en bas et en haut de la parcelle d'Anguerny pour un enregistrement toutes les 10 minutes).

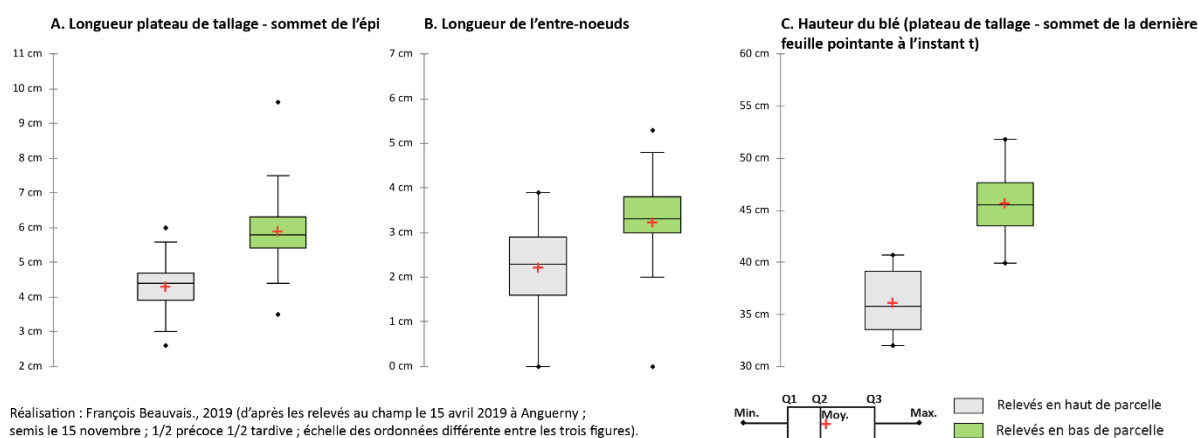
Tableau 47 : Orientation et force du vent (moyenne et rafale) du 24 juin au 1er juillet 2019 à la station Météo-France de Caen-Carpiquet

	24/06/19	25/06/19	26/06/19	27/06/19	28/06/19	29/06/19	30/06/19	01/07/19
23 h	16 km/h (25 km/h) ↘	2 km/h (6 km/h) ↘	15 km/h (29 km/h) ↘	10 km/h (28 km/h) ↘	12 km/h (17 km/h) ↘	23 km/h (39 km/h) ↗	5 km/h (7 km/h) ↗	6 km/h (15 km/h) ↗
22 h	14 km/h (24 km/h) ↘	5 km/h (13 km/h) ↘	14 km/h (40 km/h) ↘	13 km/h (26 km/h) ↘	13 km/h (23 km/h) ↘	22 km/h (36 km/h) ↗	3 km/h (13 km/h) ↘	10 km/h (22 km/h) ↗
21 h	12 km/h (18 km/h) ↘	8 km/h (14 km/h) ↘	21 km/h (47 km/h) ↘	14 km/h (26 km/h) ↘	14 km/h (28 km/h) ↘	24 km/h (35 km/h) ↗	9 km/h (22 km/h) ↘	14 km/h (31 km/h) ↗
20 h	8 km/h (15 km/h) ↘	9 km/h (18 km/h) ↘	17 km/h (42 km/h) ↘	15 km/h (35 km/h) ↘	20 km/h (32 km/h) ↘	23 km/h (35 km/h) ↗	12 km/h (24 km/h) ↘	15 km/h (31 km/h) ↗
19 h	9 km/h (19 km/h) ↘	10 km/h (17 km/h) ↘	27 km/h (46 km/h) ↘	15 km/h (30 km/h) ↘	18 km/h (28 km/h) ↘	16 km/h (27 km/h) ↗	12 km/h (24 km/h) ↘	17 km/h (31 km/h) ↗
18 h	14 km/h (25 km/h) ↘	10 km/h (22 km/h) ↘	27 km/h (44 km/h) ↘	19 km/h (36 km/h) ↘	15 km/h (25 km/h) ↘	18 km/h (30 km/h) ↗	15 km/h (26 km/h) ↘	15 km/h (28 km/h) ↗
17 h	14 km/h (21 km/h) ↘	12 km/h (23 km/h) ↘	23 km/h (37 km/h) ↘	19 km/h (39 km/h) ↘	16 km/h (27 km/h) ↘	16 km/h (24 km/h) ↗	16 km/h (31 km/h) ↘	16 km/h (32 km/h) ↗
16 h	10 km/h (16 km/h) ↘	13 km/h (20 km/h) ↘	18 km/h (30 km/h) ↘	21 km/h (37 km/h) ↘	17 km/h (29 km/h) ↘	17 km/h (34 km/h) ↗	13 km/h (28 km/h) ↘	18 km/h (31 km/h) ↗
15 h	6 km/h (13 km/h) ↘	9 km/h (17 km/h) ↘	17 km/h (29 km/h) ↘	21 km/h (38 km/h) ↘	19 km/h (31 km/h) ↘	18 km/h (31 km/h) ↗	12 km/h (27 km/h) ↘	13 km/h (22 km/h) ↗
14 h	4 km/h (9 km/h) ↘	2 km/h (14 km/h) ↘	18 km/h (33 km/h) ↘	21 km/h (32 km/h) ↘	17 km/h (27 km/h) ↘	18 km/h (28 km/h) ↗	13 km/h (22 km/h) ↘	11 km/h (23 km/h) ↗
13 h	6 km/h (10 km/h) ↘	7 km/h (13 km/h) ↘	15 km/h (31 km/h) ↘	19 km/h (28 km/h) ↘	15 km/h (25 km/h) ↘	15 km/h (23 km/h) ↗	14 km/h (24 km/h) ↘	17 km/h (30 km/h) ↗
12 h	6 km/h (21 km/h) ↘	4 km/h (13 km/h) ↘	22 km/h (34 km/h) ↘	15 km/h (26 km/h) ↘	15 km/h (26 km/h) ↘	13 km/h (22 km/h) ↗	8 km/h (19 km/h) ↘	16 km/h (27 km/h) ↗
11 h	15 km/h (21 km/h) ↘	10 km/h (15 km/h) ↘	18 km/h (33 km/h) ↘	15 km/h (28 km/h) ↘	15 km/h (26 km/h) ↘	12 km/h (23 km/h) ↗	6 km/h (27 km/h) ↘	12 km/h (24 km/h) ↗
10 h	7 km/h (15 km/h) ↘	10 km/h (19 km/h) ↘	12 km/h (21 km/h) ↘	15 km/h (25 km/h) ↘	19 km/h (30 km/h) ↘	14 km/h (21 km/h) ↗	13 km/h (35 km/h) ↘	14 km/h (26 km/h) ↗
9 h	9 km/h (23 km/h) ↘	9 km/h (14 km/h) ↘	13 km/h (20 km/h) ↘	14 km/h (26 km/h) ↘	20 km/h (31 km/h) ↘	10 km/h (14 km/h) ↗	23 km/h (37 km/h) ↘	13 km/h (20 km/h) ↗
8 h	18 km/h (36 km/h) ↘	9 km/h (15 km/h) ↘	3 km/h (13 km/h) ↘	12 km/h (19 km/h) ↘	11 km/h (18 km/h) ↘	8 km/h (13 km/h) ↗	24 km/h (34 km/h) ↘	9 km/h (18 km/h) ↗
7 h	13 km/h (23 km/h) ↘	4 km/h (7 km/h) ↘	10 km/h (15 km/h) ↘	11 km/h (24 km/h) ↘	9 km/h (17 km/h) ↘	10 km/h (12 km/h) ↗	19 km/h (29 km/h) ↘	10 km/h (16 km/h) ↗
6 h	16 km/h (31 km/h) ↘	4 km/h (9 km/h) ↘	8 km/h (13 km/h) ↘	14 km/h (27 km/h) ↘	10 km/h (18 km/h) ↘	7 km/h (12 km/h) ↗	10 km/h (24 km/h) ↘	9 km/h (16 km/h) ↗
5 h	4 km/h (21 km/h) ↘	6 km/h (19 km/h) ↘	5 km/h (12 km/h) ↘	13 km/h (25 km/h) ↘	6 km/h (15 km/h) ↘	12 km/h (15 km/h) ↗	14 km/h (30 km/h) ↘	9 km/h (18 km/h) ↗
4 h	15 km/h (20 km/h) ↘	9 km/h (31 km/h) ↘	5 km/h (13 km/h) ↘	10 km/h (18 km/h) ↘	9 km/h (14 km/h) ↘	13 km/h (14 km/h) ↗	17 km/h (31 km/h) ↘	12 km/h (17 km/h) ↗
3 h	10 km/h (14 km/h) ↘	17 km/h (29 km/h) ↘	5 km/h (9 km/h) ↘	12 km/h (25 km/h) ↘	7 km/h (15 km/h) ↘	13 km/h (15 km/h) ↗	18 km/h (28 km/h) ↘	11 km/h (17 km/h) ↗
2 h	10 km/h (13 km/h) ↘	19 km/h (30 km/h) ↘	4 km/h (8 km/h) ↘	12 km/h (28 km/h) ↘	9 km/h (14 km/h) ↘	15 km/h (18 km/h) ↗	19 km/h (28 km/h) ↘	8 km/h (12 km/h) ↗
1 h	9 km/h (12 km/h) ↘	9 km/h (37 km/h) ↘	3 km/h (5 km/h) ↘	13 km/h (23 km/h) ↘	8 km/h (21 km/h) ↘	14 km/h (20 km/h) ↗	11 km/h (23 km/h) ↘	9 km/h (15 km/h) ↗
0 h	10 km/h (15 km/h) ↘	13 km/h (29 km/h) ↘	3 km/h (5 km/h) ↘	13 km/h (25 km/h) ↘	9 km/h (20 km/h) ↘	17 km/h (23 km/h) ↗	15 km/h (33 km/h) ↘	12 km/h (16 km/h) ↗

Données : station Météo-France de Caen-Carpiquet (in meteoociel.fr)

Les données relevées au champ exposent qu'une différence de température peut être observée au sein d'une même parcelle agricole. L'occupation du sol et le relief à échelle fine expliquent ce constat. Par conséquent, le blé tendre d'hiver peut être exposé différemment à certains aléas. Lors du remplissage des grains, le blé semé en bas de la parcelle instrumentée à Anguerny est plus vulnérable à l'échaudage thermique lorsque le vent est de secteur nord ou sud. On peut supposer également en hiver que le bas de la parcelle peut rencontrer des gelées plus prononcées par temps clair et calme. Ces différences de températures ont des effets sur la phénologie de la plante. Elle est plus avancée dans la partie abritée. Cet élément est constaté au printemps lors de la montaison (**Figure 196**). D'ailleurs, les prélèvements entre le haut et le bas de parcelle au stade 2 nœuds en témoignent. Pour cela nous avons mesuré la longueur entre le plateau de tallage et le sommet de l'épi, l'entre-nœud et la hauteur du blé (plateau de tallage – sommet de la dernière feuille pointant à l'instant t) pour 25 pieds prélevés sur un rang. Le sommet de l'épi est en moyenne à +5,9 cm du plateau de tallage dans le bas de la parcelle tandis qu'il n'est qu'à 4,2 cm sur la partie haute. L'entre-nœud est plus long d'un centimètre dans la partie abritée. Enfin, la hauteur du blé est de 46 cm dans la partie basse contre 36 cm dans la partie haute. A la fin du cycle, la maturité physiologique est atteinte quelques jours plus tôt dans la partie abritée. Pour Eric Lemarinier exploitant la parcelle, un écart de quelques jours est constaté.

Figure 196 : Différence d'avancement de la phénologie entre le haut et le bas de la parcelle le 15 avril 2019 à Anguerny



Le bas de la parcelle connaît donc un environnement plus favorable au développement du blé mais il est plus fragile toutefois que le haut de la parcelle, d'une part en cas de froid tardif à la montaison et à la méiose et d'autre part en cas de fortes chaleurs pendant le remplissage des grains.

En définitive, les suivis à échelles fines présentés dans cette sous-partie permettent de révéler des informations utiles à la compréhension de différences de développement végétal sur des distances très réduites qui ne peuvent être perçues à l'échelle des mailles SAFRAN de 8x8 km des modèles climatiques. Ainsi, on constate des écarts de températures selon la distance à la mer (inertie thermique de l'océan et brises de mer), des effets d'abri procurés par les reliefs ou l'occupation du sol pouvant engendrer dans l'espace une vulnérabilité différentielle du blé tendre aux aléas climatiques en quelques hectomètres seulement.

7.2. L'intérêt d'un suivi à échelle fine

Les données enregistrées au cours du cycle 2018-2019 sur la parcelle de blé tendre d'Anguerny a permis de relever les stades phénologiques. Les données météorologiques enregistrées permettent également de connaître les aléas que la plante a pu rencontrer au cours du cycle et de comparer ceux-ci à la Normale climatique. Aussi, ces données sont utiles car disposées en entrée du bilan hydrique qui est ensuite comparé aux relevés pédologiques de teneur en eau *in situ*.

7.2.1. Suivi du cycle 2018-2019 à Anguerny

Le cycle 2018-2019 a été marqué par une précocité des stades phénologiques de l'hiver et du printemps. Ainsi en comparant les dates d'apparitions observées au champ avec celle théoriquement recalculées sur la Normale 1991-2020 (données de la station de Caen-Carpiquet), le stade épi 1 cm est avancé de 12 jours en raison de la douceur hivernale. Cette anticipation se tasse ensuite puisqu'elle n'est plus que de 4 jours à l'épiaison et à la récolte (Tableau 48).

Tableau 48 : Comparaison des dates des stades phénologiques observées au champ sur la parcelle d'Anguerny avec celles calculées sur la Normale 1991-2020

Périodes phénologiques	2018-2019	Normale 1991-2020
Semis	15-nov.	15-nov.
Levée	3-déc.	5-déc.
Début tallage	22-déc.	30-déc.
Epi 1 cm	27-mars	8-avr.
2 nœuds	14-avr.	22-avr.
Méiose	11-mai	19-mai
Epiaison	21-mai	25-mai
Floraison	1-juin	4-juin
Grain laiteux	23-juin	26-juin
Grain pateux	4-juil.	5-juil.
Maturité physiologique	20-juil.	23-juil.
Récolte	1-août	05-août

Réalisation : François Beauvais., 2021 (les dates des stades phénologiques 2018-2019 correspondent à l'observation de terrain sur la parcelle d'Anguerny ; les dates moyennes de la Normale 1991-2020 correspondent à celles obtenues en calculant les sommes de température à partir des données de la station Météo-France de Caen-Carpiquet).

La Figure 198 expose l'évolution de la température au cours du cycle. Neuf jours d'échaudage thermique sont survenus entre la méiose et la maturité physiologique, soit un cumul situé dans la normale. La réduction du rendement étant de 1,5 q/ha par jour de chaleur, on estime théoriquement une perte de 13,5 q/ha. Sans l'anticipation des stades, ce chiffre aurait été beaucoup plus conséquent puisque cinq jours succédant à la maturité furent échaudant. Le blé a donc échappé de peu aux deux extrêmes : 37,8°C (23 juillet) et 39,7°C (25 juillet). Ces derniers n'ont donc pas impacté le rendement puisque celui-ci était déjà élaboré.

Une journée d'échaudage thermique est considérée lorsque la température maximale dépasse 25°C. Elle est d'autant plus handicapante lorsqu'elle excède 28°C, seuil à partir duquel le remplissage des

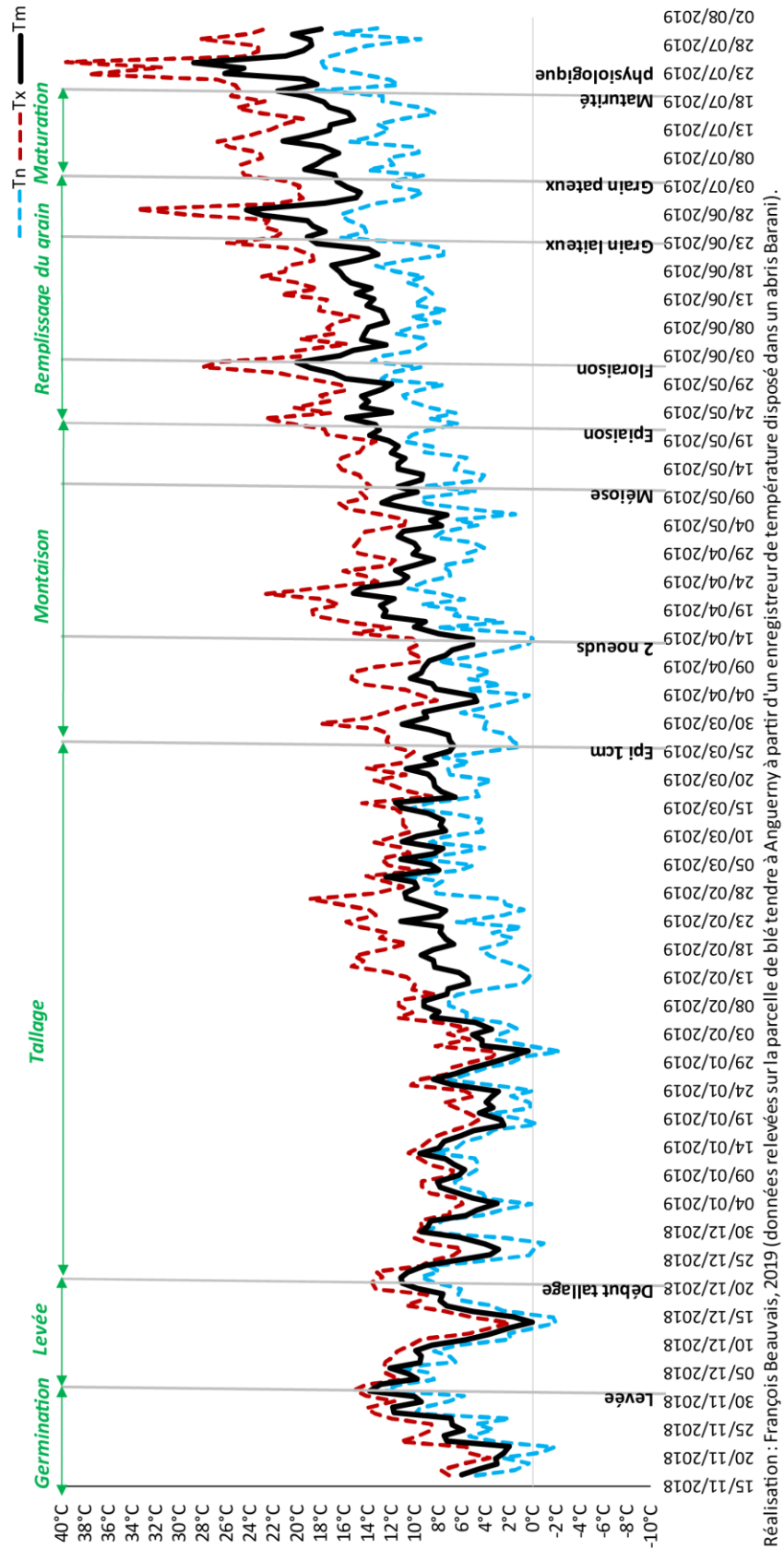
grains peut être interrompu sans reprise. Deux journées connaissent un échaudage thermique au-delà de 28 °C, engendrant théoriquement un arrêt sans reprise du remplissage. Il s'agit des 28 et 29 juin pendant le stade laiteux. Le seuil a été franchi sur une durée de 3h le premier jour (maximum de 29,4°C) et de 8h pour le second (maximum de 33,7°C). Théoriquement, les excès thermiques après le stade laiteux limitent la migration des sucres vers le grain, ce qui limite le PMG (Poids de Mille Grains). Les dégâts sont toutefois plus faibles que lorsqu'ils surviennent entre la floraison et le grain laiteux, moment où ils affectent la multiplication cellulaire dans les grains (réduction de leur taille ; Arvalis, 2017¹¹⁴). En revanche, une température maximale de 28,1°C a été relevée en pleine floraison (1^{er} juin), soit 1,9°C en dessous du seuil à partir duquel la stérilité peut être de 50 % (Tashiro et De Wardlaw, 1990). Le vent étant de sud, le bas de la parcelle (sous le vent) a potentiellement pu approcher ou atteindre le seuil de 30 °C. Néanmoins, cette période du cycle correspond à la pleine croissance de l'épi et une réduction de la fertilité peut apparaître dès lors que le seuil de 25 °C est franchi (Gate, 1995). Quelques grains non remplis furent retrouvés dans les prélèvements réalisés avant le stade laiteux. Cependant, de basses températures proches de +4 °C furent constatées autour de la méiose : 5,4 °C le 07/05 ; 4,9 °C le 10/05 ; 4,5 °C le 12/05 et 4,1 °C le 13/05. Le temps étant ces jours-là clair et calme, on peut supposer que les températures furent inférieures à ce seuil dans le bas de la parcelle, notamment les 12 et 13 mai. On notera tout de même que le ciel dégagé a permis d'éviter un rayonnement journalier inférieur à 200 cal/cm². En plus des basses températures, cet aléa aurait probablement engendré des dégâts désastreux.

Figure 197 : Enregistreur de température et pluviomètre sur la parcelle de blé tendre d'Anguerny le 15 avril 2019



¹¹⁴ <https://www.arvalis-infos.fr/quelles-consequences-des-temperatures-elevees-sur-le-remplissage-des-grains--@/view-24874-arvarticle.html>

Figure 198 : Evolution de la température sur la parcelle d'Anguerny du 15 novembre 2018 au 02 août 2019 lors des différentes phases phénologiques du blé tendre d'hiver observées au champ



Réalisation : François Beauvais, 2019 (données relevées sur la parcelle de blé tendre à Anguerny à partir d'un enregistreur de température disposé dans un abris Barani).

Le bilan hydrique a été déterminé pour un enracinement maximal de 55 cm. En effet, les racines sont observées jusqu'à 50 cm lors de l'ouverture de la fosse le 2 avril 2019. Au stade épi 1 cm, l'enracinement du blé atteint 90 % de son potentiel en sol limoneux (Gate, 1995). Le RUM déterminé est alors de 106 mm (cf. chapitre 3). Le déficit hydrique calculé pour la céréale lors du cycle 2018-2019 est de 137 mm, soit 42 mm de plus que la Normale climatique, sans toutefois atteindre le record sur cette Normale (200 mm en 2010). Ce cumul de manque d'eau pour le blé au cours du cycle peut engendrer des pertes d'environ 20 q/ha (Arvalis, 2017). Ce constat est également perceptible avec le confort hydrique (**Tableau 49**). La fin du cycle s'est d'ailleurs effectuée avec une valeur très faible de cet indicateur. Ce rapport ETR/ETM est de : 0,4 entre l'épiaison et la floraison ; 0,5 entre le grain laiteux et pâteux et 0,3 entre le grain pâteux et la maturité physiologique. Calculé sur la Normale, cet indicateur du stress hydrique est compris entre 0,6 et 0,7 sur ces phases phénologiques.

Tableau 49 : Comparaison du confort hydrique de l'année 2018-2019 avec le confort hydrique moyen de la Normale climatique 1991-2020

Périodes phénologiques	2018-2019	Normale 1991-2020
Semis - levée	1	1
Levée - début tallage	1	1
Début tallage - mi -tallage	1	1
Mi-tallage - Epi 1cm	1	0,9
Epi 1 cm - 2 nœuds	0,8	0,9
2 nœuds - Méiose	0,7	0,8
Méiose - Epiaison	0,6	0,7
Epiaison - Floraison	0,5	0,7
Floraison - Grain laiteux	0,6	0,7
Grain laiteux - grain pâteux	0,5	0,6
Grain pâteux - maturité	0,3	0,7

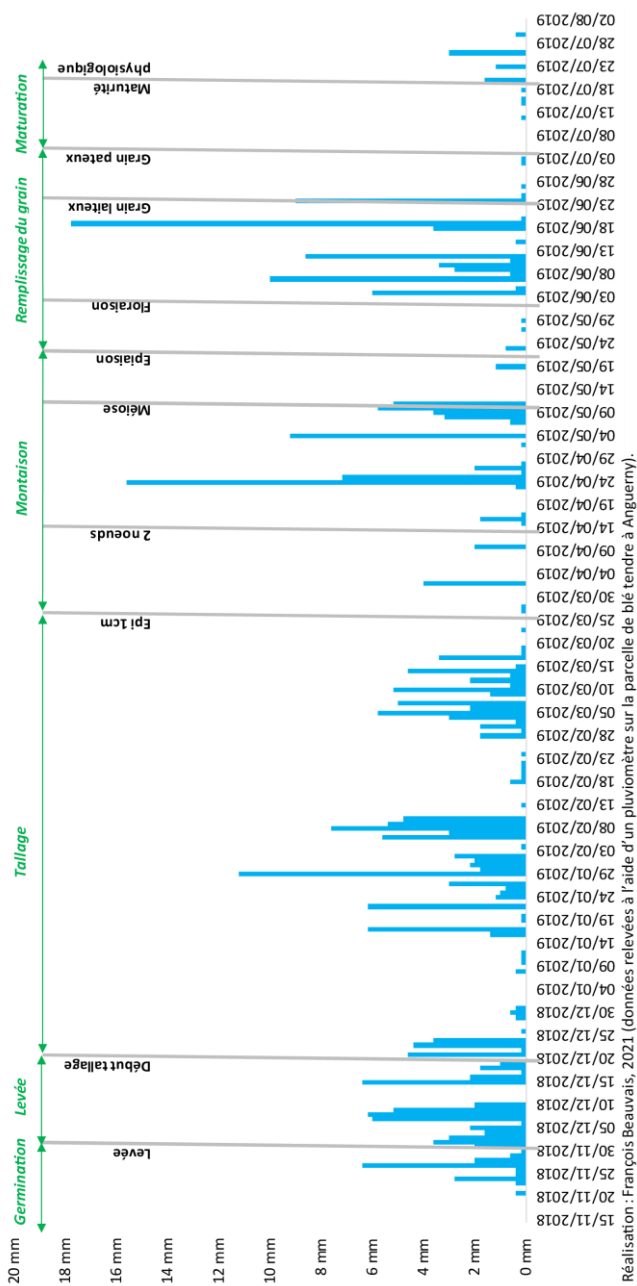
Réalisation : François Beauvais., 2021 (d'après le bilan hydrique à décroissance exponentielle de la RUD intégrant les coefficients culturaux pour le calcul de l'ETM ; données de la station Météo France de Caen-carpiquet (ETP Penman-Monteith ; précipitations pour la Normale 1991-2020) et relevées à Anguerny (précipitations pour le cycle 2018-2019).

Au cours de ce cycle, le blé n'a pas subi d'autres conditions défavorables. Le nombre de jours disponibles (92 jours) pour la vernalisation était supérieur à la Normale climatique (83 jours). Par ailleurs, le blé n'a pas rencontré de gelées inférieures à -5°C pendant la levée, ni à -10°C pendant le tallage. Il n'y a également pas eu de gels d'épis. Le rayonnement cumulé lors de la montaison s'élève à 21 330 cal/cm² ce qui est conforme à la Normale (21 032 cal/cm² ; données du point SAFRAN). Ce rayonnement permet alors de compenser les températures élevées pour maintenir le quotient photothermique et garantir un nombre de grains/épis important.

Le rendement de la parcelle à la récolte est excellent avec 110 q/ha. Ainsi, le déficit hydrique supérieur à la Normale lors de la montaison du remplissage des grains, les jours d'échaudage thermique lors du remplissage ou encore les basses températures à la méiose, n'ont pas empêché une productivité se situant dans les très bonnes années de l'exploitation agricole à laquelle cette parcelle est rattachée. Eric Lemarinier suppose que ces aléas ont peut-être engendré des pertes mais que les variétés sont désormais probablement plus tolérantes aux fortes températures et au manque

d'eau. Le recours au mélange de quatre variétés a aussi, selon lui, permis de limiter les pertes de rendement dans la mesure où elles pourraient ne pas être tout autant vulnérables à ces aléas. Mais c'est surtout l'absence de précipitations (2,4 mm) entre l'épiaison et la floraison (Figure 199), permettant d'éviter les maladies¹¹⁵, qui aurait, selon lui, permis un tel résultat.

Figure 199 : Evolution de la pluviométrie sur la parcelle d'Anguerny du 15 novembre 2018 au 02 août 2019 lors des différentes phases phénologiques du blé tendre d'hiver observées au champ



¹¹⁵ La fusariose de l'épi (*Fusarium* et *Microdochium*) se matérialise par des symptômes qui apparaissent deux à trois semaines après la floraison par une décoloration des épillets et un brunissement du col de l'épi. Le champignon se développe souvent lorsqu'il y a de la pluie et de l'humidité autour de la floraison (Siou, 2013) et plus précisément durant la période épiaison – floraison (Arvalis, site internet). Les pertes de rendements peuvent parfois atteindre -20 %, avec une perte de qualité pour la valeur boulangère et la présence de teneurs élevées en mycotoxines indésirables pour l'alimentation humaine (greenov-techna, site internet).

On ne peut évidemment pas monter en généralité à partir d'un seul cas concret. Cependant, cet exemple permet de questionner la vulnérabilité des exploitations et considérer que les maladies sont peut-être plus dommageables que certains aléas climatiques. Autrement dit, une sécheresse et des jours de chaleur sont-ils moins pénalisant que des maladies ? Si oui, jusqu'à quelle valeur de déficit hydrique et de jours d'échaudage pourrait-on affirmer cela ? L'archivage de suivis de parcelles au cours du temps permettrait de constituer une banque d'observations et d'aider à la comparaison des années et de corrélérer l'occurrence de conditions climatiques avec de bons ou mauvais rendements. Les expérimentations en conditions contrôlées, comme le font les écophysiologistes, permettraient de répondre plus précisément à cette question.

7.2.2. Déterminer la RUD à l'aide de relevés *in situ*

Nous avons tenté une démarche exploratoire pour estimer l'écart de la RUD calculée à partir du bilan hydrique et celle relevée sur le terrain. Les sondages dans le sol sont réalisés à l'aide d'une tarière à gouge (**Figure 200**). L'échantillonnage est effectué sur une profondeur de 90 cm par tranche de 10 cm. Les échantillons sont ensuite pesés, disposés en étuve puis repesés pour obtenir les teneurs en eau présentées dans le **Tableau 50**. La RUD est calculée selon le même procédé que pour le calcul du RUM. Six échantillonnages ont eu lieu au cours de la montaison et du remplissage des grains. A chaque fois trois mesures ont été réalisées. L'ensemble de la procédure est présenté dans le chapitre 3. Les dates affichées dans les **Tableau 50** et **Tableau 51** sont relatives au jour de prélèvement. Cependant, étant donné qu'ils sont réalisés le matin (avant l'évapotranspiration de la journée), nous considérons que la RUDT (RUD Terrain ; **Tableau 51**) correspond à celle relative à la date de la veille pour la comparaison avec la RUD du bilan hydrique. Par exemple, la RUDT mesurée le 9 mai correspond alors à celle calculée du 8 mai.

Figure 200 : Sondage à la tarière à gouge le 24 juin 2019 à Anguerny



Tableau 50 : Teneurs en eau calculées à partir des échantillons prélevés sur la parcelle d'Anguerny

Profondeur	09/05/2019	15/05/2019	04/06/2019	21/06/2019	27/06/2019	15/07/2019
0 à 10	25,95	20,93	17,37	24,16	22,77	11,21
10 à 20	24,33	21,93	16,49	23,27	23,31	14,33
20 à 30	22,00	21,44	15,43	22,90	22,48	15,63
30 à 40	20,79	20,33	14,71	19,78	16,12	12,02
40 à 50	17,72	18,56	12,89	16,86	14,84	13,26
50 à 60	17,96	17,68	14,23	13,83	12,99	12,82
60 à 70	18,46	17,77	14,86	14,61	13,46	11,74
70 à 80	19,50	18,16	13,11	15,65	14,80	13,24
80 à 90	20,19	19,22	11,84	17,68	16,46	13,68
Moyenne	20,8	19,6	14,5	18,7	17,5	13,1

Tableau 51 : RUDT (Terrain) calculées à partir des échantillons prélevés sur la parcelle d'Anguerny

Profondeur	09/05/2019	15/05/2019	04/06/2019	21/06/2019	27/06/2019	15/07/2019	RUM
0 à 10	17,3	17,3	12,2	17,3	17,3	3,2	17,3
10 à 20	18,9	18,9	11,8	18,9	18,9	8,2	18,9
20 à 25	9,6	9,6	5,1	9,6	9,6	5,3	9,7
25 à 30	9,6	9,6	5,1	9,6	9,6	5,3	9,7
30 à 40	20,1	20,1	9,8	19,1	12,2	5,4	20,1
40 à 50	15,2	16,7	6,8	13,6	10,0	7,4	20,1
50 à 60	16,2	15,7	9,2	8,5	7,0	6,7	21,2
60 à 70	17,3	15,9	10,3	9,9	7,8	4,9	21,2
70 à 75	9,7	8,3	3,6	5,9	5,1	3,7	10,6
75 à 80	9,2	7,8	3,2	5,4	4,6	3,3	10,8
80 à 90	18,4	16,5	4,0	13,6	11,5	6,8	19,9
RUM 0-55	98,9	100,2	55,4	92,5	81,2	38,0	106,4
RUM 0-90	161,5	156,5	81,0	131,4	113,8	60,2	179,5

La RUD est calculée sur les 90 cm de profondeur de sol. Néanmoins, l'enracinement observé n'excédant pas 55 cm, nous allons uniquement considérer cette portion de sol dans l'interprétation qui suit. Le RUM associé à cette profondeur est de 107 mm.

La RUDT est comparée à la RUD du bilan hydrique à décroissance exponentielle, intégrant la difficulté progressive de la plante à mobiliser l'eau de la réserve à mesure que celle-ci se vide, ainsi que d'un bilan hydrique simplifié, c'est-à-dire répondant uniquement à la balance entre l'offre et la demande climatique.

Nous avons par ailleurs constaté une différence de cumul pluviométrique entre Anguerny (94 mm), Carpiquet (141 mm) et Bernières-sur-Mer (110 mm) sur la période 1^{er} mai – 31 juillet. Au regard de l'annexe 15, on constate que la pluviométrie est tantôt proche de celle de Bernières-sur-Mer, tantôt proche de celle de Caen-Carpiquet, même si elle est dans l'ensemble plus proche de celle située sur la côte. Toutefois, certaines journées, la pluviométrie d'Anguerny est inférieure à celle des autres stations : le 19 mai ; le 18 juin et le 24 juin. Bien que cette différence puisse être liée au site, nous nous sommes interrogés sur la fiabilité du pluviomètre disposé dans la parcelle. C'est pourquoi les calculs ont également été effectués à partir des données des stations Météo-France de Carpiquet et de Bernière-sur-Mer. On précise également ici que les valeurs d'ETP Penman-Monteith sont celles

de la station de Caen. Le bilan hydrique est calculé à partir du 8 mai 2019 avec en entrée la RUDT relative à cette date. L'ensemble de la codification des valeurs de RUD sont présentées dans le **Tableau 52**.

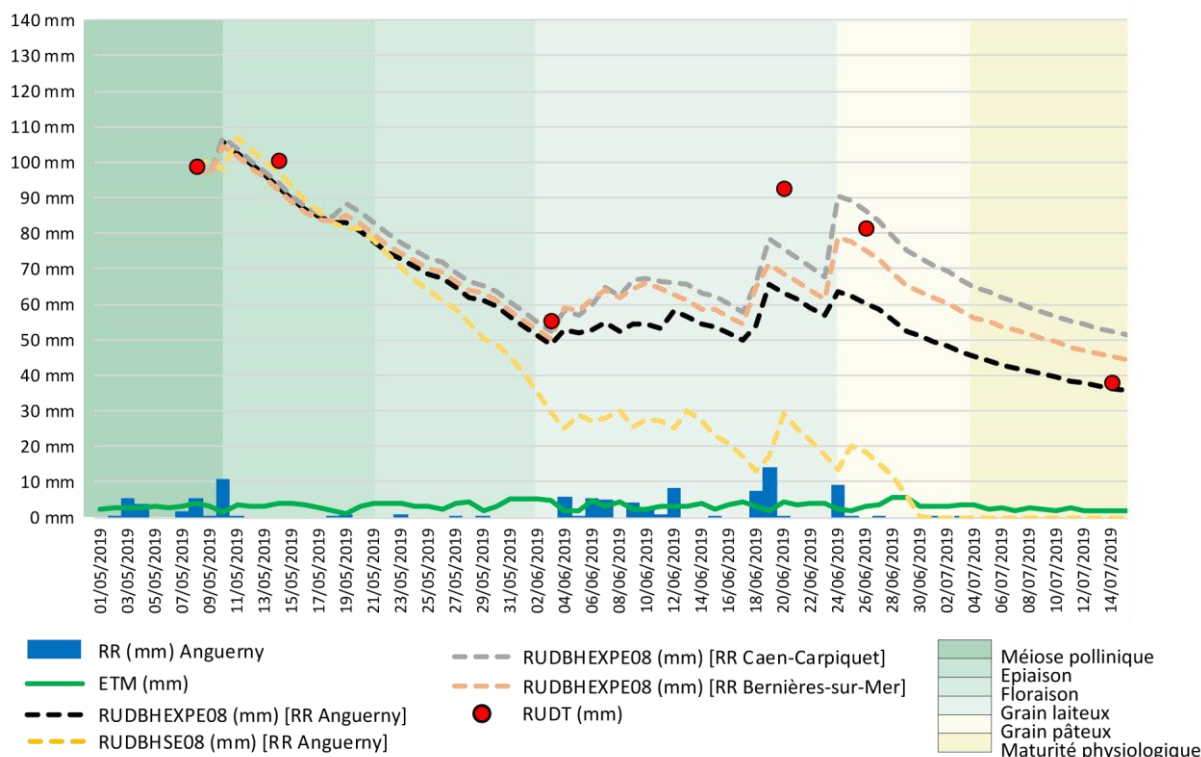
Tableau 52 : Codification employée pour qualifier les RUD présentées

RUDT	Réserve Utile Disponible calculée à partir des relevés de terrain
RUDBHEXPE08 (mm) [RR Anguerny]	Réserve Utile Disponible calculée à partir d'un bilan hydrique à décroissance exponentielle de la RUD intégrant en entrée la RUDT du 08 mai 2019 et les précipitations relevées à Anguerny
RUDBHSE08 (mm) [RR Anguerny]	Réserve Utile Disponible calculée à partir d'un bilan hydrique simplifié intégrant en entrée la RUDT du 08 mai 2019 et les précipitations relevées à Anguerny
RUDBHEXPE08 (mm) [RR Caen-Carpiquet]	Réserve Utile Disponible calculée à partir d'un bilan hydrique à décroissance exponentielle de la RUD intégrant en entrée la RUDT du 08 mai 2019 et les précipitations relevées à la station de Caen-Carpiquet
RUDBHEXPE08 (mm) [RR Bernières-sur-Mer]	Réserve Utile Disponible calculée à partir d'un bilan hydrique à décroissance exponentielle de la RUD depuis la date de semis le 15 novembre 2018 et les précipitations relevées à la station de Bernières-sur-Mer

La trajectoire de la RUD calculée avec le bilan hydrique à décroissance exponentielle à partir des données pluviométriques d'Anguerny suit les mêmes tendances que celles pouvant être déduites à partir des points de la RUDT (**Figure 201**). Les valeurs sont équivalentes le 14 mai, le 3 juin et le 15 juillet. En revanche, les valeurs extraites de ce bilan hydrique sont inférieures à la RUDT le 20 et le 26 juin. Entre le 3 et le 20 juin, le cumul pluviométrique est de 54 mm pour une ETM théorique de 50 mm. Mais l'ETR calculée est de 40 mm puisque l'on intègre la difficulté progressive de la plante à mobiliser l'eau à mesure de la RUD se vide. C'est ce qui explique que la RUD calculée passe de 49 à 63 mm entre les deux dates, soit une augmentation de 14 mm. En considérant les valeurs issues des relevés de terrain, la RUDT passe de 55 à 93 mm, soit une hausse de 38 mm, ce qui voudrait dire que le blé n'aurait presque pas consommé d'eau. Ce résultat étant difficilement compréhensible, nous avons effectué les calculs avec les données pluviométriques de Bernières-sur-Mer et de Caen-Carpiquet. Les valeurs de RUD correspondantes se rapprochent un peu plus de la RUDT, mais celle-ci est ensuite surestimée le 14 juillet.

Par ailleurs, les valeurs de RUD associées au bilan hydrique simplifié décroît très rapidement sur la période considérée. Cette approche considère que la plante consomme l'eau sans difficulté et sans se restreindre, ce qui aboutit à une RUD vide pour la fin du cycle. La trajectoire de la courbe de ce bilan hydrique est très rapidement 'hors course' par rapport aux relevés de terrain et aux autres simulations.

Figure 201 : Evolution de la RUDT comparée aux valeurs théoriques acquises avec le bilan hydrique



Réalisation : François Beauvais., 2019 (données de terrain et stations Météo-France de Caen-Carpique et de Bernières-sur-Mer)

Finalement, la quantité d'eau dans le sol disponible pour la plante, calculée à partir du bilan hydrique à décroissance exponentielle de la RUD, suit la même tendance que la RUDT. Les valeurs sont presque équivalentes entre le stade « méiose » et « floraison », puis lors la maturité physiologique. C'est lors de la formation des grains et le début de leur remplissage que les valeurs diffèrent.

En prenant du recul sur ce travail, on s'aperçoit qu'il est difficile de savoir si les écarts sont liés au calcul du bilan hydrique ou bien au protocole expérimental. On peut identifier plusieurs causes possibles aux écarts constatés entre la RUD du bilan hydrique et celle issue des relevés de terrain des 21 et 27 juin :

- on peut supposer que le pluviomètre d'Anguerny n'aurait pas relevé correctement les épisodes de pluie des 18 et 24 juin. Cependant, en admettant que l'eau précipitée est équivalente à celle de Caen-Carpique sur ces deux dates, la valeur de la RUD resterait sous-estimée et celle du 14 juillet serait légèrement surestimé ;
- on peut aussi imaginer que le protocole de prélèvement est biaisé. Les échantillons sont pesés avant et après l'étuve. Nous avons fait attention d'ouvrir les boîtes au fur et à mesure pour la pesée de façon à ce que le sol prélevé ne se ré-humidifie pas au contact de l'air ambiant du laboratoire. Pour ces mêmes raisons, tous les échantillons n'ont pas été sortis de l'étuve en même temps mais 5 par 5, sans quoi ils se seraient ré-humidifiés également avec l'air ambiant. Toutefois, on peut supposer que cette précaution n'était pas suffisante et qu'il convient de les sortir individuellement pour la pesée. Aussi, on peut imaginer des erreurs de recopiage des valeurs pesées ;

- l'utilisation de la tarière à gouge ne permet pas d'avoir une mesure toujours au même endroit précis. Il est légitime de se demander si les écarts ne peuvent pas aussi être liés à la variabilité du sol sur la zone d'échantillonnage, donc à échelle très fine ;
- nous pouvons également supposer que le blé n'a consommé que très peu d'eau sur cette période du cycle. Cette hypothèse semble pourtant peu probable. En effet, il faudrait un coefficient cultural de 0,3 au lieu de 1,1 dans le bilan hydrique sur la phase « floraison – grain laiteux » pour aboutir à une RUD équivalente à celle issue des relevés de terrain. De plus, dans ce cas, la RUD du 14 juillet est surestimée de 18 mm.

Ce travail constitue une démarche exploratoire, une proposition pour estimer les limites du bilan hydrique. Cet essai à partir de la tarière à gouge n'est pas suffisamment concluant. Il conviendrait d'effectuer davantage de relevés pour affiner l'analyse. Néanmoins, ces relevés de terrains sont chronophages et les manipulations peuvent engendrer des biais. Pour un travail plus précis, nous devrions utiliser un humidimètre de sol. Il s'agirait d'une sonde GroPoint implantée dans le sol tout au long du suivi, dont la marge d'erreur est estimée à 2 % par le SDEC pour des intervalles de mesures allant de la minute à 12 heures. La sonde n'ayant pas besoin d'être déplacée pour le déstockage des données (possible avec un smartphone), nous obtiendrions alors en continu l'évolution de la teneur en eau d'une même implantation. La vidange de la réserve utile et son rechargement pourrait être appréciés à fine résolution temporelle.

Ensuite, une réflexion sera opérée pour intégrer le principe d'un bilan hydrique en plusieurs réservoirs (Jacquart et Choisnel, 1995), ce qui est utile dans le cas de la gestion d'une irrigation par exemple. Dans ce cas, il convient de tenir compte de la densité racinaire de la plante et des horizons pédologiques. Ce type de bilan hydrique pourrait ensuite être mobilisé pour plusieurs types de sols de la Plaine agricole de Caen, à l'échelle d'un bassin versant ou même au sein d'une parcelle, afin de comparer l'effet des conditions biopédoclimatiques sur les rendements observés.

Enfin, le suivi climatique de la parcelle d'Anguerny montre que le blé a été confronté à des aléas climatiques pouvant affecter les composantes d'élaboration du rendement. En effet, 9 jours d'échaudage thermique peuvent engendrer des pertes allant jusqu'à 13,5 q/ha. Le seuil de 30 °C a été approché lors de la floraison, ce qui peut induire une perte de fertilité de la plante. On suppose également que la méiose a pu être confrontée à de basses températures dans le bas de la parcelle. Enfin, le déficit hydrique d'environ 140 mm sur le cycle, peut théoriquement engendrer une réduction du rendement de l'ordre de 20 q/ha. Pourtant, la productivité fut excellente (110 q/ha), et d'ailleurs cela est constaté sur l'ensemble de l'exploitation agricole et celles des agriculteurs voisins. On pourrait alors supposer que le blé tendre, peut-être en raison du mélange variétal, est en mesure de résister à ces aléas. Aussi, l'absence de précipitation entre l'épiaison et la floraison n'a pas permis le déclenchement de maladies qui engendrent souvent des pertes de production. On comprend alors le dicton des exploitants du nord de Caen « *année de sécheresse, année de richesse* ». Les pluies à la floraison engendrant des pertes de productions seraient alors plus désavantageuses qu'un déficit hydrique prononcé et l'exposition à des jours de chaleur ? Toutefois, on suppose que cette interprétation vaut dans le cas d'une exposition qui n'est pas extrême à ces aléas puisque l'enquête présentée dans la partie 2 montre que les agriculteurs du sud de Caen ne tiennent pas le même discours. Pour eux, il vaut mieux avoir un excès de précipitations, quand bien même celui-ci

pourrait engendrer un risque de maladies (qui peut être réduit par les produits phytosanitaires), de sorte à limiter le déficit hydrique de la plante sur sols superficiels.

Aussi, la comparaison de la RUD calculée avec le bilan hydrique et celle déterminée à partir des relevés *in situ* montre que le bilan hydrique respecte les tendances du terrain. Toutefois, les méthodes utilisées pour ces relevés de terrain restent à préciser et à perfectionner pour qu'elles puissent être utiles à la modélisation bioclimatique.

Conclusion du chapitre 7

Les résultats présentés dans ce chapitre exposent des contrastes climatiques présents dans la Plaine de Caen. L'interprétation des données météorologiques des 5 stations Météo-France montre sans surprise que les hivers sont plus rudes et les étés plus chauds à mesure que l'on s'éloigne de la mer. La Plaine méridionale est légèrement 'continentalisée', avec parfois des effets d'abri renforçant les contrastes comme dans la vallée de l'Oudon. Par conséquent, ces éléments se ressentent sur le cycle du blé, avec une phénologie plus avancée en sortie d'hiver à mesure que l'on est proche de l'océan. En revanche, les phases de montaison et de remplissage des grains sont plus courtes à l'intérieur des terres qui bénéficient dans la journée de plus de chaleur que le littoral à ces périodes. Toutefois, les risques d'échaudage thermique, de gel d'épis et de basses températures à la méiose y sont plus importants.

Les relevés de température sur le terrain montrent que des contrastes de température peuvent être observés dans la plaine agricole malgré de faibles dénivelés ou bien en raison de l'occupation du sol, notamment la présence de haies qui « continentalisent » les conditions locales. Ainsi, en quelques hectomètres la température peut varier de quelques dixièmes de degrés ou de quelques degrés. Des écarts peuvent être observés au sein d'une même parcelle agricole. Dans le cas de dénivelés plus conséquents dans les vallées du Pré-Bocage, c'est-à-dire aux marges de la Plaine de Caen, les contrastes de températures peuvent être plus importants. Qu'il s'agisse des jours d'exposition à l'échaudage thermique ou aux gelées, et bien que les méthodes restent à préciser, une vulnérabilité différentielle de la plante dans l'espace agricole est exposée. C'est-à-dire que les seuils d'alerte peuvent être franchis sur certaines parcelles (ou dans une parcelle) et non sur d'autres, situées pourtant à proximité.

Ces éléments ne peuvent être perçus en sortie des modèles climatiques dont la résolution de 8x8 km est insuffisante. Un approfondissement de ce travail de terrain pourrait être précieux pour la filière agricole qui a souvent besoin de précisions dans les prévisions météorologiques et climatiques puisque qu'à quelques degrés près les conséquences pour une plante peuvent varier. En effet, ces analyses permettraient de cartographier, puis d'identifier les secteurs les plus vulnérables de la région agricole selon différents types de temps. Nous pourrions envisager ensuite que ces relevés alimentent des descentes d'échelles pour obtenir une spatialisation fiable des températures à échelle très fine. Cela bénéficierait au conseil agricole dans le choix des assolements. On sait que de nouvelles cultures pourraient être essayées dans les prochaines décennies, que ce soit pour remplacer celles qui n'auront plus un bon rendement ou bien parce que l'élévation de la température permettra la faisabilité d'autres espèces. Aussi, comme nous l'avons démontré, l'élévation de la température engendre une avancée des stades phénologiques pouvant modifier leur exposition à certains aléas. C'est pourquoi des pertes de rendements ont pu être observées en France au printemps 2021 sur plusieurs productions agricoles. La douceur du mois de mars a provoqué une anticipation des stades phénologiques qui exposèrent les plantes aux gelées printanières d'avril. Ce type de configuration pourrait même se reproduire dans le futur en dépit de l'élévation de la température. C'est ce qu'affirment Bailey et *al.*, (2021) puisque la fonte de la banquise arctique engendre une hausse de l'humidité dans l'atmosphère au cours de l'hiver, modifiant ainsi le vortex polaire qui se déplace sur l'Europe.

Enfin, le suivi du cycle de la plante nous montre qu'en dépit d'aléas climatiques pouvant engendrer des pertes de productions importantes, des rendements excellents peuvent être observés. Le mélange variétal et la tolérance des nouveaux cultivars pourraient être une des raisons expliquant ce constat, tout comme l'absence de pluies à l'approche de la floraison qui sont souvent la cause de maladies sur la plante. Le suivi de parcelles agricoles permet au chercheur d'être confronté à la réalité du terrain et à sa complexité afin de prendre conscience que de multiples éléments peuvent intervenir dans les composantes d'élaboration du rendement. D'ailleurs, ce travail s'intéresse aux relations climat/plante, mais cette complexité serait encore plus grande en intégrant les pratiques agricoles. En archivant des suivis pour différents cultivars, il serait alors possible de constituer des références qui permettraient d'aider à la compréhension des aléas futurs en retrouvant des situations types. Par ailleurs, nous avons confronté l'évolution de la RUD relevée sur le terrain à l'aide de sondage pédologique à celle calculée avec le bilan hydrique. Les résultats montrent que ce dernier simule une tendance qui suit celle du terrain, même si la méthode reste à perfectionner.

Dans l'ensemble ces relevés restent à préciser pour qu'ils puissent un jour être utiles à la modélisation bioclimatique. Néanmoins, ce chapitre démontre l'intérêt de la phase de terrain dans les recherches du géographe-climatologue.

Chapitre 8

Etendre l'analyse à d'autres régions et cultures

Introduction

Jusqu'à présent, les résultats de thèse exposent les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre en Normandie. Néanmoins, la France compte d'autres régions productrices. Il apparaît alors légitime de s'interroger sur les évolutions à l'échelle française et si elles diffèrent de celles simulées pour la Plaine de Caen. Autrement dit, la Normandie pourrait-t-elle bénéficier d'un climat futur plus favorable que les autres bassins de productions céréalières ?

Les agrosystèmes céréalières sont certes structurés autour du blé, mais d'autres cultures sont présentes dans l'assolement (orge, maïs, colza, betteraves, lin, pois, etc. ; **Figure 202**). Elles garantissent d'autres débouchés essentiels pour le pays, tant pour l'alimentation humaine et animale que pour l'industrie (huile de colza pour les biodiesels, fibre de lin, etc.). Ces cultures permettent également la faisabilité du blé de façon à organiser les rotations culturales. Des études bioclimatiques et phénoclimatiques sont alors nécessaires pour estimer leur faisabilité.

Pour cette raison, ce chapitre élargit l'analyse à d'autres plaines agricoles françaises productrices de blé tendre d'hiver. Il s'intéresse notamment au lin fibre de printemps, une culture emblématique de la Normandie qui constitue une tête d'assolement dans les rotations culturales des exploitations de grandes cultures.

Figure 202 : Coucher de soleil en Plaine de Caen sur un champ d'orge



Photographie : François Beauvais, le 28 mai 2021

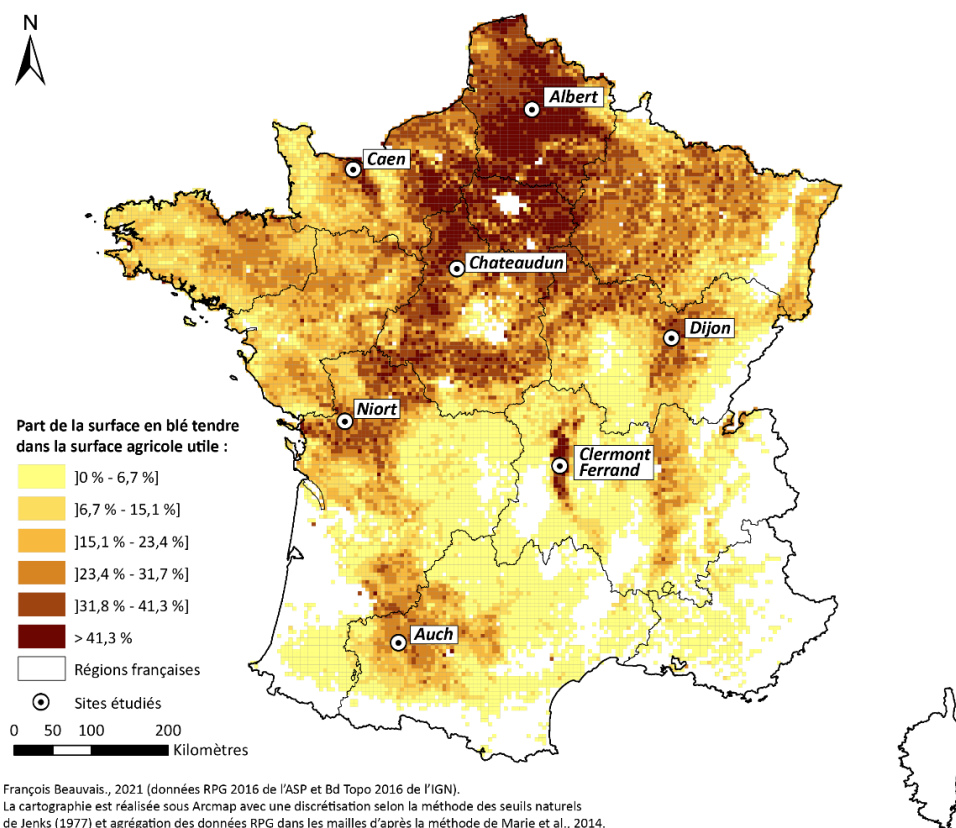
8.1. Evolution des indicateurs phénoclimatiques à l'échelle française

Pour savoir si la Plaine de Caen pourrait conserver sa place dans la production nationale de blé tendre d'hiver, nous dupliquons l'étude phénoclimatique aux grandes régions agricoles céréalières françaises. L'objectif est de savoir si la Normandie pourrait connaître des conditions climatiques moins désavantageuses que les autres régions du fait de son climat au caractère océanique. Par ailleurs, c'est aussi l'occasion d'exposer la duplicabilité de la méthode proposée et de fournir des connaissances sur les conséquences du changement climatique pour la céréaliculture française en vue de l'adaptation de l'agrosystème céréalier national.

8.1.1. Sélection des sites, méthode et présentation du cadre géoclimatique actuel et futur

Sept sites représentant des régions agricoles spécialisées dans la culture du blé tendre (**Figure 203**) ont été sélectionnés. Ils expriment la diversité des conditions climatiques propices à son développement à l'échelle de la France (Joly et al., 2010 ; Cantat., 2015)¹¹⁶. Il s'agit des secteurs de : Caen (Plaine de Caen), Albert (le Sanstierre), Châteaudun (Petite Beauce), Dijon (Dijonnais), Niort (Pays Niortais), Clermont-Ferrand (Grande Limagne) et Auch (Pays Auchois).

Figure 203 : Site retenus pour l'étude et part de la Surface Agricole utilisée par le blé à l'échelle française (données du registre Parcellaire Graphique 2016 de l'ASP)



¹¹⁶ La sélection de ces sites a été déterminée en croisant la cartographie des données du Registre Parcellaire Graphique 2016 (méthode exposée dans Marie et al., 2014) dans des mailles de 2500 ha, avec la cartographie des climats français de Joly et al., 2010 et de Cantat, 2015.

8.1.1.1. Ajustement de la méthodologie pour les 7 sites

La méthode mobilisée repose sur l'approche phénoclimatique, présentée dans le chapitre 3. Cependant, les besoins en température pour le blé sont différents d'une région à une autre, en raison notamment de l'usage de variétés différentes, adaptées au climat en présence. Par conséquent, les besoins en chaleur sont ajustés en tenant compte des dates intermédiaires moyennes d'apparition des stades phénologiques « épi 1 cm », « épiaison », « floraison » et « remplissage des grains » exposés par Gate et al. (2003) pour les zones nord, centre et sud de la France (**Tableau 53**). A titre d'exemple il faut 1790°CJ (degré jour) pour atteindre l'épiaison à Caen tandis qu'il en faut 1410°CJ à Dijon pour un semis le 20 octobre¹¹⁷. Cette date de semis a été retenue car elle fait partie pour tous les sites de la période optimale (Gate, 2003 ; Arvalis, 2017). Afin de tenir compte de l'effet de la durée du jour sur le cycle, une photopériode de 11 heures est considérée pour l'apparition du stade épi 1 cm (cf. chapitre 3).

Tableau 53 : Sommes de températures retenues en fonction des dates d'apparition des stades phénologiques propres à chaque site en période de référence

Stade phénologique	Echelle BBCH (Witzenberger et al., 1989 ; Lancashire et al., 1991)	Albert	Auch	Caen	Châteaudun	Clermont-Ferrand	Dijon	Niort
Semis	0	0	0	0	0	0	0	0
Levée	10	150	150	150	150	150	150	150
Début tallage	21	300	300	300	300	300	300	300
Mi-tallage	≈23	595	685	725	595	620	530	745
Epi 1 cm	30	890	1070	1150	890	940	760	1190
Stade 2 nœuds	32	1150	1320	1400	1140	1190	1010	1440
Méiose	-	1380	1600	1640	1280	1350	1190	1660
Epiaison	55	1530	1750	1790	1500	1570	1410	1880
Floraison	65	1680	1900	1940	1650	1720	1560	2030
Grain laiteux	73	1980	2200	2240	1950	2020	1860	2330
Grain pâteux	83	2280	2500	2540	2250	2320	2160	2630
Maturité	89	2330	2550	2590	2300	2370	2210	2680

Les sols agricoles ont été choisis en tenant compte de leur représentativité dans les secteurs géographiques étudiés sur la base des Unités Cartographiques de Sols (UCS) fournies par les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) issus du programme Inventaire, gestion et Conservation des Sols (IGCS) du Groupement d'intérêt scientifique Sol (GISOL ; tableau 4). Cette sélection de sol résulte également de critères pédologiques non contraignant agronomiquement sur le plan de la pédogenèse (forte hydromorphie, carbonatation excessive, podzolisation, lessivage important).

Le RUM est déterminé à partir des règles de pédotransfert (Bouma, 1989) en tenant compte de la texture¹¹⁸, de l'épaisseur et de la charge en éléments grossiers des différents horizons ainsi que de la profondeur d'exploration théorique des racines du blé tendre (110 cm lorsque le sol le permet ; d'après Gate, 1995). Ces données pédologiques sont issues de la base de données¹¹⁹ des sols du

¹¹⁷ On notera ici que les sommes de températures et la date de semis pour le site de Caen ne sont pas les mêmes que pour les résultats présentés dans la partie 2.

¹¹⁸ Les parts du sol en Argiles, Limons et Sables ont été reportées sur le diagramme de Jamagne (Jamagne, 1977).

¹¹⁹ Il s'agit de la base de données DONESOL qui héberge les données des deux programmes IGCS et RMQS.

RMQS 1¹²⁰ (première campagne 2000-2009 du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols de l'INRA ; Arrouays et al., 2002) à l'exception des sites normands pour lesquels nous avons produit nos propres données¹²¹ sur la base d'ouverture de fosses pédologiques en suivant le protocole du RMQS (Jolivet et al., 2018) (tableau 5). Cette détermination des RUM est nécessaire car elle traduit des différences de potentiels pédoclimatiques, comme en atteste l'annexe 16 exposant des sols épais avec peu de contraintes pour le développement des plantes contrairement à un sol squelettique et chargé en éléments grossiers (Annexe 16).

Enfin, les projections sont issues du modèle ALADIN-Climat (CNRM-2014 d'une résolution de 8x8 km, à partir des scénarios RCP 2.6 et 8.5 qui donnent l'enveloppe des possibles aux horizons moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100) entre une réduction des émissions des gaz à effet de serre et la poursuite de la trajectoire actuelle. Un point de grille a été retenu pour chaque plaine céréalière. La faible différence entre les valeurs associées aux mailles caractérisant le climat local de ces espaces plans et dégagés justifie l'emploi d'un seul point de grille pour chaque entité étudiée (Annexe 17). Le biais froid du modèle, exposé dans le chapitre 3, est également constaté sur les autres sites français étudiés. C'est pourquoi nous avons utilisé la même méthode de correction que pour la Plaine de Caen. Elle est indispensable, sans quoi les périodes phénologiques seraient décalées par rapport aux conditions climatiques qu'elles devraient connaître, ce qui pourrait engendrer une comptabilité erronée des aléas (Annexe 18). Les données SAFRAN sont également mobilisées sur la période de référence afin d'évaluer la pertinence du scénario historique

8.1.1.2. Présentation du cadre géoclimatique actuel et futur

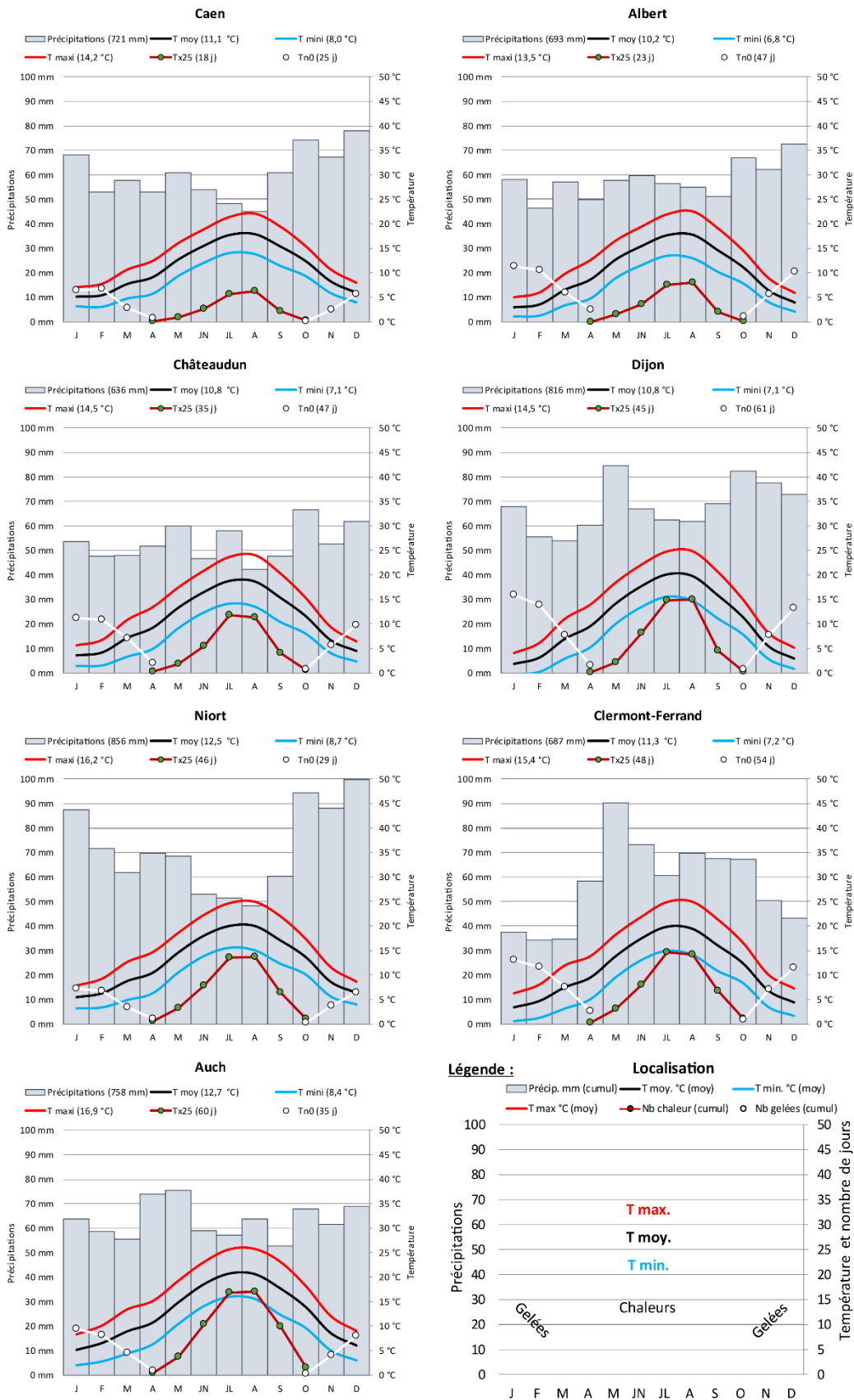
La localisation de ces secteurs montre que le blé est susceptible de pousser sous des climats variés, allant des nuances tempérées océaniques plus ou moins douces et arrosées à l'ouest, de Auch en remontant vers Albert, à des faciès se teintant de continentalité à l'est, comme pour Clermont-Ferrand et Dijon. Ces caractéristiques apparaissent dans les diagrammes ombrothermiques (**Figure 204**).

Même si les grandes généralités du climat français et ses évolutions pour les prochaines décennies ont été présentées dans le chapitre 2, nous proposons ici d'exposer brièvement le climat des sites sélectionnés et l'évolution possible des paramètres climatiques pour mieux en cerner les potentialités agricoles diverses cultures.

¹²⁰ Toutes les plaines étudiées n'ont pas été couvertes par le RMQS 2. Afin d'utiliser des données comparables sur tous les espaces d'étude, nous avons retenu le RMQS 1.

¹²¹ Par conséquent les valeurs des RUM calculées à partir des règles de pédotransfert sont différentes de celles calculées avec le protocole exposé dans le chapitre 3 (prélèvements de terrain et manipulations en laboratoire). Par ailleurs, les règles de pédotransfert de Jamagne (1977) sont considérées pour une humidité à la capacité au champ au pF 2,5 (Baize et Jabiol, 2011) alors que nous avons considéré le pF 2,0 (Al Majou et al., 2008) dans le chapitre 3. Enfin, nous n'avons pas pris en compte les densités apparentes dans le calcul du RUM puisque celles-ci ne sont pas disponibles avec le RMQS 1 sur toute la profondeur d'exploration théorique des racines du blé tendre.

Figure 204 : Diagrammes ombrothermiques, nombre de jours de gelées et de chaleur sur la période de référence 1976-2005



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données SAFRAN sur la période 1976-2005)

La température moyenne annuelle des sites traduit un climat tempéré, avec des valeurs comprises entre 10,4 °C dans le nord du pays (Albert) et 12,8 °C dans le sud (Auch). L'hiver est naturellement plus rude dans les sites éloignés du littoral. Ainsi il gèle en moyenne plus de 60 jours par an à Dijon, contre environ 30 jours par an à Auch, Niort et Caen. L'été, la continentalité et la méridionalité imposent des jours de chaleur plus fréquents, à l'inverse de l'océanité et de la septentrionalité qui en réduisent fortement les occurrences. Les jours de chaleur n'apparaissent ainsi qu'une vingtaine de fois à Caen et Albert, contre soixante à Auch, site le plus méridional. Les précipitations s'échelonnent de 630 mm pour le site le plus sec (Châteaudun) à près de 850 mm pour le plus arrosé (Niort). Elles sont réparties assez régulièrement sur l'année à Châteaudun, Auch, Albert et Dijon, Niort et Caen, avec toutefois un maximum automnal plus présent pour ces deux dernières stations du fait de leur caractère plus océanisé. La seule véritable originalité provient de Clermont-Ferrand, avec une fin d'automne et un hiver sensiblement moins arrosés que les périodes estivale et printanière.

Ces différents secteurs présentent donc des caractères climatiques sans contraintes majeures pour le développement des végétaux en général, et la culture du blé en particulier. Cette « bienveillance » des conditions atmosphériques s'exprime par l'absence d'excès de toute sorte propre à la façade ouest de l'Europe aux latitudes moyennes (thermiques ou pluviométriques) et notamment d'un point de vue bioclimatique par l'absence de mois imposant une sécheresse physiologique. Toutefois, cette vision moyenne peut cacher des années plus difficiles car ces climats « tempérés » sont aussi soumis à une variabilité interannuelle notable de leurs précipitations, avec des cumuls annuels pouvant varier du simple au double d'une année à la suivante, et/ou des saisons anormalement sèches ou arrosées, ce qui peut être préjudiciable au développement des plantes, particulièrement au printemps en cas de sécheresse...

L'évolution des principaux indicateurs climatiques à l'horizon 2100 est résumée dans le **Tableau 54**. La température¹²² augmenterait légèrement dans le cas du scénario optimiste (+1 à 1,2 °C) mais au contraire fortement (+3,6 à +4,5 °C) sans politique climatique internationale. Dans ce cas, les jours de gel diminueraient drastiquement : Clermont-Ferrand et Dijon n'en compteraient plus que 13 et 17 au lieu de 62 et 54 actuellement. Les journées de chaleur seraient logiquement beaucoup plus nombreuses. Caen et Albert en comptabiliseraient ainsi à l'horizon 2100 plus qu'Auch durant la période actuelle 1976-2005 ! Dans le sud-ouest, un tiers de l'année présenterait un caractère estival (plus de 25°C dans la journée). Sur les seuls mois de juin et de juillet, correspondant à la fin du cycle du blé, l'augmentation serait de l'ordre d'une vingtaine de jours sur l'ensemble de ces plaines agricoles. Pour les précipitations, celles-ci resteraient stables avec le scénario RCP 2.6 mais diminueraient avec le scénario RCP 8.5. Mais au-delà de la légère baisse annuelle de la quantité et du nombre de jours de pluie, c'est durant la saison estivale que le problème deviendrait crucial avec une réduction des précipitations de l'ordre de 6 à 16 % sur tous les sites, et même de 30 % à Caen et Albert.

¹²² Les valeurs de température exposées ici sont corrigées à partir de la méthodologie présentée dans la partie 1.3.

Tableau 54 : Evolution de 5 indicateurs climatiques pour les sites étudiés entre la période de référence et l'horizon 2100 à partir de deux scénarios RCP (simulation CNRM-2014)

Lieu	Scénario	Tm (°C)	Tn0 (j)	Tx25 (j)	RR (mm)	RR1 (j)
Caen	1976-2005 historique	11,1	22	17	733	134
	2071-2100 rcp 2.6	12,3	14	26	719	130
		+1,2	-8	+9	-14	-4
	2071-2100 rcp 8.5	14,8	5	66	640	110
		+3,7	-17	+49	-93	-24
Albert	1976-2005 historique	10,3	44	22	689	129
	2071-2100 rcp 2.6	11,7	27	37	698	128
		+1,4	-17	+15	+9	-1
	2071-2100 rcp 8.5	14,5	11	76	640	110
		+4,2	-33	+54	-49	-19
Châteaudun	1976-2005 historique	10,9	43	34	629	114
	2071-2100 rcp 2.6	12,2	28	53	652	111
		+1,3	-15	+19	+23	-3
	2071-2100 rcp 8.5	15,1	11	96	608	97
		+4,2	-32	+62	-21	-17
Dijon	1976-2005 historique	10,9	59	46	785	128
	2071-2100 rcp 2.6	12,1	43	59	820	130
		+1,2	-16	+13	+35	+2
	2071-2100 rcp 8.5	15,3	17	103	750	112
		+4,4	-42	+57	-35	-16
Clermont-Ferrand	1976-2005 historique	11,4	53	48	640	115
	2071-2100 rcp 2.6	12,7	36	64	680	115
		+1,3	-17	+16	+40	0
	2071-2100 rcp 8.5	15,9	13	110	636	105
		+4,5	-40	+62	-4	-10
Niort	1976-2005 historique	12,5	28	44	816	121
	2071-2100 rcp 2.6	13,6	20	65	829	118
		+1,1	-8	+21	+13	-3
	2071-2100 rcp 8.5	16,4	6	109	785	105
		+3,9	-22	+65	-31	-16
Auch	1976-2005 historique	12,7	34	59	736	110
	2071-2100 rcp 2.6	13,9	25	81	734	110
		+1,2	-9	+22	-2	0
	2071-2100 rcp 8.5	16,8	9	125	672	97
		+4,1	-25	+66	-64	-13

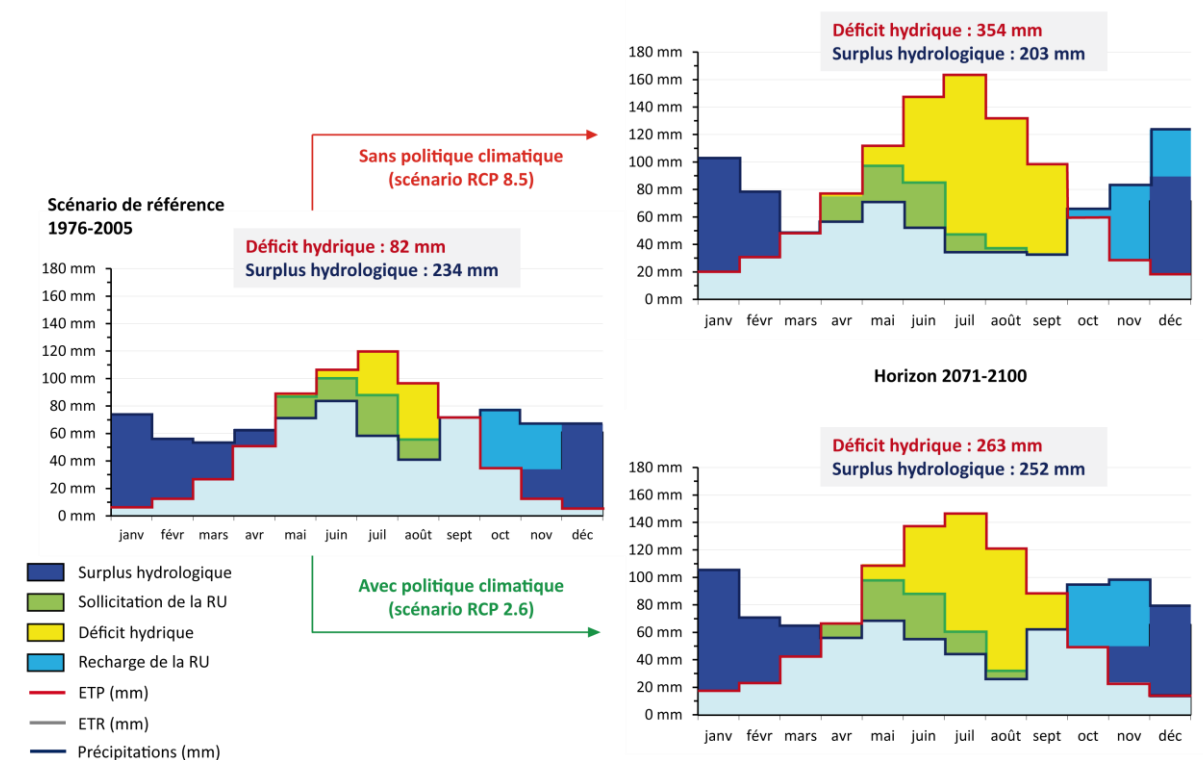
Selon le même procédé adopté pour la Normandie, l'analyse montre que le contexte biopédoclimatique se dégraderait dans les autres grandes plaines céréalières françaises d'ici la fin du siècle, avec un déficit hydrique cumulé au cours de l'année plus marqué, même avec le scénario « optimiste » (**Tableau 55**). Par rapport à la période de référence, il serait en moyenne multiplié par 2, et même 3,5 pour le scénario « pessimiste ». Une année moyenne en 2100 correspondrait à une année extrême du scénario historique. Les sécheresses agricoles apparaîtraient plus tôt dans l'année et de façon plus intense comme en témoigne l'exemple de Niort (**Figure 205**). Les différences de RUM (Réservoir Utilisable Maximal) liées aux types de sols exposent une vulnérabilité contrastée à la sécheresse. Ainsi une plante cultivée sur un « petit sol » du nord cumule davantage de manque d'eau que celle reposant sur un sol épais au sud de la France malgré une évapotranspiration plus importante, comme en attestent les situations Auchoises et Caennaises.

Tableau 55 : Déficit hydrique annuel attendu pour les sols des 7 plaines agricoles étudiées à l'horizon 2100 pour deux scénarios RCP d'après un bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile (ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux)

Sites	RUM (mm) des sols retenus	Scénario historique 1976-2005	Scénario RCP 2.6 2071-2100	Scénario RCP 8.5 2071-2100
Albert	203	38	97	177
Auch	181	104	155	256
Caen	204	47	102	183
	23	133	222	327
Chateaudun	204	89	142	224
Clermont-Ferrand	173	52	87	186
Dijon	194	51	88	207
	130	68	113	250
Niort	97	82	263	354

Réalisation : François Beauvais., 2021 (bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile ; ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux ; données CNRM-2014)

Figure 205 : Evolution des conditions biopédoclimatiques à Niort à l'horizon 2100 pour deux scénarios RCP d'après un bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile (ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux – données CNRM-2014)



Réalisation : François Beauvais., 2021 (bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile ; ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux ; données CNRM-2014).

L'évolution du contexte climatique et pédoclimatique pour les prochaines décennies laisse donc redouter l'occurrence plus forte des jours de chaleur et de déficit hydrique sur les grandes plaines céréalières françaises. Toutefois, compte tenu de l'élévation de la température, nous pouvons faire l'hypothèse d'une avancée de la phénologie du blé comme nous l'avons démontré pour la Normandie.

8.1.2. Anticipation de la phénologie

En réponse à l'augmentation de la température, la durée du cycle du blé est raccourcie sur les 7 sites et tous les stades phénologiques arrivent plus tôt dans l'année. Le raccourcissement du cycle s'effectue surtout sur sa première partie en raison du réchauffement hivernal.

A l'horizon moyen 2041-2070, la montaison débiterait respectivement pour les deux scénarios autour du 5 et 6 mars pour le site le plus précoce (Auch) et entre le 9 et 15 mars pour le plus tardif (Caen). L'anticipation est de l'ordre de deux semaines puisque sur le scénario historique ces stades sont observés entre la mi-mars et début avril. La durée des périodes phénologiques qui succèdent à la montaison est peu raccourcie compte tenu du fait que, plus précoces, les températures se rapprochent de celles connues par ces stades en période de référence. Leur avancement dans le calendrier reste donc d'environ deux semaines. L'épiaison aurait ainsi lieu entre début mai et mi-mai selon les sites. Le remplissage des grains se déroulerait de mi-mai à mi-juin pour les sites les plus au sud et de fin mai à fin juin pour ceux les plus au nord. Dans ce cas, la maturité physiologique interviendrait entre mi-juin et début juillet, soient des récoltes début juillet dans le sud et en seconde quinzaine de ce même mois dans le nord (**Tableau 56**).

À l'horizon lointain 2071-2100, dans le cas du scénario RCP 2.6, l'anticipation est équivalente à la période précédente. En revanche, pour le scénario RCP 8.5, elle est plus prononcée. Toutefois, l'anticipation de la phénologie en sortie d'hiver reste limitée compte tenu des besoins en photopériode de la plante. Autrement dit, l'élévation de la température est telle que les degrés jours nécessaires à l'apparition du stade épi 1 cm sont atteints en fin d'hiver météorologique. Néanmoins, la montaison ne peut débuter en raison de la faible durée du jour. En conséquence, les stades suivants n'évitent pas une température plus élevée comme pour l'horizon moyen. La montaison est donc raccourcie (de 2,5 jours à 9 jours selon les sites). L'épiaison pourrait alors se réaliser fin avril dans le sud du pays et début mai dans le nord. Grâce à l'avancée des stades précédents, le remplissage des grains arriverait plus tôt et resterait relativement épargné par une réduction de sa durée (environ - 2 jours). Il s'effectuerait principalement pendant le mois de mai pour s'achever début juin dans le sud, et de mi-mai à mi-juin dans le nord. La maturité physiologique arriverait alors entre le 8 juin (Auch) et le 18 juin (Caen et Albert), correspondant à des moissons fin juin et début juillet. La réduction de la durée du cycle serait alors de trois semaines à un mois selon les sites. Elle engendrerait une réduction de l'accumulation de biomasse. Le raccourcissement du cycle du blé fait apparaître des stades à des dates différentes, ce qui peut d'une part modifier les fenêtres temporelles d'exposition aux aléas et, d'autre part, modifier le calendrier agricole et les paysages.

Tableau 56 : Evolution de la date de maturité physiologique pour une date de semis le 20 octobre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP

Site	(1976-2005)		(2041-2070)		(2071-2100)	
	SAFRAN observation	Scénario historique	RCP 2.6 Aladin	RCP 8.5 Aladin	RCP 2.6 Aladin	RCP 8.5 Aladin
Albert	18-juil	18-juil	30-juin	26-juin	03-juil	18-juin
Auch	29-juin	30-juin	18-juin	15-juin	20-juin	08-juin
Caen	18-juil	18-juil	02-juil	27-juin	05-juil	18-juin
Châteaudun	09-juil	09-juil	25-juin	21-juin	26-juin	15-juin
Clermont-Ferrand	07-juil	06-juil	22-juin	18-juin	25-juin	10-juin
Dijon	06-juil	06-juil	24-juin	19-juin	26-juin	12-juin
Niort	06-juil	07-juil	24-juin	20-juin	25-juin	11-juin

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014)

8.1.3. Hausse contenue de l'échaudage thermique

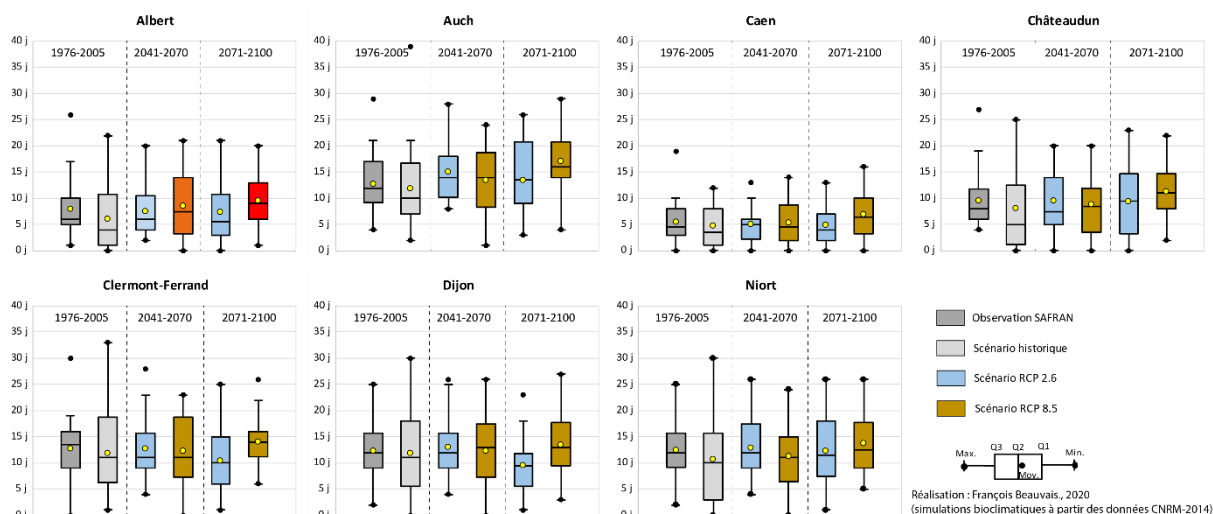
Les fortes chaleurs pénalisent le remplissage des grains lorsqu'elles surviennent en fin de cycle (dès la méiose¹²³). En période de référence (1976-2005), le nombre de jours d'échaudage thermique est de l'ordre de 12 pour les sites les plus au sud (Auch, Clermont-Ferrand et Niort). Il en va de même pour Dijon en raison de sa plus forte continentalité. À Chateaudun, ce cumul est d'un peu moins de 10 jours. Si Albert est le site le plus au nord, étant légèrement dans les terres, ce seuil de 25°C est atteint environ 8 fois par an. C'est à Caen que cet aléa est le moins présent (environ 5 jours) du fait de la proximité de la mer de la Manche et ce malgré une longueur du cycle de plus de 270 jours. Il convient de rappeler que les différences seraient plus marquées dans le cas d'une durée du cycle équivalente entre les sites (**Figure 206**).

Si le réchauffement climatique augmente logiquement le nombre de jours de chaleur sur une année, les conséquences sont plus nuancées pour le nombre de journées échaudantes car dans ce cas on ne comptabilise le dépassement des occurrences supérieures à 25°C que sur la période de croissance de la plante.

À l'horizon moyen, cet aléa n'augmenterait que de 2 à 3 jours à Niort dans le cas du scénario RCP2.6. Pour les sites d'Albert, Chateaudun, Dijon et Clermont-Ferrand la hausse serait de l'ordre d'un jour, voire un jour et demi. À Caen elle serait insignifiante (+ 0,4 jour). Pour le scénario RCP 8.5, une légère diminution serait même constatée (- 0,6 à - 1,5 jour), excepté à Caen et Albert. À l'horizon lointain, le scénario « optimiste » garantirait une exposition à l'échaudage thermique quasi équivalente à celle de la période de référence à Caen et une hausse limitée à Albert, Auch, Chateaudun et Niort. Elle diminuerait même à Clermont-Ferrand et Dijon de un à deux jours. L'anticipation des stades relative au réchauffement du scénario « pessimiste » permettrait de limiter l'exposition aux vagues de chaleurs, plus nombreuses en période estivale. Cependant elle ne serait pas assez prononcée pour que le cumul de jours échaudants n'augmente pas. Dans les plaines de Caen, Dijon et Clermont-Ferrand le blé comptabilisait une légère hausse d'environ 2 jours. Dans celles de Niort, Chateaudun et Albert l'augmentation est de plus de 3 jours tandis qu'elle serait encore plus prononcée à Auch (+ 5 jours).

¹²³ La méiose pollinique est une phase qui correspond aux étapes de formation du pollen. Les aléas climatiques auxquels elle est sensible peuvent impacter la fertilité du blé tendre.

Figure 206 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique (Tx25) cumulés de la méiose à la maturité physiologique du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP



Ainsi les sites de la partie centrale de la France (Niort, Clermont et Dijon) seraient confrontés à une exposition similaire à celle d'Auch en période de référence. Il en est de même pour Albert à l'horizon 2100 qui enregistrerait les conditions observées à Chateaudun actuellement (idem pour Caen relativement à Albert). Toutefois, il convient de préciser que la hausse de l'échaudage thermique reste contenue grâce à l'élévation de la température engendrant une avancée de la fin du cycle dans le calendrier. Pour autant, il ne faut pas oublier la variabilité intrannuelle du climat. En effet, le nombre d'années cumulant un nombre important de jours de chaleur serait plus important. À titre d'exemple, à Auch, 8 années sur 30 cumuleraient entre 20 et 30 jours d'échaudage thermique alors que ce type de situation est jugée comme extrême en période de référence (année 1976).

8.1.4. Stabilité et réduction légère du déficit hydrique

Lors des périodes de sécheresse, la plante referme ses stomates pour réguler son évapotranspiration, réduisant ainsi son activité photosynthétique et par conséquent sa croissance. En période de référence, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle blé du tendre est modéré dans les grandes plaines céréalières françaises pourvues de sols épais. D'autant que le recours à des variétés au cycle raccourci dans les régions continentales et méridionales permet d'anticiper le remplissage des grains, afin qu'il ne se prolonge pas au cours de la période estivale. Ce manque d'eau pour la plante autour de 50 mm^{124} engendre une réduction des rendements de l'ordre de 7 à 10 q/ha (Arvalis, 2017). Cela se traduit notamment par une légère dégradation du confort hydrique¹²⁵ à partir du stade épi 1 cm jusqu'au remplissage des grains inclus (de 0,9 à 0,8). Sur les sept sites retenus pour cette étude, deux connaissent des conditions pédoclimatiques désavantageuses. Le sol moyen de la région Niortaise ne permet pas de compenser assez le manque d'eau pour la plante où le déficit hydrique cumulé atteint 100 mm (pertes de 15 à 20 q/ha). Il en va

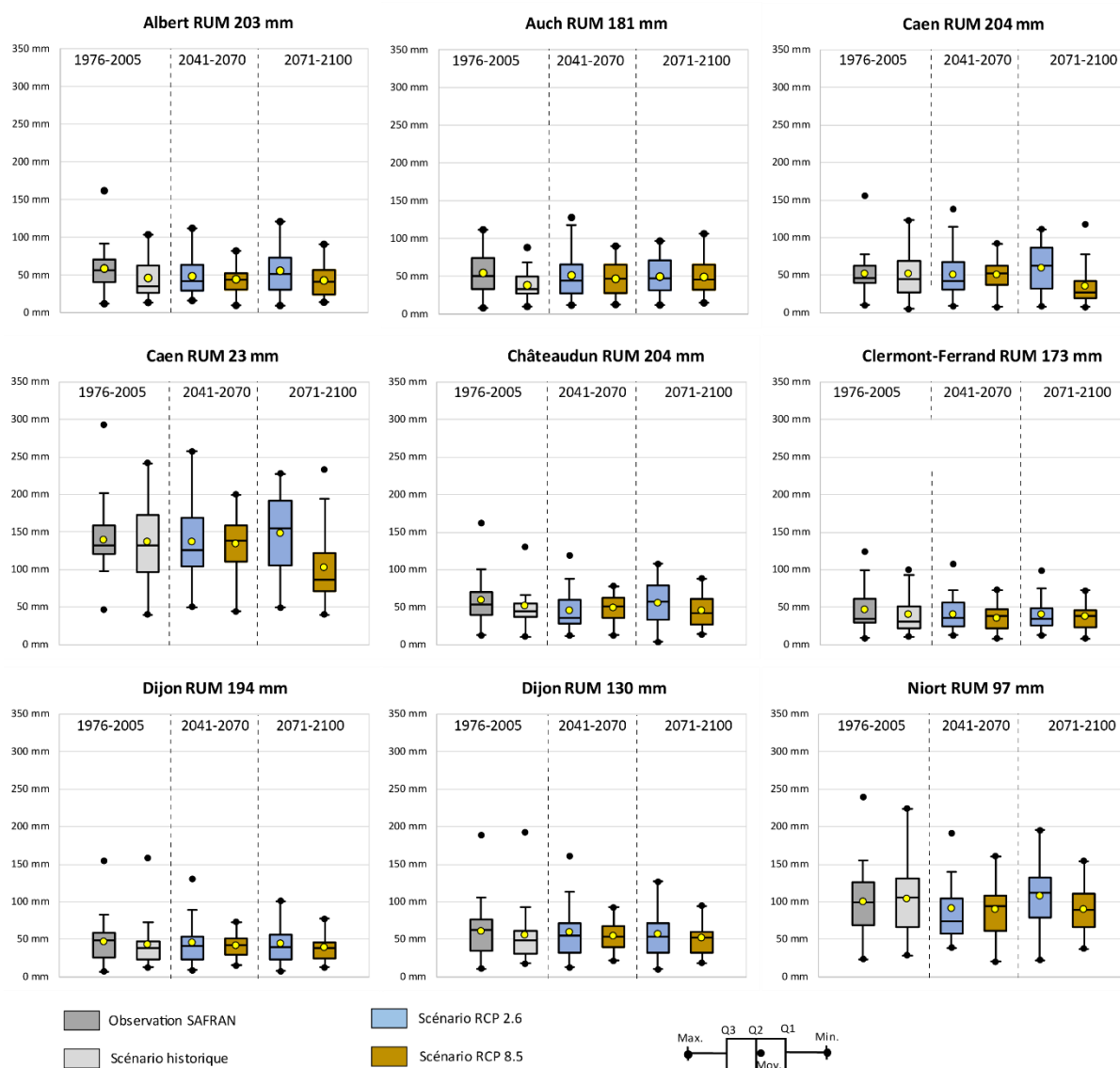
¹²⁴ Ce seuil est annoncé pour un déficit hydrique cumulé à partir du stade épi 1 cm, ce qui correspond aux valeurs de déficit hydrique cumulé au cours du cycle pour les sites étudiés dans la présente étude. En effet, comme en attestent les valeurs de confort hydrique, le manque d'eau pour la plante n'est pas ou très peu présent avant la montaison.

¹²⁵ Le confort hydrique correspond au rapport ETR/ETM. C'est un indicateur de satisfaction en eau variant de 0 (stress hydrique exacerbé) à 1 (conditions optimales).

de même pour les « petits sols » situés au sud de Caen où le déficit hydrique atteint près de 140 mm (pertes de 20 à 30 q/ha) et où le confort hydrique n'est compris qu'entre 0,6 et 0,5 de l'épaisseur à la maturité.

À l'horizon moyen (**Figure 207**), le déficit hydrique resterait stable et peu de différences seraient constatées entre les deux scénarios. Les évolutions du manque d'eau cumulé seraient faibles, avec de légères diminutions (- 14 mm à Niort : - 14%) ou augmentations (+ 6,5 mm à Auch : + 15%). Ce constat est également valable pour le confort hydrique. À l'horizon lointain, en revanche, les deux scénarios se différencient. Dans le cas du RCP 2.6, le manque d'eau resterait globalement équivalent à la période de référence. Avec le RCP 8.5, le déficit hydrique cumulé présenterait une légère diminution, allant de 10 à 30 % pour Albert, Niort, Chateaudun et Caen. En conséquence, la plante disposerait de conditions hydriques un peu plus confortables. En revanche, le manque d'eau augmenterait légèrement à Auch (+10 %).

Figure 207 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP



Réalisation : Beauvais et al., 202 (Simulations bioclimatiques à partir des données SAFRAN et CNRM-2014)

Finalement, le constat dressé dans la première partie de ce chapitre semblait annoncer des conditions plus pénalisantes pour la plante compte tenu des vagues de chaleurs et de la dégradation des conditions pédo-climatiques. Néanmoins, l'anticipation des stades liée à l'augmentation de la température permettrait de contenir l'échaudage thermique et de ne pas cumuler de manque d'eau plus conséquent qu'en période de référence, le blé terminant son cycle en début d'été météorologique et non plus au milieu de celui-ci.

8.1.5. Réduction du rayonnement cumulé pendant la montaison

Avec le changement climatique, le rayonnement – nécessaire pour les processus de photosynthèse – serait plus fort. Néanmoins, le blé ne pourrait pas en profiter à cause de l'anticipation des stades (**Tableau 57**).

La montaison s'effectuerait même avec un cumul de rayonnement plus faible. À l'horizon moyen, il serait inférieur de 6 à 8 % avec le scénario RCP 2.6 et de -10 à -13 % avec le scénario RCP 8.5. Pour l'horizon lointain, il n'y a pas d'évolution avec le scénario « optimiste ». En revanche, avec le scénario « pessimiste » cette réduction s'amplifie davantage : de -18 à 25 %. C'est la première partie de la montaison qui serait la plus affectée, notamment la période « épi 1 cm-2 nœuds » avec une diminution supérieure à 40 % à Albert, Caen et Châteaudun, tout en sachant que le site pour lequel elle est moins prononcée (Auch) elle est de -23 %. Entre l'épiaison et la floraison, cette dégradation n'est plus que de l'ordre de -5 à -13 % selon les sites. Il conviendrait dans ce cas de rester prudent face au risque de journées avec faible rayonnement pendant la méiose pollinique puisque celle-ci s'effectue avant l'épiaison.

En revanche, si la période de remplissage des grains a lieu plus tôt dans l'année, nous pourrions penser qu'elle recevrait également moins de rayonnement. Mais l'augmentation du rayonnement solaire au printemps (moins de nébulosité) permet alors de compenser ce déficit. Dans le cas du scénario RCP 8.5, les valeurs simulées restent équivalentes à celles du scénario historique. Avec le scénario RCP 2.6, le cumul pourrait même être légèrement excédentaire, de 8 à 21 % à long terme selon les sites.

Tableau 57 : Evolution du rayonnement cumulé pendant la montaison et le remplissage des grains (en cal/cm²/jour entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Montaison						
Albert	25090	24016	21976	21044	23456	18704
Auch	24506	24211	22745	21811	23196	19914
Caen	23567	23512	21935	20475	22363	17535
Châteaudun	23924	23432	21485	20356	21389	18055
Clermont-Ferrand	22976	21567	20312	19264	20555	16864
Dijon	22626	22028	21438	20105	21258	17637
Niort	24799	25797	24264	23233	24905	21203
Remplissage des grains						
Albert	17383	16615	19292	17741	20133	16941
Auch	16459	16397	16674	16101	17673	15353
Caen	16451	17589	19201	18379	20230	16694
Châteaudun	17297	17433	18535	17534	18889	16655
Clermont-Ferrand	16411	16363	17184	16167	18062	15469
Dijon	16059	16202	17437	16601	18466	15987
Niort	17099	17857	18171	17299	19373	16440

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014)

Au-delà du seul rayonnement, le quotient photothermique (Nix, 1976), rapport entre le rayonnement global et la température, est corrélé au nombre de grains/m² (Fischer, 1985) de la mi-montaison à la floraison (Gate, 1995) (**Tableau 58**). Si la température est plus élevée, le rayonnement doit augmenter aussi. Dans le cas du scénario RCP 2.6, cet indicateur resterait stable, voire en très légère augmentation à horizon lointain sur la phase épaison-floraison. Le constat est en revanche différent avec le scénario RCP 8.5. En effet, le quotient photothermique serait alors plus faible. Sur l'ensemble de la période il pourrait diminuer de -10 % à -16 % selon les sites. Toutefois, en décomposant les stades, cette réduction est plus prononcée pour la période « 2 nœuds-méiose » (de -16 à -24 %) tandis qu'elle est plus faible pour les périodes « méiose-épaison » (de -7 à -14 % et 0 % à Albert) et « épaison-floraison » (-4 à -12 %).

Tableau 58 : Evolution du quotient photothermique du stade 2 nœuds à floraison en cal/cm²/degrés jour entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
2 nœuds - méiose						
Albert	30	30	31	29	30	24
Auch	31	30	29	27	29	24
Caen	29	30	29	28	29	23
Châteaudun	31	30	32	26	28	23
Clermont-Ferrand	29	27	27	24	27	21
Dijon	27	27	29	25	27	22
Niort	31	30	31	28	31	25
Méiose - épiaison						
Albert	30	27	30	28	29	27
Auch	27	29	29	29	28	25
Caen	29	28	30	28	30	26
Châteaudun	28	30	29	30	29	26
Clermont-Ferrand	27	26	27	28	27	24
Dijon	25	26	28	28	27	24
Niort	26	29	29	31	29	27
Epiaison - floraison						
Albert	28	28	29	26	32	26
Auch	26	26	27	26	26	24
Caen	26	27	29	26	30	25
Châteaudun	29	28	29	27	28	25
Clermont-Ferrand	26	26	27	25	27	23
Dijon	25	26	27	26	28	24
Niort	27	27	28	26	29	26

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014)

8.1.6. Réduction des gelées mais hausse de l'exposition de la méiose aux basses températures

Les gelées automnales peuvent endommager le blé tendre à partir de -5°C. Ce risque est presque absent pour les sites océaniques (Caen et Niort) et le site méridional (Auch). Il peut néanmoins survenir dans les régions éloignées du littoral, entre 6 années sur 30 à Albert et 13 années sur 30 à Dijon, site le plus oriental. Dès l'horizon moyen, l'occurrence de cet aléa disparaîtrait à Caen, Auch, Niort et Châteaudun en raison du réchauffement. Sur les autres sites, la pression devient faible et ne concernerait que le scénario RCP 2.6, et il en va de même à l'horizon lointain.

L'occurrence de gelées à -10°C pendant le tallage est actuellement rare à Niort, Auch et Caen (respectivement 3, 4 et 5 années sur 30), un peu plus fréquente à Albert et Chateaudun (7/30 ; 8/30) et plus commune à Dijon (12/30) et Clermont-Ferrand (18/30). A l'horizon moyen, ces très fortes gelées diminueraient sur les sites où elles sont déjà peu nombreuses en période de référence, tandis que ceux plus exposés restent encore vulnérables. À l'horizon lointain, elles seraient peu fréquentes, voire inexistantes avec le scénario RCP 8.5. Dans le cas du scénario RCP 2.6, elles pourraient toujours survenir. Même si l'occurrence est moins prononcée qu'en période de

référence, il conviendrait de rester prudent, notamment si l'hiver est doux et que le blé n'est pas endurci.

À Clermont-Ferrand, 7 années sur 30 connaissent un gel d'épis à -4°C . Cet aléa peut survenir lorsque la montaison débute précocement. Sur les autres sites étudiés, ce type de gelée tardive est pas ou peu rencontré. À l'horizon moyen, il serait moins présent, avec 5 et seulement 1 année concernée pour les deux scénarios à Clermont-Ferrand. À l'horizon lointain, la Grande Limagne ne compterait plus que 1 seule occurrence dans le cas d'un réchauffement important. Néanmoins, avec le scénario RCP 2.6, le risque serait équivalent à la période de référence. Le site de Dijon qui n'était jusqu'alors que peu concerné, serait exposé 6 années sur 30 en raison de l'avancement de la phénologie.

Le froid, lors de la méiose pollinique, peut engendrer un blocage du transfert du sucre vers les grains de pollen, perturbant ainsi la fécondation des ovules¹²⁶. Les journées de printemps avec une température minimale inférieure à $+4^{\circ}\text{C}$ pendant la méiose peuvent avoir lieu sur tous les sites (Tableau 59). Ce risque est inférieur à 5 années sur 30 à Albert, Caen et Niort. À Auch, où la méiose arrive plus précocement, l'occurrence est de 7 années sur 30 mais est plus fréquente à Dijon (9/30), Châteaudun (10/30) et Clermont-Ferrand (12/30). Ces occurrences augmentent à l'horizon moyen pour atteindre 10 années sur 30 pour tous les sites. L'avancement de la méiose dans le calendrier végétal l'expose davantage à ce risque. A Châteaudun et Dijon, près de la moitié de la normale climatique serait concernée. À l'horizon lointain, cette pression resterait maintenue, notamment dans le cas du scénario RCP 2.6. Avec le scénario RCP 8.5 le risque serait légèrement plus faible qu'en période de référence, excepté à Albert, Caen et Niort.

Tableau 59 : Occurrence d'au moins une journée avec une température minimale inférieure ou égale à 4°C pendant la période proche méiose (+/- 6 jours) et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même période

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Albert	03/30a 0,1	07/30a 0,4 j	11/30a 1,3 j	11/30a 1,2 j	09/30a 0,6 j	11/30a 0,7 j
Auch	07/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j	13/30a 1,2 j	11/30a 0,8 j	12/30a 0,7 j	06/30a 0,3 j
Caen	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	11/30a 0,7 j	11/30a 0,8 j	07/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j
Châteaudun	10/30a 0,9 j	10/30a 1,0 j	14/30a 1,7 j	14/30a 1,2 j	14/30a 1,1 j	09/30a 0,5 j
Clermont-Ferrand	12/30a 0,8 j	12/30a 0,8 j	11/30a 1,2 j	11/30a 0,9 j	14/30a 0,9 j	10/30a 0,8 j
Dijon	09/30a 0,5 j	10/30a 0,5 j	14/30a 1,2 j	13/30a 1,1 j	14/30a 1,0 j	07/30a 0,5 j
Niort	05/30a 0,2 j	05/30a 0,3 j	11/30a 1,0 j	11/30a 0,6 j	11/30a 0,6 j	09/30a 0,3 j

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014)

¹²⁶ <https://www.arvalis-infos.fr/stress-climatique-recent-a-meiose-et-floraison-les-processus-physiologiques-en-jeu-@/view-10280-arvarticle.html>

8.1.7. Augmentation des jours de très fortes pluies en fin de cycle

Sur la période contemporaine, l'occurrence de fortes précipitations reste rare (1 à 3 années sur 30) sur l'ensemble des sites, excepté à Dijon et Auch où l'aléa est plus présent (8 à 9 années sur 30 ; **Tableau 60**). A l'horizon moyen, avec le scénario RCP 2.6, un léger renforcement serait constaté sur l'ensemble des sites, sauf à Dijon et Auch. Dans le cas du scénario RCP 8.5, l'augmentation de l'aléa concernerait tous les sites. À l'horizon lointain, avec ce scénario la vulnérabilité augmenterait de façon plus prononcée, excepté à Dijon. A titre d'exemple, cette occurrence passe de 1 à 7 jours sur 30 ans pour le site caennais. On notera néanmoins que le scénario historique surestime le retour de ces évènements à Clermont-Ferrand.

Tableau 60 : Evolution de l'occurrence de jours de pluie où le cumul pluviométrique est supérieur ou égal à 20 mm : nombre d'année avec au moins une occurrence et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même période

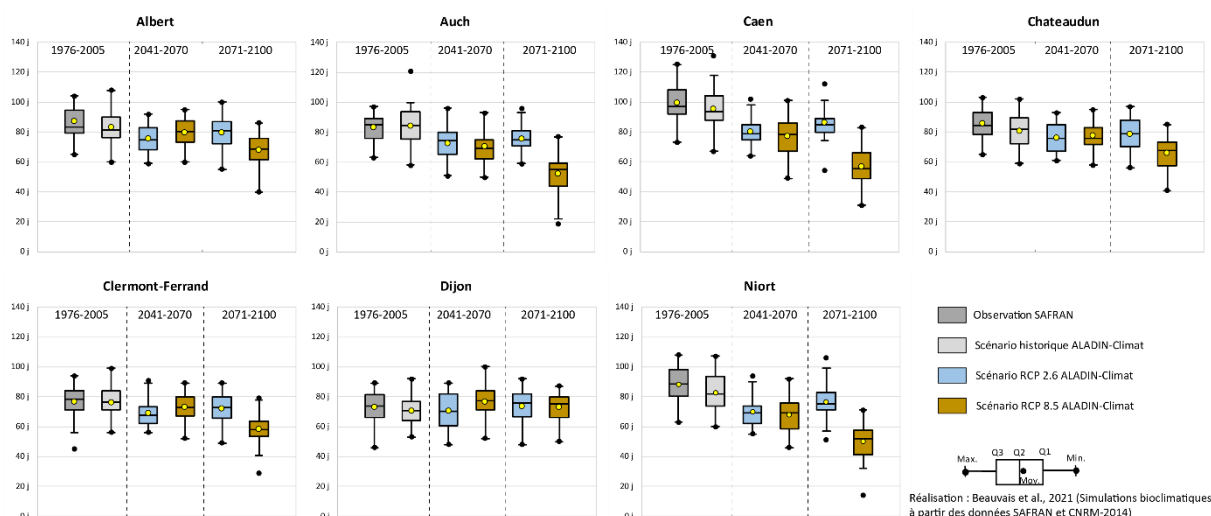
Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Albert	02/30a 0,1 j	04/30a 0,2 j	04/30a 0,3 j	07/30a 0,3 j	06/30a 0,2 j	09/30a 0,4 j
Auch	08/30a 0,3 j	09/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j	11/30a 0,6 j	11/30a 0,5 j	12/30a 0,6 j
Caen	01/30a 0,1 j	02/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	07/30a 0,2 j
Châteaudun	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	04/30a 0,2 j	07/30a 0,3 j	04/30a 0,2 j	07/30a 0,3 j
Clermont-Ferrand	03/30a 0,2 j	11/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j	14/30a 0,7 j	08/30a 0,3 j	09/30a 0,5 j
Dijon	09/30a 0,4 j	06/30a 0,2 j	06/30a 0,2 j	11/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j
Niort	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	06/30a 0,3 j	08/30a 0,3 j	04/30a 0,1 j	06/30a 0,2 j

Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014)

8.1.8. Réduction du nombre de jours disponibles pour la vernalisation

Le blé a besoin de températures comprises entre 3 et 10°C pendant le tallage car il doit être vernalisé pour fleurir au printemps (Gate, 1995). Les variétés typés « très hiver » ont besoin d'au moins 60 jours à ces basses températures tandis que pour celles dites « alternatives », 20 jours suffisent. À partir de la levée jusqu'à la fin du tallage, l'ensemble des sites dispose en moyenne de plus de 60 jours de vernalisation sur la période de référence 1976-2005 (**Figure 208**). À Dijon et Clermont-Ferrand, les hivers plus rudes ne permettent pas de cumuler autant de jours disponibles, les températures étant paradoxalement trop froides pour permettre cette action. Au regard de la dispersion des données SAFRAN, il est d'ailleurs possible de constater que certaines années sont peu vernalisantes (jusqu'à moins de 50 jours). Le site de Caen connaît lui près de 100 jours de vernalisation grâce aux hivers simplement frais durant lesquels l'essentiel des journées se situe entre 3 et 10°C.

Figure 208 : Evolution du nombre de jours disponibles pour la vernalisation du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP



À l'horizon moyen, la diminution de ce cumul toucherait surtout les deux sites les plus océaniques et le site le plus au sud. Ainsi, Caen, Niort et Auch ne disposeraient plus que d'environ 70 jours de vernalisation, avec des années plus défavorables avec moins de 60 jours, remettant ainsi en cause l'usage des variétés hivernales. La diminution serait moins marquée pour les autres sites. À Dijon et Clermont-Ferrand, l'élévation de la température réduirait la rudesse des hivers et permettrait davantage de jours disponibles dans le cas du scénario RCP 8.5. À l'horizon lointain, dans le cas du scénario dit « optimiste », la tendance repartirait très légèrement à la hausse, mais sans pour autant retrouver la situation de la période 1976-2005. Avec le scénario RCP 8.5, la réduction du nombre de jours pour la vernalisation se poursuivrait. Si les sites les plus au nord pourraient encore connaître des années aux hivers favorables, la variabilité interannuelle du climat ne le garantirait pas. Après Auch, les sites les plus défavorisés seraient Caen et Niort (qui étaient pourtant les plus vernalisants en période de référence) puisque l'élévation de la température journalière hivernale engendrerait un dépassement régulier du seuil de 10°C. Les années les plus défavorables ne permettraient plus de semer que des variétés alternatives, sans quoi le blé pourrait ne pas fleurir au printemps ou tout simplement ne pas entamer sa montaison et rester au stade végétatif.

8.1.9. Synthèse des évolutions constatées sur les grandes plaines céréalières

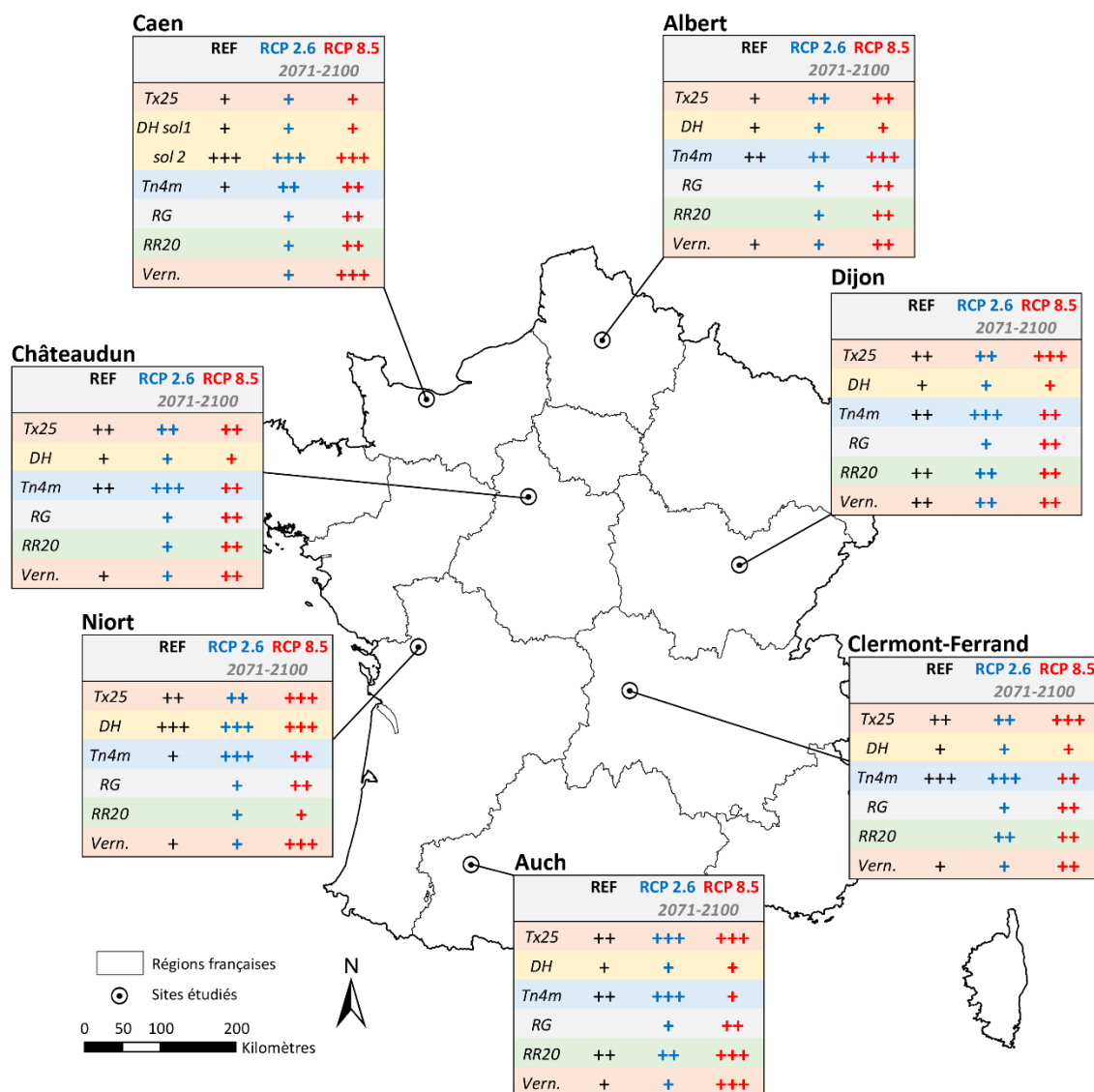
Les régions céréalières françaises ne sont pas toutes soumises au même climat. Face à ces disparités, l'agriculture sait s'adapter en recourant à des variétés de précocités différentes. Ainsi, dans les régions exposées à de nombreux jours de chaleurs et à des sécheresses, la maturité physiologique intervient plus tôt afin d'éviter en partie ces deux aléas. À l'exception des petits sols, tels que ceux du sud de Caen et de Niort, les sols épais sur lesquels prennent place généralement ces cultures permettent également de limiter le déficit hydrique.

Face à l'augmentation de la température, dans le cas du scénario pessimiste à l'horizon lointain (2071-2100), le cycle du blé pourrait être plus court d'un mois. L'épiaison aurait ainsi lieu en moyenne fin avril dans le sud et début mai dans le nord. La maturité physiologique interviendrait à la fin de la première décade de juin dans le sud et en cours de la deuxième pour le nord. Dans le

cas de variétés insensibles à la photopériode, cette avancée des stades pourrait être beaucoup plus prononcée.

En conséquence, cette anticipation permettrait au blé d'éviter les sécheresses estivales et de limiter la hausse annoncée de l'échaudage thermique pendant le remplissage des grains, même si des années extrêmes ne sont pas à exclure en raison de la variabilité interannuelle du climat. Il convient néanmoins de rappeler que les situations resteraient inégales entre les sites, en relation avec des conditions pédoclimatiques différentes (sols à faible capacité hydrique naturellement plus défavorisés). Les jours d'échaudage sur le cycle du blé dépasseraient en moyenne 15 jours à Auch et 10 jours pour les autres sites, à l'exception de la Plaine de Caen. Au final, le blé ne réduirait pas plus qu'aujourd'hui son activité photosynthétique utile à la valorisation du CO₂ atmosphérique (en hausse) stimulant les rendements. Toutefois, l'augmentation des jours de chaleurs en fin de cycle pourrait venir nuancer cette analyse pour le remplissage des grains. D'autres aléas jusqu'alors inattendus pourraient survenir. La montaison débutant plus tôt sur tous les sites, cette étape essentielle dans le développement de la plante pourrait manquer de rayonnement et provoquer une diminution du quotient photothermique, impactant négativement la croissance et le nombre de grains/m². La méiose se produirait en première partie de printemps, moment de l'année où les basses températures peuvent encore survenir et affecter la fertilité de la plante. Les régions agricoles de Caen, d'Albert et de Niort devront d'ailleurs être attentives à cet aléa car il est rare en période de référence. Les hivers de plus en plus doux engendreraient une réduction accrue du nombre de jours disponibles pour la vernalisation, moment crucial pour le passage du blé d'hiver de l'état végétatif à reproducteur. Enfin, il conviendra de rester vigilant face aux épisodes de très fortes pluies, associés à un risque de verse physiologique, qui pourraient survenir plus souvent. L'ensemble de cette analyse est synthétisé par la **Figure 209** qui expose l'évolution du potentiel bioclimatique du blé tendre à l'horizon 2100.

Figure 209 : Synthèse par approche experte de l'évolution de la vulnérabilité du blé aux aléas climatiques sur les 7 sites français étudiés entre la période de référence 1976-2005 et l'horizon lointain 2071-2100 pour deux scénarios RCP



Tx25 = nombre de jours d'échauffage thermique en fin de cycle ; DH = déficit hydrique ; Tn4m = basses températures à la méiose ; RG = rayonnement global cumulé lors de la montaison ; RR20 = très fortes pluies en fin de cycle ; vern. = nombre de jours disponibles pour la vernalisation

La duplication de la méthode proposée pour la Normandie montre des tendances similaires pour les autres grandes plaines céréalières françaises. L'anticipation de la phénologie engendre une modification de l'exposition aux aléas climatiques qui concerne tous les sites étudiés. C'est sur l'évolution de l'échauffage thermique que la Plaine de Caen se démarque par rapport aux autres régions agricoles céréalières puisque l'augmentation des jours de chaleur sur le cycle de la plante y serait davantage contenue. Dans le cas de variétés plus alternatives pour contrer la baisse du nombre de jours disponibles pour la vernalisation, la céréaliculture normande pourrait tirer son épingle du jeu et rester une des places fortes de la production nationale de blé tendre. Aussi, dans l'hypothèse d'une réduction des rendements en France et dans le monde, nous pourrions supposer une augmentation des prix des cours du blé (loi de l'offre et de la demande) qui pourrait toujours permettre rentable cette culture.

On notera également, d'une part qu'en calculant les sommes de températures des stades phénologiques à partir de leurs dates de réalisation moyennes sur la période de référence, et d'autre part en déterminant une date de semis différente, que les résultats exposés pour la Plaine de Caen suivent les mêmes tendances que ceux présentés dans la partie 2.

8.2. S'intéresser aux autres cultures présentes dans les rotations culturales : l'exemple du lin

Même si le blé tendre d'hiver est la plante cultivée qui domine l'assolement de la Plaine de Caen, d'autres sont présentes dans les rotations culturales. Elles permettent indirectement sa faisabilité car le blé ne peut pas être semé tous les ans sur la même parcelle (maximum deux années de suite) en raison du risque de maladies, ravageurs et de la gestion des mauvaises herbes. À ce titre Arvalis estime qu'une monoculture de blé connaît une productivité inférieure à un blé assolé de l'ordre de 5 à 30 %¹²⁷.

Par ailleurs, ces autres cultures permettent de diversifier les débouchés agricoles et de sécuriser les revenus des exploitations. Par conséquent, l'avenir de l'agrosystème céréalier repose également sur l'anticipation des conséquences attendues pour les autres productions végétales. Nous avons choisi ici de prendre l'exemple du lin fibre de printemps (**Figure 210**) qui constitue une tête d'assolement. C'est aussi une culture emblématique du savoir-faire technique agricole régional, puisque la Normandie en est la première région productrice dans le monde. La filière agricole souhaite actuellement poursuivre ces productions puisqu'elle travaille même à la relocalisation de la seconde transformation, de la Chine vers la Normandie. L'implantation de ces usines textiles ou encore l'achat du matériel agricole nécessitent des investissements. Par conséquent une étude phénoclimatique sur cette plante prend tout son sens. C'est aussi l'occasion de dupliquer la méthodologie présentée dans cette thèse à une autre culture.

Figure 210 : La floraison du lin fibre de printemps en Plaine de Caen



Photographies : François Beauvais (10 juin 2020 et 06 juin 2015 ; Plaines de Saint->Manvieu-Norrey et du Mesnil-Patry)

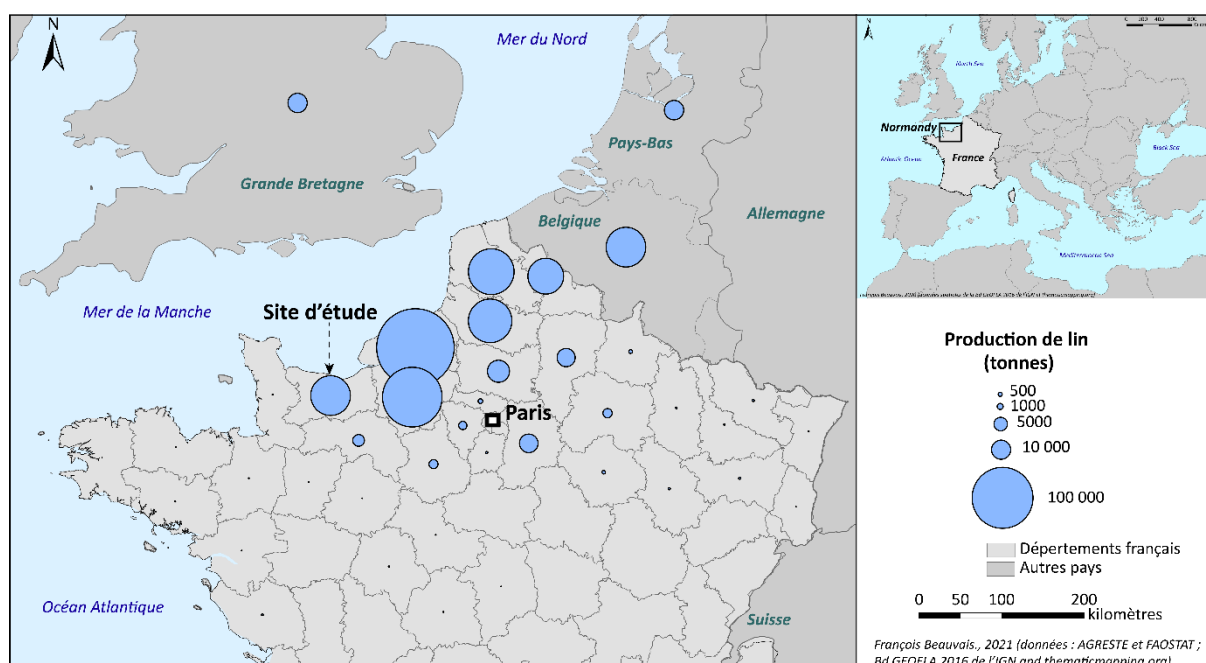
¹²⁷ <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/ble-sur-ble-techniques-culturelles-217-52133.html>

8.2.1. La Normandie : première région productrice de lin fibre de printemps dans le monde

La France est le premier producteur de lin fibre puisqu'elle compte pour 54 % de la production mondiale sur la période 2000-2018, soit près de 500 000 tonnes pour un total mondial de plus de 900 000 t (données FAOSTAT). La Chine occupe la deuxième place (221 700 t), suivie par la Russie (45 639 t), la Biélorussie (43 134 t), le Royaume-Uni (18 078 t) et les Pays-Bas (17 156 t). L'essentiel de la production mondiale se concentre le long du littoral de la Mer de la Manche, de la Normandie jusqu'aux Pays-Bas, dont le climat tempéré océanique est favorable à cette plante (Sultana, 1992). De plus, cette culture est encouragée en Europe par la Politique Agricole Commune (Preisner et al., 2014).

La Normandie produit plus de 300 000 t de lin en moyenne chaque année (données AGRESTE sur la période 2000-2018 ; **Figure 211**), ce qui représente près de deux tiers de la production française (62 %) et un tiers de la production mondiale (33 %).

Figure 211 : Carte de la production de lin fibre en France et localisation du site étudié



Les surfaces dédiées à la culture de lin représentent seulement 3 % de la surface agricole utile régionale, avec environ 55 000 ha en 2016 (données Registre Parcellaire Graphique en 2016) alors même qu'elles ont augmenté ces dernières années¹²⁸. Cette caractéristique s'explique par une implantation tous les 7 ans¹²⁹ dans la rotation culturale. Néanmoins, cette plante herbacée annuelle est attractive compte tenu de la forte valeur ajoutée qui lui est associée¹³⁰. Cette culture est semée en hiver ou au printemps. Les principales variétés cultivées sont des variétés de printemps

¹²⁸ Les surfaces consacrées à la culture du lin ont augmenté de 96 % entre 2000 et 2018, passant de 33 030 à 64 810 ha d'après les données Agreste traitées pour la Normandie.

¹²⁹ Le lin est implanté tous les 6 à 7 ans pour éviter un épuisement du sol et les maladies. Il fait figure de tête d'assolement et permet d'augmenter les rendements des cultures suivantes de 20 à 30 % (d'après la Confédération Européenne du Lin et du Chanvre (CELC, 2012).

¹³⁰ Plusieurs sources journalistiques font état de l'attractivité économique de cette plante : *Ouest-France*, « Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot », G. Le Du, 11/01/20 ; *Ouest France*, « Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot », G. Le Du, 11/01/20 ; *L'Union Agricole*, « Terre de Lin : le développement durable plus que jamais d'actualité » C. Hennebert, le 18/02/19 ; *L'Oise Agricole*, « Le marché reste très porteur », B. Leduc, le 10/03/16.

(Arvalis¹³¹, site internet) dont le cycle se déroule sur environ 120 jours (Goudenhooff et al., 2019). Plus marginales, les variétés d'hiver répondent aux problématiques d'étalement des travaux et sont particulièrement adaptées aux terroirs séchant (Terre de Lin¹³², site internet). Les étapes pour obtenir des fibres exploitables nécessitent un savoir-faire technique particulier. Le lin est arraché l'été au cours duquel les graines sont récoltées pour être ressemées l'année suivante et les pailles retournées plusieurs fois pour sécher. C'est l'opération de rouissage (**Figure 212**) qui requiert une alternance de pluie, de soleil et de vent pour que la paille commence à se séparer de la fibre. Puis les pailles sont transférées aux coopératives linières spécialisées dans la technique du teillage, opération qui consiste à extraire les fibres de la plante. Les anas, co-produit du teillage, constitués de fragments de paille sont valorisés dans de nombreux débouchés (litière pour chevaux, combustible, panneaux agglomérés). Les fibres longues destinées aux usines de filature sont principalement exportées vers la Chine (à hauteur de 90 %) avant d'être réexpédiées vers l'Italie et les pays d'Europe de l'Est pour le tissage. Une plus faible partie des productions (fibres courtes) est utilisée comme composites (Terre de Lin, site internet ; CCE¹³³, 2008).

Figure 212 : Rouissage du lin fibre de printemps à Tessel le 09 juillet 2020



La Plaine agricole de Caen dispose d'un climat océanique légèrement altéré, associé, dans sa partie méridionale, à des sols épais, qui constituent des conditions favorables à la culture du lin fibre de printemps. La température moyenne sur les mois d'avril, mai, juin et de juillet durant lesquels le lin se développe est de 14,3 °C pour 220 mm de précipitations sur la période 1991-2020. Seulement un jour de gel apparaît en moyenne (uniquement en avril) et 13 jours de chaleur (dont 8 jours en

¹³¹ L'entreprise Arvalis-Institut du Végétal est un institut technique de recherche appliquée en agriculture sur les cultures de céréales à paille, maïs, sorgho, pommes de terre, fourrages, lin fibre et tabac (<https://www.arvalis-infos.fr/lin-des-objectifs-bien-particuliers-@/view-10364-arvarticle.html>).

¹³² Terre de Lin est une coopérative linière (<http://www.terredelin.com/>).

¹³³ Commission des Communautés Européennes.

juillet). Néanmoins, la culture du lin reste malgré tout fragile aux aléas météo-climatiques comme le soulignent des linculteurs : « *on tremble du semis jusqu'à la récolte* » (Ouest France, « Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot », G. Le Du, 11/01/20). En effet, le déficit hydrique peut engendrer des difficultés à la germination, une croissance réduite et des fibres creuses qui dans ce cas ne sont pas exploitables pour l'industrie textile. Les jours de chaleur engendrent également ces deux derniers impacts. Enfin, les fortes pluies peuvent engendrer la verse physiologique. Ce dernier aléa est fréquemment observé en Plaine de Caen. D'ailleurs les excès d'eau du mois de juin 2021 ont couché le lin dans de nombreuses parcelles, avec parfois la quasi-totalité de sa superficie. La **Figure 213** témoigne par exemple des conséquences qui succèdent à 64 mm de précipitations concentrés sur 7 jours (avec une journée cumulant 19,6 mm le 19 juin 2021 dont 8 mm en 12 minutes).

Figure 213 : Verse du lin fibre de printemps le 23 juin 2021



Photographie : François Beauvais., le 23 juin 2021

8.2.2. Ajustement de la méthode pour le lin fibre de printemps

Les simulations reposent sur la même méthodologie que pour le blé tendre d'hiver. Les sommes de températures retenues (base 5 °C, écrêtée à 28 °C) sont celles exposées par Arvalis-L'Institut du végétal (2015) de Normandie dans le cadre d'une réunion technique. Elles sont proches de celles recensées dans Goudenhoofft et al. (2019) et de l'ensemble des variétés de lin existantes dans l'outil Visio-Lin d'Arvalis-L'Institut du végétal. Les simulations sont produites pour une date de semis le

20 mars de chaque année¹³⁴. Les indicateurs phénoclimatiques étudiés et les conséquences associées sont présentés dans le **Tableau 61**.

Tableau 61 : Facteurs limitants pour les productions de lin fibre de printemps et indicateurs associés¹³⁵

Indicateurs	Stades phénologiques	Conséquences possibles
-Déficit hydrique	Tous stades	Difficultés à germer, croissance réduite, fibres creuses (Arvalis, fiches accidents)
-Confort hydrique (valeur comprise entre 0 et 1) [1]		
-Températures supérieures à 25 °C	Tous stades	Fibres creuses (Bert, 2011) [2]
-Fortes (RR10)[3] et très fortes pluies (RR20)	« 4 cm – floraison » et « floraison- maturité »	Verse (Arvalis, fiches accidents), seuil déterminé par observation au champ[4]
-Durée des stades végétatifs	Tous stades	Modification de la durée d'accumulation de biomasse et décalage de la phénologie dans le calendrier

Un seul type de sol a été retenu. Il s'agit du RUM calculé pour la parcelle d'Anguerny (représentative du secteur nord) en considérant le potentiel d'enracinement du lin fibre de printemps. Deux modèles climatiques sont retenus : ALADIN-Climat et WRF (simulations CNRM-2014 et IPSL-2014). Le point de grille retenu est le même que pour l'analyse agroclimatique et phénoclimatique sur le blé tendre. Le scénario historique (1976-2005) est comparé à l'horizon lointain (2071-2100) pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5 communs aux deux simulations. L'ETP est calculée à partir de la formule de Thornthwaite¹³⁶ puisque le rayonnement n'est pas disponible avec les données IPSL-2014 pour calculer l'ETP Turc.

8.2.3. Réduction de la durée du cycle

Sur la période de référence 1976-2005, avec les données météorologiques du modèle SAFRAN, la floraison intervient en moyenne après 85 jours, soit le 12 juin (**Figure 214**). Les simulations en période historique avec les données des modèles ALADIN-Climat et WRF donnent respectivement une floraison après 88 jours et 90 jours (15 et 17 juin). Compte tenu de l'élévation

¹³⁴ Les dates de préconisations pour les semis en France sont entre le 15 mars et le 15 avril pour une température du sol entre 7 et 9 °C (Sultana, 1983).

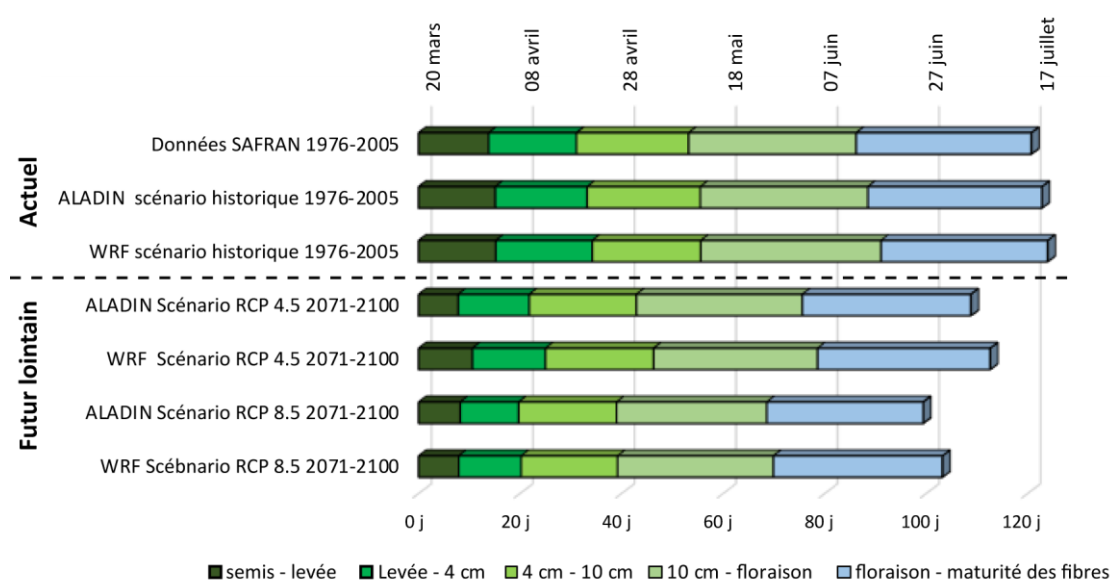
¹³⁵ Nous avons observé la verse du lin à trois occasions. La verse du 20 juin 2019 fait suite à deux jours de pluie où les cumuls sont de 11,3 et 14,5 mm. Celle du 25 juin 2019 succède à un cumul journalier de 25 mm ayant engendré un couchage des lins plus prononcé. Des dégâts importants ont également été observés après un cumul pluviométrique de 19,6 mm le 19 juin 2021. Par conséquent les seuils de 10 mm (RR 10) et 20 mm (RR 20) sont retenus. Le pas de temps est quotidien car les données horaires ne sont pas disponibles en sortie des modèles climatiques.

¹³⁶ ETP calculée à partir de la formule de Thornthwaite, fondée sur la température et la latitude, jugée représentative pour le nord-ouest de la France (comm. personnelle de V. Dubreuil).

des températures d'ici 2100, dans le cas du scénario RCP 4.5, elle aurait lieu au bout de 76 et 79 jours (3 et 6 juin), et de 69 et 70 jours (27 et 28 mai) pour le scénario RCP 8.5.

La date de maturité des fibres connaîtrait également une avancée. Sur la période 1976-2005, la maturité observée est le 18 juillet, ce qui correspond à une durée du cycle de 121 jours. Avec les scénarios historiques des deux modèles il s'agit du 21 juillet (124 jours). À la fin du siècle, avec le scénario RCP 4.5, elle arriverait le 6 juillet (109 jours) avec ALADIN et le 10 juillet (113 jours) avec WRF. Sans réduction des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5), l'anticipation est telle que le cycle se clôturerait avant le mois de juillet : le 26 juin (99 jours) pour ALADIN et le 30 juin (103 jours) pour WRF.

Figure 214 : Evolution possible de la durée des périodes phénologiques du lin fibre de printemps en Plaine de Caen d'ici 2100 avec les modèles ALADIN-Climat et WRF

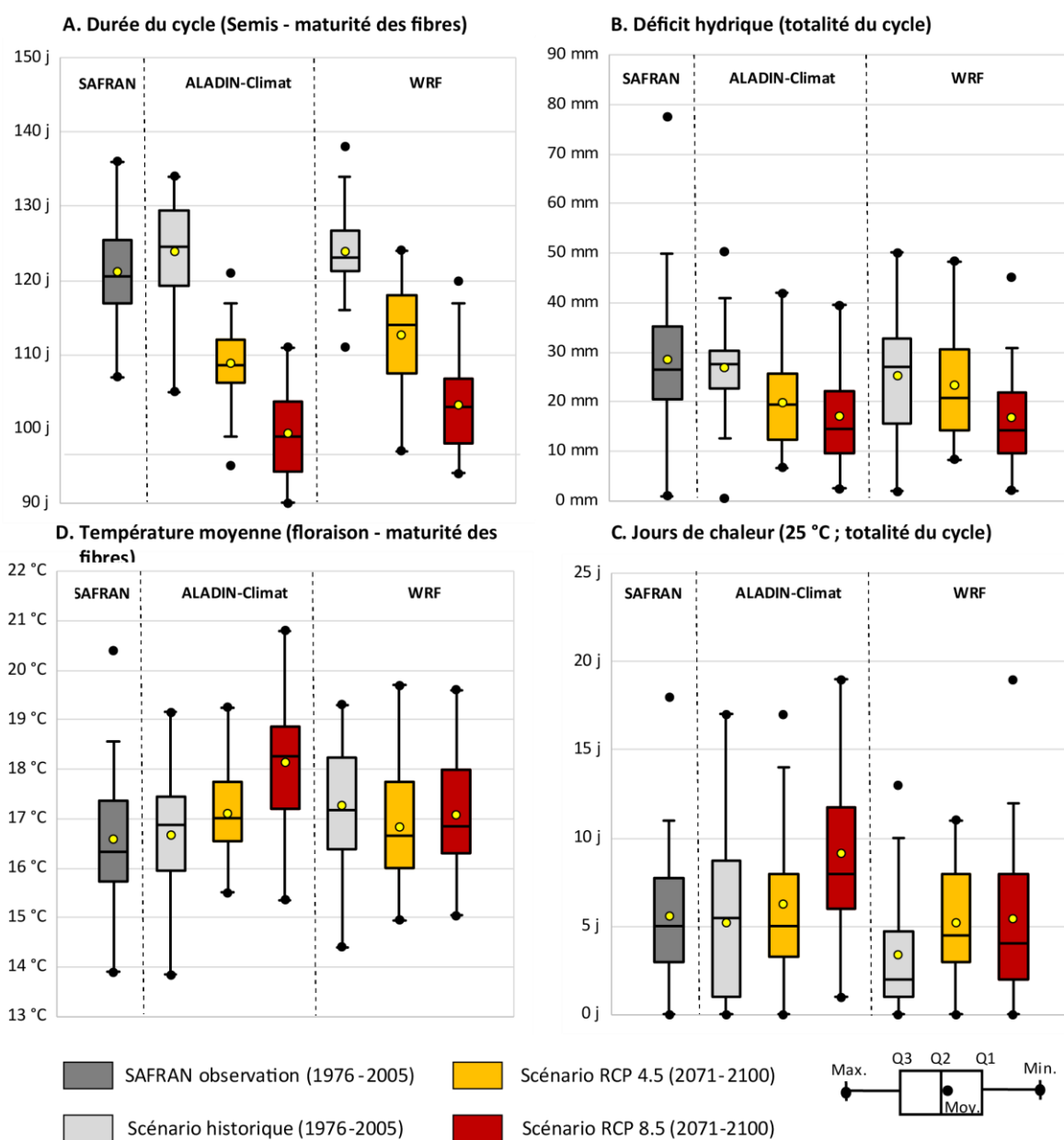


Réalisation : François Beauvais., 2021 (sommés de températures calculées à partir des données CNRM-2014 et IPSL-2014)

La variabilité interannuelle diminuerait légèrement dans le cas des données ALADIN-Climat. Par ailleurs, sur la période de référence 1976-2005, le nombre d'années avec une durée du cycle inférieure à 110 jours reste faible et exceptionnel. En 2100, ces années pourraient être la norme, à tel point que cela concernerait une année sur deux avec ALADIN pour le scénario RCP 8.5 (Figure 215 A).

L'élévation des températures engendrerait donc une réduction de la durée des cycles végétatifs du lin fibre de printemps. L'anticipation des stades phénologiques justifie l'emploi des indicateurs phéno-climatiques. Compte tenu de l'avancée de la phénologie dans le calendrier, l'exposition aux impacts climatiques pourrait en être modifiée.

Figure 215 : Comparaison de la période de référence (1976-2005) avec la période lointaine (2071-2100) des valeurs associées : à la durée du cycle du lin fibre de printemps, de son déficit hydrique, du nombre de jours de chaleur et de la température moyenne durant la phase « floraison-maturité des fibres »



Réalisation : François Beauvais., 2021 (données : simulations bioclimatiques à partir des données CNRM-2014 et IPSL 2014)

8.2.4. Réduction du déficit hydrique

Malgré une augmentation de l'ETP au printemps, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle serait plus faible qu'en période de référence (**Figure 215 B**). L'anticipation de la maturité des fibres permettrait de réduire la fenêtre d'exposition aux sécheresses d'autant plus que le sol limoneux garantit de l'eau à la plante jusqu'à la fin du printemps. Le déficit hydrique observé avec les données du modèle SAFRAN sur la période de référence est de 29 mm. Il est estimé à 27 mm et 25 mm avec le scénario historique des modèles ALADIN-Climat et WRF. À long terme, ce manque d'eau

pour la plante diminuerait de 7 mm et de 10 mm pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 d'ALADIN. Avec WRF, la réduction est de 2 mm dans le cas du premier scénario et de 9 mm pour le second.

Il n'y a donc pas d'évolution significative du déficit hydrique, voire une légère diminution de cette contrainte. Ainsi, en période de référence le déficit hydrique moyen par jour est de 0,22 mm avec ALADIN et de 0,20 mm avec WRF. Dans le cas du scénario RCP 8.5 il serait respectivement de 0,17 et 0,16 mm. Le confort hydrique, quant à lui, est de 1 (valeur optimale) jusqu'à la floraison. Actuellement il se dégrade légèrement en fin de cycle (0,8 entre la floraison et la maturité des fibres). Dans le cas d'une anticipation des stades, aucune accentuation n'est constatée après la floraison. Au contraire les conditions seraient même plus favorables (confort hydrique de 0,9).

8.2.5. Augmentation des jours de chaleur

Avec des saisons plus chaudes, tous les stades phénologiques seraient avancés dans le calendrier, ce qui permettrait à la plante d'échapper à la forte hausse des températures du début d'été (cycle végétatif terminé avant). A titre d'exemple, sur la période 1976-2005, la température moyenne entre la floraison et la maturité des fibres est de 16,6 °C (**Figure 215 C**). En 2100, dans le cas du scénario RCP 4.5 elle serait de 17,1 °C (+ 0,5 °C) et 16,8 °C (+ 0,2 °C) avec les données ALADIN et WRF. Pour le scénario RCP 8.5, elle reste faible avec WRF (17,1 °C : +0,5 °C) mais est plus marquée avec ALADIN (18,1 °C : +1,5 °C).

Toutefois, la hausse modérée de la température ne doit pas masquer l'occurrence plus grande de vagues de chaleur qui pourraient survenir dès le printemps (**Figure 215 D**). Les jours de chaleur subis par la plante au cours de son cycle deviendraient plus nombreux. Ce type d'aléa est déjà présent puisque la moyenne actuelle de l'observation (modèle SAFRAN) est de 5,6 jours (contre 5,2 jours avec le scénario historique d'ALADIN et 3,4 jours avec WRF). Dans le cas d'un réchauffement climatique contenu d'ici 2100 (RCP 4.5), l'augmentation du nombre moyen de jours d'échaudage pourrait être de 1 jour avec ALADIN et de 2 jours avec WRF. En revanche, dans le cas d'un réchauffement conséquent (RCP 8.5), elle serait respectivement de 4 jours et de 2 jours. La variabilité interannuelle pourrait augmenter légèrement dans le cas du dernier scénario d'après le modèle ALADIN, rendant les conditions globales de culture plus incertaines d'une année à l'autre.

8.2.6. Les fortes et très fortes pluies

Les fortes précipitations sur les périodes phénologiques « 10 cm-floraison » et « floraison-maturité » constituent un aléa régulièrement observé en Plaine de Caen (**Tableau 62**). Il est surtout dommageable avant la floraison. En effet, après ce stade, le lin a la faculté de se relever à la chaleur si les plants ne sont pas entremêlés. Vingt années sur trente sont concernées par au moins 1 journée où les précipitations sont supérieures ou égales à 10 mm. Concernant les très fortes pluies journalières (20 mm), l'occurrence est faible (5 et 6 années sur 30). Pour les prochaines décennies, les résultats sont contrastés entre les deux modèles. ALADIN ne simule pas d'évolution significative. Avec WRF c'est l'inverse, avec une nette augmentation des très fortes pluies alors même qu'elles sont sous-estimées en période de référence entre le stade 10 cm et la floraison. Le

même constat est effectué en s'intéressant au nombre de jours moyen de forte et très forte pluie sur les deux phases.

Tableau 62 : Evolution possible du nombre d'années concernées par au moins une journée où les précipitations sont supérieures ou égales à 10 mm et 20 mm durant les périodes « 10 cm - floraison » et « floraison – maturité » et nombre de jours moyens

Période et scénario	10 cm - floraison		Floraison - maturité	
	RR10	RR20	RR10	RR20
Observation SAFRAN 1976-2005	20/30a (1,3 j)	05/30a (0,2 j)	20/30a (1,4 j)	06/30a (0,3 j)
Modèle ALADIN-Climat (CNRM-2014)				
Scénario historique 1976-2005	22/30a (1,5 j)	07/30a (0,2 j)	19/30a (1,3 j)	05/30a (0,2 j)
Scénario RCP 4.5 2071-2100	21/30a (1,3 j)	06/30a (0,2 j)	23/30a (2 j)	06/30a (0,2 j)
Scénario RCP 8.5 2071-2100	17/30a (1,1 j)	06/30a (0,2 j)	20/30a (1,5 j)	07/30a (0,3 j)
Modèle WRF (IPSL-2014)				
Scénario historique 1976-2005	19/30a (1,1 j)	01/30a (0,003 j)	23/30a (1,6 j)	05/30a (0,2 j)
Scénario RCP 4.5 2071-2100	17/30a (0,9 j)	04/30a (0,1 j)	27/30a (2,6 j)	12/30a (0,6 j)
Scénario RCP 8.5 2071-2100	19/30a (0,9 j)	07/30a (0,3 j)	24/30a (2 j)	09/30a (0,4 j)

L'élévation de la température d'ici la fin du siècle engendrerait une réduction de la durée du cycle du lin fibre de printemps. Par conséquent, la maturité interviendrait avant la fin de l'été et la culture éviterait alors l'exposition au manque d'eau de cette période. Après un printemps plus sec et plus chaud, le lin ne cumulerait pas au cours de son cycle un déficit hydrique plus important qu'aujourd'hui. Toutefois, le cycle s'effectuerait dans un contexte globalement plus chaud et pourrait de ce fait rencontrer des vagues de chaleur alors même que l'alternance de fraîcheur et de chaleur est propice à l'étape de rouissage. La Normandie perdrait alors une des caractéristiques favorables à la culture du lin. Il convient toutefois de rester prudent face à ces évolutions, notamment en raison des incertitudes encore importantes concernant les précipitations : ainsi, les fortes pluies pourraient diminuer alors que les très fortes pluies, elles, augmenteraient légèrement (risque de verse accru).

En se plaçant dans l'hypothèse actuellement la plus réaliste de réalisation du scénario RCP 8.5, en effectuant plusieurs expériences de calculs pour différentes dates de semis, ces semis devraient être avancés d'environ trois semaines pour maintenir des températures équivalentes à la période de référence pendant toute la durée du cycle. Néanmoins, dans ce cas, il conviendra de vérifier que les conditions climatiques et agronomiques en début de cycle soient favorables (jours disponibles pour le semis, modification du calendrier agricole, engorgement en eau des sols en sortie d'hiver, risque

de gelées tardives...). D'autres leviers existent, à savoir, la recherche de nouveaux idéo-types de lin, adaptés aux stress climatiques identifiés, ce qui peut passer par la sélection variétale. Si le lin de printemps n'est pas adapté à cette nouvelle donne climatique, le lin d'hiver pourrait garantir les débouchés actuels et sa culture bien qu'encore confidentielle, s'étend de plus en plus dans les secteurs géographiques les plus exposés au stress hydrique au printemps (Arvalis, site internet). Il est en effet expérimenté dans les espaces où les effets du changement climatique se font déjà ressentir, à l'intérieur des terres notamment. La culture des variétés d'hiver devra faire l'objet de la même analyse que la présente étude. Ces investigations apparaissent nécessaires à l'heure où la filière agro-industrielle engage une relocalisation des usines de seconde transformation (tissage) à proximité du bassin de production¹³⁷.

¹³⁷ Il existe déjà en France une usine de filature de lin, implantée en Alsace : Le Parisien, « La seule filature de lin française se trouve en Alsace », M. Antoine, le 30/01/2020. Deux autres sont actuellement en projet : Ouest France, « Avec le lin, les agriculteurs touchent le jackpot », G. Le Du, 11/01/20 ; France Info, « Des t-shirts en lin bio bientôt fabriqués en Normandie », Lemaire S, le 22/04/2020.

Conclusion du chapitre 8

L'ensemble des sites français étudiés seraient concernés par une évolution des conditions biopédoclimatiques du blé tendre d'hiver. À terme et dans le cas du scénario le plus chaud, les récoltes pourraient avoir lieu en première partie du mois de juin dans la moitié sud et au cours de la seconde partie de ce mois pour la moitié nord. Les évolutions constatées pour la Normandie se retrouvent à l'échelle française. Cette information est essentielle pour les sélectionneurs afin de concentrer les efforts de recherche sur des variétés plus tolérantes aux stress identifiés. L'anticipation des stades révèle un évitement des sécheresses estivales pour tous les sites. Elle permettrait également de contrer les jours d'échaudage thermique du mois de juillet. Néanmoins, cet aléa devrait tout de même augmenter. Dans ces circonstances, c'est la Plaine de Caen qui serait la plus épargnée tandis que les régions agricoles les plus au sud et à l'est serait défavorisées, ce qui affecterait le remplissage des grains. La montaison ayant lieu plus tôt dans la saison, elle serait soumise à un risque de déficit de rayonnement et d'une réduction du quotient photothermique. Le risque de basses températures à la méiose serait quant à lui plus important. Ces aléas qui touchent le nombre de grains/m² et la fertilité de la plante concerneraient l'ensemble des sites. Enfin, les hivers plus doux engendreraient une diminution drastique du nombre de jours de vernalisation et la Plaine de Caen serait la plus désavantagée au même titre que Niort et Auch. Par conséquent, dans le cas de variétés plus alternatives, la Plaine de Caen ne serait pas plus affectée par le changement climatique que les autres régions céréalières françaises. Bien que le changement climatique engendrerait des conséquences sur les productions de blé caennaises, la vulnérabilité à l'échaudage thermique étant moins importante que dans les autres plaines agricoles, la Plaine de Caen pourrait bénéficier de conditions moins désavantageuses. Par ailleurs, l'usage de variétés plus tardives dans cette région permet d'obtenir de meilleurs rendements tandis que la moitié sud de la France a déjà recours à des variétés précoces. Cette marge de manœuvre plus grande en Normandie s'exprime aussi pour la date de semis. Admettons que l'on constate à l'avenir que le manque de rayonnement et l'exposition aux basses températures soient plus impactant que les chaleurs estivales, l'agriculteur pourrait décider de retarder ses dates de semis pour que la montaison s'effectue plus tard dans la saison. Le blé rencontrerait davantage d'échaudage thermique, autant que pour les autres sites, mais avec des conditions à la montaison plus favorable. Les autres régions agricoles françaises ne pourront probablement pas mobiliser cette alternative puisque que dans le cas de semis trop tardifs le nombre de jours d'échaudage thermique exploserait. Dans l'hypothèse d'une poursuite du modèle économique actuel, où la moitié des productions nationales sont exportées dans le monde, il conviendrait de réaliser cette même étude à l'échelle mondiale afin d'estimer si la France, comparativement aux autres grandes plaines céréalières des grands producteurs mondiaux, bénéficierait de conditions bioclimatiques plus avantageuses.

Les résultats sur le lin fibre de printemps montrent que les évolutions climatiques pour les régions céréalières doivent également intégrer des études sur l'ensemble des cultures participant aux rotations culturales et permettant de ce fait la viabilité de ces agrosystèmes, tant du côté agronomique (évitement de la monoculture) qu'économique (diversification des débouchés). Cette culture de printemps serait également exposée à une réduction de la durée du cycle, ce qui lui permet également d'éviter les sécheresses estivales. Néanmoins, le nombre de jours de chaleur sur cette saison serait en augmentation ce qui engendrerait un déficit de croissance et des fibres creuses. Il conviendra également de rester vigilant au risque de verse occasionné par les fortes pluies. Pour

s'adapter, de nouveaux idéo-types de lin devront être recherchés ou bien la culture du lin d'hiver pourrait être étendue. Par ailleurs, les descentes d'échelles pourraient être mobilisées afin d'estimer si la stricte bordure littorale serait épargnée par les jours de chaleur ce qui permettrait très localement de conserver la faisabilité du lin de printemps tel qu'il est cultivé actuellement. Enfin, ce travail devra être produit pour les autres cultures de l'agrosystème. D'ailleurs, d'autres plantes sont actuellement en cours d'expérimentation dans le Calvados. Il s'agit du chanvre, qui renforce le débouché textile des liniculteurs et qui d'ailleurs s'appuiera sur les techniques de teillage utilisées pour le lin. C'est une façon rationnelle de remplacer les betteraves après la fermeture de la sucrerie de Cagny¹³⁸. Le soja est actuellement essayé par un agriculteur du Bessin dans le but de produire des tourteaux pour l'alimentation animale¹³⁹. Un exploitant dans la Plaine de Falaise produit quant à lui depuis 2020 des lentilles et du quinoa, commercialisés en circuit semi-direct pour l'alimentation humaine¹⁴⁰.

Plus largement, ces études phénoclimatiques pourraient être étendues pour l'ensemble des cultures actuelles de la Plaine de Caen et envisagées pour le futur. Pour témoigner de la vulnérabilité des autres productions végétales, prenons l'exemple du colza dont la floraison est vulnérable aux gelées printanières lorsque les températures hivernales sont douces et engendrent l'anticipation de ce stade. En avril 2021, ce stade a rencontré 7 jours de gelées et une averse de grêle qui ont pu engendrer des pertes de productions (**Figure 216**).

¹³⁸ Ouest-France, « Du chanvre normand pour fabriquer des jeans », le 3 septembre 2021, Guillaume Le Du.

¹³⁹ La Renaissance le Bessin, « Protéines : le soja 'made in Normandie' prend son essor près de Bayeux », le 31 janvier 2021 https://actu.fr/normandie/ryes_14552/proteines-le-soja-made-in-normandie-prend-son-essor-pres-de-bayeux_39076222.html.

¹⁴⁰ Ouest-France, « Damien Pluet produit des lentilles made in Normandie », le 21 août 2021, Yannick Foustoul.

Figure 216 : Photographies post averses de grêle et gelées pour une parcelle de colza en Plaine de Caen le 7 avril 2021



Parcelle de colza suite à une averse de grêle (et deuxième journée consécutive de gelée : $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ le 6 avril et $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ le 7 avril) ; dégâts sur les fleurs et absence de boutons floraux.

Photographies : François Beauvais., le 07 avril 2021 à Saint-Manvieu-Norrey

Conclusion de la partie 3

A l'échelle régionale, la Plaine de Caen constitue un « Pays climatique » qui pourrait être considéré comme une entité au climat homogène. D'ailleurs, le recours aux données du modèle SAFRAN participent à ce constat puisque la résolution de 8x8 km des mailles engendre une simplification de la topographie. C'est de cette façon que nous l'avons abordée dans la partie 2, avec une approche stationnelle des analyses agroclimatiques et phénoclimatiques, ce qui ne remet pas en cause les résultats puisqu'il s'agissait surtout de s'intéresser à l'évolution des moyennes et de la variabilité des indicateurs. Pourtant, une diversité du climat est observée en Plaine de Caen. L'analyse comparée des données des 5 stations Météo-France montre sur la période 2002-2021 que les conditions se continentalisent à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Cette continentalisation peut d'ailleurs être accentuée par des effets d'abris. Les hivers sont plus froids à l'intérieur des terres, avec davantage de jours de gelées, tandis que la fin du printemps et l'été sont plus chauds, ce qui se matérialise par davantage de jours où la température maximale dépasse 25 °C. La vulnérabilité du blé tendre aux gels d'épis ainsi qu'aux basses températures est plus importante à l'intérieur des terres que sur le littoral. C'est également le cas pour le risque d'échaudage thermique, ce qui explique pourquoi les exploitants agricoles sèment surtout des variétés précoces dans le sud de la Plaine. Ces différences de température engendrent une inégale durée des périodes phénologiques. La douceur des températures hivernales en bord de mer favorise un développement plus rapide du blé qu'à l'intérieur des terres. Pour une même date de semis, le stade épi 1 cm arrive plus tôt dans l'année à mesure que l'on se rapproche de la mer. Cependant, à l'intérieur de terres, un rattrapage s'opère au printemps et en début d'été, où la température cette fois-ci plus élevée qu'en partie littorale, engendre une deuxième partie de cycle plus courte. Des mesures de terrain montrent également que la diversité des températures s'observe également à l'échelle de petites plaines agricoles par effets d'abris liés à la topographie ou à l'occupation du sol. La vulnérabilité aux excès de températures ou aux gelées peut donc être différentielle en quelques hectomètres et au sein même d'une parcelle. Ces éléments sont à prendre en compte dans le choix des assolements et d'autant plus dans une perspective de changement climatique ou de nouvelles productions végétales pourraient être introduites dans les rotations culturales. Enfin, le suivi des conditions météorologiques rencontrées *in situ* pendant le cycle du blé permet d'émettre de se rendre de compte de la complexité du système et que de multiples facteurs entrent en compte dans l'élaboration du rendement.

Par ailleurs, l'avenir de blé en Normandie s'appréhende également aux échelles supérieures. L'agrosystème de la Plaine de Caen est intégré à l'agrosystème céréalier français. En mobilisant l'approche phénoclimatiques pour les autres grandes plaines céréalières françaises, on constate que les évolutions sont similaires à celles observées en Plaine de Caen. L'élévation de la température engendre l'avancée des stades phénologiques. L'avancée de la maturité permettrait de contrer la sécheresse estivale. Une partie des jours d'échaudage thermique est également évitée, même si cet aléa devrait tout de même augmenter en raison de jours de chaleurs plus nombreux au printemps. La montaison débiterait plus tôt dans l'année, ce qui engendrerait une réduction du quotient photothermique. Pour cette même raison la méiose serait davantage exposée aux basses températures. La Plaine de Caen se démarque des autres sites surtout pour l'échaudage thermique

auquel le blé tendre d'hiver y serait moins vulnérable. Toutefois, la céréaliculture normande pourrait tirer son épingle du jeu à condition de recourir à des variétés plus alternatives en raison de la réduction drastique du nombre de jours disponibles pour la vernalisation. Nous pouvons alors supposer que la région Normandie devrait toujours compter dans le grenier à blé français des prochaines décennies.

Si le blé tendre est la culture principale dans l'assolement de la Plaine de Caen, la viabilité de l'agrosystème repose également sur d'autres productions végétales qui ont un rôle essentiel dans les rotations culturales et les débouchés économiques. Le lin fibre de printemps, constitue par exemple une tête d'assolement et la Normandie est d'ailleurs la première région productrice de fibres issues de cette plante dans le monde. Une étude bioclimatique semble alors importante pour déterminer les risques climatiques auxquels cette culture pourrait faire face dans les prochaines décennies, ce qui apparaît d'autant plus nécessaire que la filière agricole a engagé une relocalisation de la seconde transformation autour du bassin de production. L'approche phénoclimatique est alors mobilisée pour cette production végétale. Il en ressort que le lin pourrait éviter les sécheresses estivales grâce à une anticipation des stades liée à l'élévation de la température. Pour autant, cette avancée des périodes phénologiques dans le calendrier ne permet pas de contrer l'augmentation des jours de chaleur au printemps qui sont susceptibles de provoquer des fibres creuses et donc inexploitable pour l'industrie textile. Par ailleurs, les linculteurs devront rester vigilant face au risque de fortes pluies pouvant engendrer la verse physiologique du lin. Ce travail montre l'intérêt de dupliquer les études phénoclimatiques à l'ensemble des cultures présentes en Plaine de Caen afin de fournir à la filière agricole des connaissances afin d'adapter l'ensemble de l'agrosystème au changement climatique. C'est également dans ce but que des recherches similaires pourraient être entreprises pour déterminer la faisabilité de nouvelles cultures aux horizons 2050 et 2100.

Conclusion générale et perspectives

Rappel du cadre de l'étude

Ce travail de thèse de doctorat en géographie et en agroclimatologie, au carrefour entre la modélisation du climat et de l'agronomie, s'est intéressé aux conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre en Plaine de Caen, représentative de la céréaliculture normande.

Cette recherche s'inscrit dans un **contexte de changement climatique aux répercussions environnementales et sociétales multiscales**. À l'échelle mondiale, l'agriculture confrontée aux injonctions environnementales doit répondre à une demande alimentaire croissante en s'adaptant au changement climatique dont les effets, déjà connus comme la stagnation des rendements céréaliers, affectent plusieurs régions du globe. À l'échelle nationale, la demande céréalière intérieure et l'exportation des grains participent à l'économie agricole, de même qu'à la stabilité politique des pays importateurs. À l'échelle régionale, la filière assure la spécialisation des régions agricoles et la viabilité des systèmes d'exploitation.

Pour répondre à ces enjeux, **le secteur agricole a besoin de connaissances afin d'anticiper les conséquences du changement climatique**. Face à un état de l'art sur la céréaliculture normande lacunaire, ce travail de thèse centré sur la production de blé tendre s'est imposé.

Pour mener la recherche, les données météorologiques des stations Météo-France de la Plaine de Caen et du modèle SAFRAN sont mobilisées, ainsi que les projections climatiques extraites du modèle régional ALADIN-Climat d'une résolution de 8 x 8 km pour 3 scénarios RCP. Les traitements de données sont effectués sur la période historique 1961-2020 et future (2021-2050 et 2071-2100). Pour déterminer les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre, la méthode repose sur des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques pour lesquels l'évolution ou le dépassement de seuils font échos à des pertes de production. Des relevés de terrain en pédologie sont effectués pour estimer les capacités de rétention en eau des sols de l'espace d'étude. Une enquête de terrain est également menée auprès des exploitants agricoles et techniciens « productions végétales ». Enfin, des mesures de terrain exploratoires mettent en lumière la diversité des conditions météorologiques dans la plaine.

Principaux résultats

- **L'adaptation de la céréaliculture aux conditions locales de la Plaine de Caen**

L'enquête auprès des exploitants agricoles et des techniciens productions végétales montre que **la céréaliculture est adaptée au climat et aux sols de la Plaine de Caen**. Le nord de la plaine agricole est principalement doté de sols épais, limoneux et sans charge en éléments grossiers, garantissant un réservoir utile maximum (RUM) supérieur à 200 mm d'eau. La céréaliculture de la partie méridionale doit en revanche composer avec des sols squelettiques et caillouteux dont le RUM est d'environ 30 mm. En conséquence, l'exposition aux sécheresses est inégale entre ces deux

secteurs. Le blé cultivé au sud de la Plaine est dépendant de précipitations régulières de printemps et d'été (montaison et remplissage des grains) au vu des faibles réserves en eau des sols. Au nord, la céréale peut mobiliser l'eau accumulée dans le sol pour compenser le déficit pluvial et répondre à la demande évapotranspiratoire. **L'adaptation aux conditions locales passe notamment par le recours à des variétés précoces au sud de la Plaine agricole**, afin d'avancer les moissons et éviter une partie de la sécheresse estivale, très pénalisante lorsqu'elle est associée à des jours d'échaudage thermique. En revanche, la partie nord est favorable à la faisabilité de variétés tardives dont la productivité est supérieure. Au final, **en raison de conditions locales spécifiques, une différence d'environ 30 q/ha est observée entre la production des parties nord et sud de la plaine agricole**. Comme l'ont montré les enquêtes auprès des exploitants, d'autres leviers existent comme l'irrigation qui reste marginale en raison du coût, du temps de travail nécessaire et de l'interdiction de nouveaux forages de prélèvement d'eaux souterraines. D'autres exploitants pratiquent le non labour et l'apport de matière organique afin d'améliorer la rétention en eau des sols. Enfin, les agriculteurs portent une attention particulière aux conditions météorologiques qui déterminent l'organisation des interventions (semis, récoltes, fertilisation azotée et produits phytosanitaires) au cours de l'itinéraire cultural du blé tendre d'hiver.

- **L'absence d'adaptation au changement climatique pour les céréaliers enquêtés**

Une enquête réalisée en 2016 auprès de céréaliers a montré qu'une majorité d'entre eux a **constaté des modifications liées à leur activité dont certaines peuvent être rattachées au changement climatique**. Les constats empiriques inventoriés ci-dessous ont été confirmés par les techniciens « productions végétales » supervisant chacun environ 80 exploitations :

- élévation des températures hivernales : prédisposition aux maladies et accélération des cycles végétatifs (risque de gel d'épis pour les variétés précoces) ;
- avancée de la date de récolte du blé tendre d'hiver¹⁴¹ (environ -10 jours en 20 ans pour une variété de même précocité) ;
- augmentation des jours de pluie en été : perturbation des travaux de récoltes ;
- précipitations moins régulières (ne constatent pas d'augmentation du déficit hydrique) ;
- recul de la culture du pois dans l'assolement car elle ne devenait plus rentable ;
- hausse de l'échaudage thermique (pour un seul exploitant).

Le changement climatique ne constitue pas une inquiétude pour les céréaliers enquêtés. De ce fait, ils n'ont pas entamé d'adaptation, probablement parce les évolutions observées ne remettent pas en cause les hauts niveaux de productivité. On peut toutefois légitimement s'interroger sur l'existence d'une adaptation indirecte par l'introduction régulière de nouvelles variétés, c'est-à-dire via la recherche et le développement des semenciers. Dans le Calvados et en Normandie, selon le constat des structures agricoles (Chambres d'agricultures, syndicats agricoles et région) rencontrées lors de communications des résultats de thèse dans le cadre du GIEC Normand (2020-2021), **l'adaptation ne semble pas encore envisagée concrètement**. Pour

¹⁴¹ Certains agriculteurs répondent tout de même avec prudence quant au fait que ces évolutions puissent être liées au changement climatique. L'avancée des dates de semis et l'introduction régulière de nouvelles variétés pourraient biaiser le signal. À ces facteurs s'ajoute la variabilité interannuelle qui peut rendre difficile la prise de recul pour estimer une avancée des dates de récoltes.

autant, ces organismes sont en demande de connaissances sur les conséquences attendues du changement climatique. Cette prise de conscience émane aussi des céréaliers eux-mêmes : un exploitant du sud de la Plaine de Caen, déjà rencontré en 2016, témoigne en 2020 de son inquiétude, comme de nombreux exploitants de son secteur. Un constat confirmé par le conseil d'administration de la FDSEA en 2021 qui relaie l'attente de solutions exprimée par les adhérents. Toutefois, dans l'hypothèse d'une dégradation des conditions biopédoclimatiques et d'une augmentation de la température, **les agriculteurs disent se tourner vers la recherche agronomique permettant de trouver des variétés adaptées au climat futur de la Plaine de Caen**. Ils proposent également d'autres leviers tels que l'irrigation, de nouvelles pratiques agricoles et la modification de l'assolement.

- **Quelles conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre**

Déterminer les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre a mobilisé deux techniques d'analyses. La première repose sur des indicateurs agroclimatiques, calculés sur des dates invariantes entre lesquelles les périodes phénologiques sont susceptibles de se dérouler. La seconde est fondée sur des indicateurs phénoclimatiques, calculés sur les phases phénologiques dont les dates ont préalablement été déterminées en fonction des besoins en chaleur, de la photopériode et de la vernalisation de la plante.

- Constat des évolutions sur la période historique

Le recours aux indicateurs agroclimatiques sur la période historique, en comparant les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020, expose une augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique de 6 jours entre le 1^{er} mai et le 31 juillet. **Le déficit hydrique a augmenté**, passant de 41 à 58 mm en partie nord de la Plaine et de 104 à 134 mm en partie sud (calculé avec l'ETP Penman). **Les fortes températures, supérieures à 30 °C** en juin (floraison), sont **rares mais en augmentation**.

Les résultats issus de l'approche par indicateurs phénoclimatiques sont différents. La simulation de la phénologie montre, pour une date de semis inchangée, que **la maturité physiologique a lieu deux semaines plus tôt** en raison de l'élévation de la température. Le cycle végétatif du blé se terminant plus tôt, ceci **limite la hausse de l'échaudage thermique à + 3 jours**. L'anticipation des stades permet également de **stabiliser le déficit hydrique** à 60 et 140 mm, respectivement pour le nord et le sud de la Plaine de Caen.

Quelles que soient les approches, une légère augmentation du rayonnement solaire cumulé lors de la montaison et du remplissage des grains participe à une amélioration du quotient photothermique. Cette énergie supplémentaire peut favoriser le nombre de grains par épis si la demande en eau de la plante est satisfaite. Il n'y a pas de tendance à la hausse ou à la baisse des autres aléas, qui peuvent toujours survenir fréquemment tels que les excès d'eau (précipitations et surplus hydrologiques) en automne, retardant les semis ou engendrant une mauvaise implantation du blé, ou plus rarement tels que les gelées à la levée, au cours du tallage ainsi que les basses températures à la méiose.

À la lecture des évolutions phénoclimatiques, nous supposons que **la stagnation des rendements** observée en Normandie depuis les années 1990 est principalement liée à **l'augmentation des jours d'échaudage thermique** lors de la formation et du remplissage des grains.

- Evolutions attendues sur la période future

Les mêmes techniques d'analyses ont été mobilisées pour la période future. Par souci de synthèse, cette conclusion se concentre sur les évolutions à long terme (2071-2100) comparées à la période de référence (1976-2005).

C'est avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5 que les évolutions apparaissent les plus défavorables. Le blé en Plaine de Caen rencontrerait respectivement 17 et 30 jours d'échaudage thermique contre 8 jours en période de référence entre le 1^{er} mai et le 31 juillet. Ce qui retient surtout l'attention, c'est qu'**à long terme, l'année moyenne connaîtrait un nombre de jours d'échaudage thermique largement supérieur au cumul observé lors des années extrêmes de la période actuelle** (24 jours en 2006 et en 2018). L'occurrence de températures extrêmes, supérieures à 30 °C durant les mois de mai et de juin, bien que rares, serait en hausse. En plaine septentrionale, le déficit hydrique atteindrait 90 et 110 mm avec ces deux scénarios contre 40 mm en période de référence entre le 1^{er} avril et le 31 juillet. En plaine méridionale, ces valeurs atteindraient 155, 180 et 220 mm contre 110 mm en période de référence (calculé avec l'ETP Turc). Selon **le scénario le plus pessimiste, 1 année sur 4 connaîtrait un déficit hydrique supérieur à celui de la grande sécheresse de 1976. L'augmentation serait telle, que le manque d'eau calculé pour le nord de la plaine deviendrait équivalent à celui observé actuellement au sud.** Par ailleurs, on assisterait à une augmentation du rayonnement solaire de 12 et 14 % entre le 1^{er} avril et le 31 juillet. Le risque associé aux températures négatives au seuil de -10 °C en hiver (tallage) ne devrait plus survenir, tout comme les basses températures au mois de mai (méiose). Les gelées au seuil de - 5 °C pourraient encore apparaître avec le scénario RCP 4.5. Le nombre de jours de vernalisation entre le 1^{er} décembre et le 31 mars chuterait à 67 et 59 jours pour les deux scénarios contre 77 jours en période de référence. Enfin, les conditions agroclimatiques pour les semis en automne et en été seraient plus favorables aux travaux de semis et de récoltes. Dans le cas de la réalisation du scénario RCP 2.6, ces évolutions sont plus modérées. 12 jours d'échaudage thermique sont simulés. Le déficit hydrique atteindrait 70 et 110 mm, respectivement pour les parties nord et sud de la Plaine. Le rayonnement solaire entre le 1^{er} avril et le 31 juillet serait en hausse de + 11 %. Pour les autres indicateurs agroclimatiques les conditions resteraient globalement inchangées.

Les résultats issus de l'analyse phénoclimatique diffèrent là-aussi. **D'ici la fin du siècle, la durée du cycle pourrait être réduite de 3 à 5 semaines selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 par rapport à la période de référence 1976-2005.** La maturité physiologique interviendrait respectivement le 2 juillet et le 23 juin pour les deux scénarios. Les récoltes auraient alors lieu au début du mois de juillet alors qu'elles se déroulent autour du 10 août en période de référence. **Cette anticipation des stades permet à la fin du cycle de ne plus chevaucher les jours de chaleur et les sécheresses de la période estivale.** Le nombre de jours d'échaudage thermique lors du remplissage des grains reste équivalent à la période de référence pour le scénario RCP 4.5 et serait contenu à +3 jours pour le scénario RCP 8.5. Cette avancée des phases phénologiques dans le calendrier permettrait même **une réduction du déficit hydrique cumulé.** À titre d'exemple, il

passerait de 130 mm à 108 et 87 mm pour un petit sol entre la période de référence et la période 2071-2100 pour les deux scénarios. Le confort hydrique de la plante s'en trouve alors amélioré. Néanmoins, cette amélioration du contexte biopédoclimatique ne permet pas de compenser totalement les pertes en production liées à l'augmentation des jours de chaleur puisqu'elles pourraient être de - 3 q/ha.

Cette avancée des stades dans le calendrier pourrait révéler l'exposition à de nouveaux aléas jusqu'à présent ignorés. La montaison débiterait plus tôt, en sortie d'hiver, soit à un moment de l'année où la durée du jour est plus courte. Avec les scénarios RCP 4.5 et 8.5, cela occasionnerait **une réduction du rayonnement solaire cumulé** de -18 % et de -27 %. Avec le scénario le plus pessimiste, presque toutes les années composant la Normale climatique 2071-2100 auraient un cumul qui correspondrait aux années déficitaires en période de référence. La température moyenne sur les périodes phénologiques caractéristiques de la montaison resterait équivalente à la période de référence en raison de l'avancée des stades. Par conséquent, si la température n'est pas plus élevée et le rayonnement solaire cumulé est plus faible, **le quotient photothermique baisse également.** La méiose aurait lieu un mois plus tôt, c'est-à-dire à la fin du mois d'avril. Elle serait **davantage exposée aux basses températures.** L'occurrence d'au moins une journée où la température minimale est inférieure ou égale à 4 °C passerait de 3 à 8 années sur 30 sur la période proche méiose. Ce risque pourrait être plus important dans le cas de semis précoces et d'une intolérance à la photopériode. Enfin, indépendamment du raccourcissement du cycle, l'élévation des températures hivernales engendrerait **une réduction du nombre de jours de vernalisation.** Ces scénarios RCP 4.5 et 8.5 ne permettraient plus la faisabilité des variétés « hiver » voire « ½ hiver ». Les risques associés aux gelées seraient quant à eux réduits tandis que les excès d'eau en surface du sol au cours du cycle pourraient toujours survenir. Des conséquences sont donc attendues sur plusieurs stades de croissance du végétal : le nombre de grains/épi, la fertilité des épis, la formation et le remplissage des grains.

Pour le scénario RCP 2.6 visant la réduction des gaz à effets de serre à l'horizon 2100 (forçage de 2,6 W/m² contre 3,2 W/m² en 2020), les changements climatiques envisagés sont limités. Cependant, la faible élévation de la température n'engendrerait pas une anticipation phénologique suffisante pour contrer la légère hausse du déficit hydrique. Sur ce paramètre, le scénario « optimiste » apparaît donc paradoxalement plus défavorable, alors même qu'il simule les sécheresses estivales les moins prononcées.

Les résultats issus des deux techniques d'analyse présentent des différences. Les indicateurs agroclimatiques ont le mérite d'être plus simples à utiliser et de présenter l'évolution du contexte climatique. Mais sans tenir compte de l'évolution de la phénologie, l'étude d'impact peut être erronée et peut biaiser les connaissances sur lesquelles l'adaptation pourra se fonder. **Nous confirmons l'intérêt du recours à des indicateurs phénoclimatiques** pour approcher au plus près les conditions vécues par la plante et mettre en évidence l'évitement ou le chevauchement de phases sensibles du cycle avec des conditions météorologiques défavorables. Cette approche est facilement mobilisable et transposable à une autre culture ou un autre territoire.

- **L'approche multiscalaire pour l'étude bioclimatique des agrosystèmes**

À l'échelle régionale, la Plaine de Caen est considérée comme une entité climatique homogène. Pour autant, à échelles plus fines on constate qu'elle est caractérisée par une diversité spatiale des conditions climatiques en raison de l'éloignement à la mer et de la topographie.

L'analyse comparée des 5 stations Météo-France de cette région agricole expose **une dégradation du climat océanique à mesure que l'on avance dans les terres, avec parfois des effets d'abri renforçant la continentalisation**. Les jours de gel et de chaleur sont plus nombreux à mesure que l'on s'éloigne de l'océan, conséquence d'hivers plus froids à l'intérieur des terres qu'en bord de mer où, à l'inverse, les étés sont plus frais. **Ces différences de températures expliquent des durées de périodes phénologiques inégales entre la bordure maritime et l'arrière-pays**. En début de printemps, la phénologie est plus avancée à mesure que l'on se rapproche de l'océan. La deuxième partie du cycle est en revanche plus courte dans les terres, ce qui permet un rattrapage. **La vulnérabilité du blé tendre d'hiver à l'échaudage thermique est plus forte dans l'arrière-pays qu'en bordure littorale et il en va de même pour le risque de gel d'épis (cas de semis précoces) ou de basses températures à la méiose**. Ces différences de températures ne sont pas perceptibles avec **la résolution de la maille SAFRAN de 8 x 8 km simplifiant l'environnement qui caractérise la Plaine de Caen**, constat qui plaide en la faveur des études proposant des descentes d'échelles.

Par ailleurs, pour essayer d'apprécier les contrastes de température dans la plaine, parfois constatés en des points éloignés de quelques hectomètres, nous avons réalisé des relevés de terrain exploratoires. Ces mesures prouvent que **la topographie et l'occupation du sol peuvent engendrer des effets d'abri à échelle très fine** et de ce fait expliquer des écarts de températures de plusieurs dixièmes de degrés ou de quelques degrés. Dans ce cas, des seuils de températures pour lesquels des conséquences sur la plante sont connus peuvent être franchis dans certaines parcelles et pas dans d'autres. Aussi, l'intensité différentielle du dépassement du seuil dans l'espace peut expliquer des dégâts plus ou moins importants et des pertes de rendements. Ces différences peuvent s'observer au sein même d'une parcelle agricole avec l'effet parfois combiné de petits versants et de haies engendrant une « continentalisation ». Des relevés nocturnes en situation gélive réalisés dans une vallée en bordure de la Plaine de Caen montrent également des différences possibles de quelques degrés. Les résultats obtenus sont parfois inattendus par rapport au schéma classique de formation des inversions nocturnes de température, en raison des effets sur l'écoulement et de la stagnation de l'air froid imposés par la morphologie et l'occupation du sol à échelle très fine (haies, talus de route, etc.) Ces diagnostics thermiques restent donc à préciser (protocole de relevés en itinérance, installation de loggers fixes en complément) et semblent essentiels puisque les modèles régionaux ne permettent pas de descendre à ces échelles spatiales et temporelles fines. **Le but étant, à terme, d'identifier et de cartographier la vulnérabilité des cultures dans certaines parcelles pour mener une réflexion sur l'assolement**.

- **La transposabilité du travail de thèse à l'échelle française et pour d'autres cultures**

L'analyse phénoclimatique développée dans la Plaine de Caen est transposée à l'échelle française en retenant les régions agricoles représentatives de la céréaliculture du pays. Cette analyse permet

d'estimer *in fine* la rentabilité de la céréaliculture normande dans le contexte national. Pour tous les sites, les évolutions des indicateurs phénoclimatiques sont similaires à celles simulées en Plaine de Caen. Elles sont parfois davantage renforcées dans certaines plaines agricoles et les vulnérabilités initiales diffèrent. À titre d'exemple, l'échaudage thermique est plus important à Auch qu'à Caen et il devrait à terme être plus important sur le second site. Comparativement à l'ensemble des plaines céréalières, **la céréaliculture en Plaine de Caen pourrait profiter de conditions de fin de cycle plus avantageuses. Seulement, il conviendra de trouver des variétés alternatives – telles que celles semées dans le sud de la France – c'est-à-dire nécessitant moins de jours de vernalisation** et en restant vigilant au risque de froid à la méiose jusqu'à présent peu habituel dans cette région agricole. **Avec ces adaptations, la céréaliculture caennaise pourrait rester une des places fortes de la production française de blé.** Par ailleurs, les blés étant moins exposés aux aléas de fin de cycle, **le climat futur de la Normandie offre plus de flexibilité pour retarder les dates de semis**, levier difficilement accessible aux autres sites pour lesquels le nombre de jours d'échaudage thermique deviendrait trop conséquent.

En outre, **l'équilibre des agrosystèmes céréaliers repose également sur la culture d'autres productions végétales qui interviennent dans les rotations culturales et participent à la diversification des débouchés économiques des exploitations agricoles.** C'est le cas du lin de printemps, produit pour ses fibres à destination de l'industrie textile. Les résultats montrent que l'élévation de la température réduirait la durée du cycle. Cette anticipation de la maturité des fibres, d'environ trois semaines, permet au lin de cumuler moins de manque d'eau qu'en période de référence. Il s'agit là d'une même réponse à l'élévation de la température que le blé tendre d'hiver. Néanmoins, le printemps étant plus chaud, le lin serait confronté à une augmentation des jours d'échaudage thermique qui engendrent des fibres creuses, pouvant parfois être inexploitable par l'industrie textile. Enfin, les liniculteurs devront rester prudent quant à l'évolution des fortes pluies susceptibles d'engendrer la verse physiologique. Pour s'adapter, la filière a recours au lin d'hiver et devra engager des réflexions, sans quoi cette spécialisation pourrait disparaître de la Plaine de Caen. Dans cette hypothèse il conviendra de trouver une tête d'assolement de remplacement dans les rotations culturales.

Ces deux études greffées au projet de thèse exposent l'intérêt des modèles bioclimatiques et leur transposabilité à d'autres cultures et d'autres territoires.

Perspectives de recherches pour la mise en place de l'adaptation

Pour accompagner la filière dans l'adaptation au changement climatique et garantir la performance des agrosystèmes, la poursuite de ces travaux de recherches et la mise en perspective vers des approches pluridisciplinaires et plus globalisantes de la céréaliculture sont nécessaires.

- **Développer les mesures expérimentales**

Les mesures expérimentales de terrain doivent être poursuivies pour approfondir la connaissance des disparités climatiques à échelle fine au sein de l'agrosystème céréalier, particulièrement par temps clair et calme, propice à la différenciation du bilan d'énergie d'interface. Une attention plus

spéciale sera portée sur les seuils thermiques sensibles intervenant au cours du développement de la plante. Par ailleurs, le bilan hydrique est une simplification du système atmosphère-plante-sol et de ses interactions (Cantat et al., 2009). Pour préciser les conditions hydriques vécues par le blé tout au long de son cycle végétatif, il convient d'effectuer des relevés en continu de la teneur en eau dans le sol (par exemple à partir d'une sonde GROPOINT). L'évolution de la réserve utile disponible (RUD) calculée avec le bilan hydrique stationnel, comparée à celle déterminée à partir des mesures *in situ*, peut servir de référence pour caler un modèle d'eau disponible dans le sol plus étendu spatialement. Ensuite, une réflexion doit intégrer le principe d'un bilan hydrique en plusieurs réservoirs (Jacquart et Choisnel, 1995), utile dans le cas de la gestion d'une irrigation par exemple.

Depuis l'enquête exploratoire réalisée en 2016 auprès de céréaliers normands, la prise de conscience du changement climatique a énormément progressé au sein de la population et des agriculteurs. L'approche qualitative, menée auprès d'un échantillon plus important, permettrait de déterminer différents profils d'exploitants selon leur niveau d'inquiétude au changement climatique, de connaître les aléas rencontrés et les pertes de production associées, les évolutions constatées, les mesures d'adaptation déjà menées ou envisagées. Ces éléments abonderaient l'étude bioclimatique en redéfinissant certains indicateurs climatiques à partir du savoir des exploitants agricoles (Caplat, 2014). En fonction des déterminants sociaux (âge, niveau de revenus, sexe, ancienneté agricole), géographiques (localisation du siège d'exploitation, types de sols) et du vécu de la personne (aléas climatiques rencontrés et pertes économiques associées, sensibilité à la question du changement climatique, consultation des médias, etc.), qui agissent dans la perception et la représentation des conséquences du changement climatique, il conviendra de déterminer les capacités d'adaptation des céréaliers. Les céréaliers rencontrés en 2016 pourront de nouveau faire l'objet d'entretiens pour comparer les discours et apprécier les changements entre les deux dates.

En outre, des entretiens menés auprès des autres acteurs de l'agrosystème (sociétés de collecte et d'approvisionnement, semenciers, instituts techniques, chambres d'agriculture, services de l'état) sont à envisager pour apprécier leur rôle et leurs actions. De même, la parole des organismes de la filière agroalimentaire de transformation des produits agricoles et de commercialisation permettra de vérifier s'ils s'inquiètent du maintien des débouchés et envisagent des solutions dans le cas où ils ne pourraient pas être satisfaits. L'accès à ces connaissances empiriques permettrait de montrer l'existence ou non d'une coordination entre tous les acteurs en faveur d'une adaptation au changement climatique. Ils pourraient alors entrer également dans le processus de recherche-action.

- **Etendre l'analyse phénoclimatique à différentes précocités de blé et intégrer de nouveaux indicateurs**

Un travail identique à celui ayant été réalisé pourrait être effectué en calculant les indicateurs phénoclimatiques pour des variétés de différentes précocités (de très précoce à très tardif – annexe 19), afin de mettre en lumière une tendance globale de l'ensemble. Il permettrait de déterminer la combinaison précocité-photopériode-vernalisation la plus adaptée au climat du futur. Des simulations sur les dates de semis aideraient également à déterminer la plus optimale. Pour approfondir l'adéquation de la culture au climat du futur, il convient de retenir une méthode d'évaluation mettant en cohérence l'ensemble des indicateurs phénoclimatiques pour déterminer un indice global de faisabilité. Il pourrait s'agir de l'approche générique déjà développée dans les

publications d'Holzhammer et *al* (2011 et 2013), Caubel et *al* (2015) ou encore Garcia De Cortazar et Maury (2019). Ce travail, réalisé à l'échelle de la région Normandie nécessiterait une résolution plus fine que celle des mailles SAFRAN, sans quoi nous ne pourrions pas mettre en avant les disparités climatiques internes aux régions agricoles causées par des déterminants locaux tels que la topographie et l'occupation du sol. De nouveaux indicateurs pourront être mobilisés. Il s'agit notamment d'étendre le travail aux conditions climatiques pouvant favoriser le développement de maladies affectant les composantes d'élaboration du rendement¹⁴². Selon le même principe, il convient de recourir à des indicateurs relatifs aux conditions favorables aux ravageurs et adventices. Enfin, le climat agit également sur la qualité du blé tendre, élément important pour la commercialisation des productions. Par exemple, la teneur en protéines des grains est dépendante de l'absorption de l'azote issu de la fertilisation.

- **Mobiliser plusieurs modèles climatiques**

La modélisation prédictive du climat est soumise à des incertitudes (Stott et Kettleborough., 2002 ; Hawkins et Sutton, 2009 ; Hawkins et Sutton 2011 ; Guillemot, 2009 ; Yip et *al.*, 2011 ; Dobler *et al.*, 2012 ; Richard *et al.*, 2012 ; Hingray et Saïd, 2014 ; Northrop et Chandler., 2014). Pour consolider les premiers résultats présentés dans ce travail de thèse, nous envisageons de reproduire les simulations phénoclimatiques avec les données sorties d'autres modèles climatiques, notamment les simulations DRIAS-2020 regroupant 12 couples modèles globaux/modèles régionaux (Soubeyroux, 2021) et par la suite avec les simulations régionales forcées par les modèles globaux du projet CMIP-6 lorsqu'elles seront disponibles. Il conviendra de tenir compte du fait que les modèles simulant le mieux le climat sur la période de référence sont ceux qui projettent le réchauffement climatique le plus prononcé (Brown et Caldeira, 2017).

- **L'apport des recherches en écophysiologie et en agronomie**

Notre étude permet ici d'estimer les nouveaux potentiels climatiques pour la plante. Elle pourra être affinée en recourant à une approche agronomique, par l'intermédiaire d'un modèle de culture tel que STICS (Brisson *et al.*, 1998). Il serait notamment possible d'intégrer les mécanismes régissant la physiologie végétale, l'effet valorisant du CO₂ atmosphérique, les effets des aléas climatiques sur le cycle, pour *in fine* déterminer l'évolution du potentiel de rendement. Cependant, il convient de rappeler que les résultats produits avec les modèles de cultures ne sont pas sans incertitudes puisqu'ils sont fonction des paramétrages utilisés.

La recherche variétale permet de favoriser la sélection de blés tendres adaptés au changement climatique et à une agriculture respectueuse de l'environnement. La filière agricole peut **chercher de nouveaux idéaux-types** (Donald, 1968 ; Debaecke et *al.*, 2014 ; Semenov et Stratonovitch, 2015 ; Gouache *et al.*, 2017), **en adaptant la tolérance aux stress climatiques identifiés ou en modifiant la durée des périodes phénologiques afin d'éviter**

¹⁴² En France, les principales maladies du blé tendre sont : le piétin verse (*Oculimacula acufiformis* et *Oculimacula yallundae*), l'oïdium (*Blumeria graminis*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), la Septoriose (*Septoria tritici*) ou encore la fusariose de l'épi (*Fusarium* et *Microdochium*).

L'exposition à des fenêtres climatiques sensibles, en recourant notamment à des **variétés anciennes** (Goldringer et *al.*, 2012) ou à la **génétique**. Par ailleurs, la **mémorisation des évènements climatiques** médiées notamment par des **modifications épigénétiques transmissibles aux générations suivantes** « effet maternels », s'avère être une piste d'acclimatation à explorer (Gutterman, 2000 ; Springer, 2012 ; Lamke et Baurle, 2017 ; Bergcys et Dresseldhauss, 2018). Par là même, on peut pressentir tout l'intérêt du développement de la production de semences au champ (sur le même schéma que la production de semences paysannes, Goldringer et *al.*, 2012 ; Gervers et *al.*, 2019) qui, de fait, sont issues de plantes mères confrontées à ces stress récurrents favorisant l'acclimatation au cours d'un cycle voire transmissible à la génération suivante (Hatzig et *al.*, 2018).

Plus largement, le changement climatique pourrait être l'occasion d'engager des réflexions pour repenser la céréaliculture actuelle et s'inspirer de l'agroécologie (Dufumier, 2016). Des assolements et des rotations culturales diversifiés exposent moins les agrosystèmes aux maladies et aux ravageurs (réduction des produits phytosanitaires), participant de ce fait à une agriculture respectueuse de l'environnement. De nouvelles productions aux débouchés locaux, contribuant à une réduction des émissions de GES peuvent être introduites. Il s'agit notamment des légumineuses fourragères et alimentaires, afin de limiter l'importation de protéines végétales (soja par exemple) mais aussi parce qu'elles procurent une fertilisation azotée des sols, favorable à la culture suivante (Angus et *al.*, 2015 ; Guinet et *al.*, 2019). Il convient enfin de ne pas négliger l'agroforesterie, offrant également des services écosystémiques (microclimat, apports de minéraux et de matière organique, biodiversité) utiles à la productivité des cultures, permettant un revenu supplémentaire pour l'exploitant et améliorant le bilan carbone de l'agriculture (Dupraz et Liagre, 2011). Une vigilance devra toutefois être portée quant à la réduction de lumière liée à l'ombre des arbres, pouvant affecter la photosynthèse.

En définitive, nous avons vu que l'agrosystème normand s'intègre dans un agrosystème national. Compte-tenu des évolutions climatiques attendues pour les plaines céréalières françaises, **la plaine agricole de Caen devrait probablement rester une des places fortes de la céréaliculture française à condition qu'elle mette en place des stratégies d'adaptation**. L'agrosystème national s'intégrant également dans un agrosystème mondial, il convient également de prendre en compte les enjeux mondiaux de la céréaliculture. Dans l'optique d'une augmentation de la population mondiale à 10 milliards de personnes d'ici 2050, nous supposons que la demande en blé tendre pourrait rester importante alors même que les rendements stagnent dans plusieurs régions du globe. De ce fait, cet élément pourrait garantir la rentabilité des systèmes d'exploitation des plaines des grands pays producteurs, telle que la Plaine de Caen.

Bibliographie

- ABECASSIS J., BERGEZ J.-É., 2009, *Les filières céréalières : organisation et nouveaux défis*. Versailles, Editions Quae, 1 vol, 184 p.
- ABECASSIS J., ROUSSET M., 2012, "Quelles évolutions pour les filières céréalières ?", *Innovations Agronomiques*, Vol.19, 1-11.
- ABIS S., 2012, *Pour le futur de la Méditerranée : l'agriculture*. Paris, L'Harmattan, 152 p.
- ABIS S., BRUN M., 2021, *Le Déméter 2021*. IRIS éditions, 368 p
- ABIS S., 2015, *Géopolitique du blé : un produit vital pour la sécurité mondiale*. Paris, Éditions IRIS Armand Colin, 269 p.
- ACEVEDO E., SILVA P., SILVA H., 2002, *Wheat growth and physiology*. In Curtis B. C., Rajaram S., Gomez Macpherson H. (eds): *Bread wheat improvement and production*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy).
- AGRESTE NORMANDIE., 2020, *Consommation du foncier agricole, artificialisation des sols : quelle évolution de l'occupation des sols en Normandie entre 2008 et 2018 ?* DRAAF Normandie, 6 p.
- AGROPARISTECH., 2003, *Les céréales. Cours en ligne*. Département AGER, 86 p.
- AL MAJOU H., BRUAND A., DUVAL O., LE BAS C., VAUTIER A., 2008, "Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon", *Soil Use and Management*, Vol.24, N°4, 383-391.
- ALEMU Z. A., DIOHA M. O., 2020, "Climate change and trend analysis of temperature: the case of Addis Ababa, Ethiopia", *Environmental Systems Research*, Vol.9, N°1, 1-15.
- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D., SMITH M., 1998, "FAO Irrigation and drainage paper No. 56", *Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Vol.56, N°97, 300 p.
- AMAT J.-P., LE COEUR C., DORIZE L., GAUTIER E., 2008, *Éléments de géographie physique*. Rosny, Editions Bréal, 464 p.
- ANGUS J. F., KIRKEGAARD J. A., HUNT J. R., RYAN M. H., OHLANDER L., PEOPLES M. B., 2015, "Break crops and rotations for wheat", *Crop and pasture science*, Vol.66, N°6, 523-552.
- ANWAR M. R., O'LEARY G., MCNEIL D., HOSSAIN H., NELSON R., 2007, "Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia", *Field crops research*, Vol.104, N°1-3, 139-147.
- ARROUAYS D., JOLIVET C., BOULONNE L., BODINEAU G., SABY N., GROLLEAU E., 2002, "Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un réseau institutionnel de mesure de la qualité des sols (RMQS)", *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, Vol.88, N°5, 93-103.
- ARVALIS - INSTITUT DU VEGETAL., 2003, *Stades du blé - Institut technique des céréales et des fourrages - ARVALIS*. Editions ARVALIS, 68 p.
- ARVALIS - INSTITUT DU VEGETAL., 2013, "Teneur en protéines des blés : relever le double défi agronomique et économique", 6 p.
- ARVALIS - INSTITUT DU VEGETAL., 2017, "Blé tendre - Guide de culture", Editions ARVALIS , 176 p.
- ARVOR D., DUBREUIL V., MENDEZ P., MAGNI FERREIRA C., SIMÕES PENELLO MEIRELLES M., 2009, "Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso : l'exemple de Sorriso", *Confins - Revue franco-brésilienne de géographie*, n°6, 20 p.
- ASSENS S., EWERT F., MARTRE P., RÖTTER R. P., LOBELL D. B., CAMMARANO D., ET AL., 2015, "Rising temperatures reduce global wheat production", *Nature climate change*, Vol.5, N°2, 143-147.
- ASSENS S., EWERT F., ROSENZWEIG C., JONES J. W., HATFIELD J. L., RUANE A. C., ET AL., 2013, "Uncertainty in simulating wheat yields under climate change", *Nature climate change*, Vol.3, N°9, 827-832.
- BAILEY H., HUBBARD A., KLEIN E. S., MUSTONEN K.-R., AKERS P. D., MARTTILA H., ET AL., 2021, "Arctic sea-ice

- loss fuels extreme European snowfall", *Nature Geoscience*, Vol.14, N°5, 283-288.
- BAIZE D., 2000, Guide des analyses en pédologie. Versailles, Quae, 257 p.
- BAIZE D., GIRARD M.-C., 2008, *Référentiel pédologique 2008*. Versailles, Éditions Quae, 405 p.
- BAIZE D., JABIOL B., 2011, *Guide pour la description des sols*, Paris, Editions INRA, 375 p.
- BANCAL M. O., GATE P., 2010. "Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts". In BRISSON N., LEVRAULT F., [Dir.]. 2010 : *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulation d'impact sur les principales espèces*, Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010), ADEME, 155-168.
- BASARIR A., ARMAN H., HUSSEIN S., MURAD A., ALDAHAN A., AL-ABRI M. A., 2017, "Trend detection in annual temperature and precipitation using Mann–Kendall test—a case study to assess climate change in Abu Dhabi, United Arab Emirates", in: *International Sustainable Buildings Symposium*. Springer, 3-12
- BARBEAU G., NEETHLING E., OLLAT N., QUENOL H., TOUZARD JM., 2015, "Adaptation au changement climatique en agronomie viticole", *Agronomie, Environnement et Sociétés*, Vol 5, n°1, 67-75.
- BEAUBAIS F., 2016, *Changement climatique et agriculture : quelles vulnérabilités et représentations d'un élément de forçage des agrosystèmes ? L'exemple de la Plaine de Caen dans ses dimensions écologiques et anthropiques*. Mémoire de Master 1, Université de Caen, 252 p.
- BEAUBAIS F., 2017, *Changement climatique et agriculture : quels enjeux et perspectives pour les agrosystèmes normands ? L'exemple du blé en Plaine de Caen-Falaise (14) et du Neubourg (27)*. Mémoire de Master 2, Université de Caen, 245 p.
- BEAUBAIS F., CANTAT O., LE GOUEE P., BRUNEL-MUGUET S., MADELINE P., GAILLARD H., ET AL., 2020a, "Conquenses du changement climatique sur le lin fibre en Normandie à l'horizon 2100 : simulation bioclimatique prospective à partir des données CNRM-2014 et IPSL-2014" in : *33^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Changement climatique et territoires*, Rennes, France.
- BEAUBAIS F., CANTAT O., MADELINE P., 2019a, "Changement climatique et céréaliculture en Normandie : quelles perspectives pour 2100 ?", 71-76 in : *32^{ème} Colloque International de l'AIC : Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, Thessalonique, France.
- BEAUBAIS F., CANTAT O., MADELINE P., LE GOUEE P., BRUNEL-MUGUET S., MEDJKANE M., 2019b, "Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? -Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat", *Climatologie*, Vol.16, 129-160.
- BEAUBAIS F., CANTAT O., MADELINE P., LE GOUEE P., BRUNEL-MUGUET S., MEDJKANE M., 2020b, "What will be the consequences of climate change on soft wheat in Normandy (France) in 2050-2100 ? Prospective impact study based on ALADIN-Climate model", EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-9780.
- BEGCY K., DRESSELHAUS T., 2018, "Epigenetic responses to abiotic stresses during reproductive development in cereals", *Plant reproduction*, Vol.31, N°4, 343-355.
- BELTRANDO G., 2000, "La climatologie : une science géographique", *L'information géographique*, Vol.64, N°3, 241-261.
- BELTRANDO G., 2004, *Les climats, processus, variabilités et risques*. Paris, Armand Colin, 270 p.
- BELTRANDO G., BRICHE E., 2010, "Changement climatique et viticulture en Champagne : du constat actuel aux prévisions du modèle ARPEGE-Climat sur l'évolution des températures pour le XXI^e siècle", *Echogéo*, N°14.
- BEN-ARI T., BOÉ J., CIAIS P., LECERF R., VAN DER VELDE M., MAKOWSKI D., 2018, "Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France", *Nature communications*, Vol.9, N°1, 1-10.
- BERMOND M., MARIE M., 2014, "Une géographie de systèmes de production agricole", in : *Atlas des campagnes de l'Ouest*. Presses universitaires de Rennes.
- BERTRAND C., BERTRAND G., 2002, *Une géographie traversière : l'environnement à travers territoires et temporalités*. Versailles, Editions Quae, 345 p.
- BETHLENFALVAY G. J., SCHÜEPP H., 1994, "Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability", 117-131 in: *Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems*. Springer.
- BINDI M., OLESEN J. E., 2011, "The responses of agriculture in Europe to climate change", *Regional Environmental Change*, Vol.11, N°1, 151-158.

- BODIAN A., 2014, "Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)", *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, N°Volume 8, 297-312.
- BONHOMME R., 2000, "Bases and limits to using 'degree.day' units", *European Journal of Agronomy*, Vol.13, N°1, 1-10.
- BONJEAN A., 2001, "Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.)", N°21, 29-37.
- BONNARDOT V., CAUTENET S., 2009, "Mesoscale atmospheric modeling using a high horizontal grid resolution over a complex coastal terrain and a wine region of South Africa", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.48, N°2, 330-348.
- BONNARDOT V., QUENOL H., 2020, "Viticulture en Bretagne : Challenge ou opportunité ? Quelques indices bioclimatiques régionaux", 127-132 in : *33^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie-Changement climatique et territoires*, Thessalonique, Grèce.
- BONNARDOT V., QUENOL H., DUBREUIL V., 2020, "Chapitre 11. Le changement climatique", 147-157 in : *Géographie de l'environnement*. U. Paris, Armand Colin.
- BONNEFOY C., 2013, *Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique*. Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 322 p.
- BONNEFOY C., QUENOL H., PLANCHON O., BARBEAU G., 2010, "Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique", *EchoGéo*, N°14, 14 p.
- BOOTSMA A., GAMEDA, DW MCKENNEY S., 2005, "Impacts of potential climate change on selected agroclimatic indices in Atlantic Canada", *Canadian Journal of soil science*, Vol.85, N°2, 329-343.
- BOUMA J., 1989, "Using soil survey data for quantitative land evaluation", 177-213 in : Stewart B.A., *Advances in soil science*. Springer, Vol.9, 177-213.
- BOUMA J., VAN LANEN H. A. J., BEEK K. J., BURROUGH P. A., MCCORMACK D. E., 1987, "Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities", In K. J. BEEK, P. A. BURROUGH, & D. E. MACCORMACK (Eds.), *Proceedings of the international workshop on Quantified land evaluation procedures : held in Washington, DC, 27 April - 2 May 1986*, 106-110.
- BOUSQUE I., 1992, "Les mécanismes et les conséquences de l'asphyxie racinaire", *Perspectives Agricoles*, N°175, 116-122.
- BRICHE E., BELTRANDO G., SOMOT S., QUÉNOL H., 2014, "Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region", *Climatic change*, Vol.123, N°2, 241-254.
- BRICHE E., MADELIN M., BELTRANDO G., KERGOMARD C., 2010a, "Analyse comparative des températures extrêmes de 1950 à 2100 issues des modèles ARPEGE-Climat et LMD: intérêt pour l'activité viticole champenoise", *Climatologie*, Vol.7, 9-19.
- BRICHE E., 2011, *Changement climatique dans le vignoble de Champagne : Modélisation thermique à plusieurs échelles spatio-temporelles (1950-2100)*, Université Paris-Diderot, 306 p.
- BRISSON N., GATE P., GOUACHE D., CHARMET G., OURY F.-X., HUARD F., 2010, "Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France", *Field crops research*, Vol.119, N°1, 201-212.
- BRISSON N., LEVRAULT F., 2010, *Livre vert du projet Climator 2007-2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. ADEME Editions, 336 p.
- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.-H., RUGET F., NICOUILLAUD B., ET AL., 1998a, "STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn", *Agronomie*, Vol.18, N°5-6, 311-346.
- BROWN I., TOWERS W., RIVINGTON M., BLACK H. I. J., 2008, "Influence of climate change on agricultural land-use potential: adapting and updating the land capability system for Scotland", *Climate Research*, Vol.37, N°1, 43-57.
- BROWN P. T., CALDEIRA K., 2017, "Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget", *Nature*, Vol.552, N°7683, 45-50.
- BRUNEL-MUGUET S., DIOMARD I., 2021, "Les productions agricoles", 14-23 in : *Thème Sol, Agronomie et Agriculture*, GIEC Normand.

- BRUNET., 2004, Inventaire régional des paysages de Basse Normandie, Caen, Conseil Régional de Basse-Normandie, 2 vol, 871 p.
- CANTAT O., 2006, "Les « caprices » du climat en Normandie.", 89-112 in: "Les «caprices» du climat en Normandie. La variabilité des températures et ses conséquences dans une région « tempérée » non dénuée d'excès", *Actes des journées de climatologie*, Nice, France.
- CANTAT O., 2015, *La diversité spatio-temporelle du climat bas-normand et ses impacts environnementaux et sociétaux*. Paris, Université Paris 7 Diderot, 288 p.
- CANTAT O., PLANCHON O., QUENOL H., SAVOURET E., BOIS B., BEAUVAIS F., ET AL., 2019, "Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne Vallée de la Loire (France)-Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne", *Climatologie*, Vol.16, 91-128.
- CANTAT O., BEAUVAIS F., HERICHER S., 2020, "Le climat en Normandie : présentation et évolutions", 13-30 in : *Le climat en Normandie. Profil environnemental de Normandie*. DREAL de Normandie.
- CANTAT O., BÜHLER M.-A., HERICHER S., 2015, "Analyse du climat régional, de ses caractéristiques et représentations", 8-42 in : DREAL Basse Normandie.
- CANTAT O., LAIGNEL B., NOUARCEUR Z., COSTA S. *Changement climatique et Aléas météorologiques. Rapport pour le GIEC Normand*. 45 p.
- CANTAT O., LE GOUEE P., BENSÂÏD A., 2009, "Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques", *Journées de climatologie. Climat et société: climat et relief*, 1-20.
- CAUBEL J., DE CORTÁZAR-ATAURI I. G., LAUNAY M., DE NOBLET-DUCOUDRÉ N., HUARD F., BERTUZZI P., ET AL., 2015, "Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria", *Agricultural and forest meteorology*, Vol.207, 94-106.
- CAUBEL J., LAUNAY M., RIPOCHE D., GOUACHE D., BUIS S., HUARD F., ET AL., 2017, "Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop-disease model in a French regional application", *European Journal of Agronomy*, Vol.90, 53-66.
- CCE., 2008, *Rapport de la commission au parlement européen et au conseil sur le secteur du lin et chanvre, Bruxelles le 25 mai 2008*.
- CESER DE BASSE-NORMANDIE., 2000, *La filière céréalière en Basse-Normandie*, 100 p.
- CHARMET G., ABECASSIS J., BONNY S., FARDET A., FORGET F., LULLIEN-PELLERIN V., 2017, *Agriculture et alimentation durables. Trois enjeux dans la filière céréales*. Versailles, Editions Quae. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01482829>
- CHARMET G., VALLIUS B., 2013, "Introduction", 7-13 in : *Agriculture et alimentation durables. Trois enjeux dans la filière céréales*. Editions Quae, 192 p.
- CHARVET JEAN-PAUL., 1990, *Le blé*. Paris, Economica, 109 p.
- CHARVET JEAN-PAUL., 2004a, *L'alimentation dans le monde : mieux nourrir la planète*. Paris, Larousse, 128 p.
- CHARVET J.-P., 2018, *Nourrir les hommes*. Paris, Editions Sedes, 318 p.
- CHARVET J.-P., 2018, "Evolutions récentes de la consommation, de la production et des échanges de produits alimentaires dans le monde", 15-63 in : *Nourrir les hommes*. Paris, Editions Sedes.
- CHURCH J. A., WHITE N. J., 2011, "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century", *Surveys in geophysics*, Vol.32, N°4, 585-602.
- COMMISSARIAT GENERAL DU PLAN (CGP), « Deuxième Plan de modernisation et d'équipement (1954-1957) », *Journal officiel*, Paris, 1956, 156 p.
- CONFALONIERI R., BELLOCCHI G., DONATELLI M., 2010, "A software component to compute agro-meteorological indicators", *Environmental Modelling & Software*, Vol.25, N°11, 1485-1486.
- CONWAY G. R., 1985, "Agroecosystem analysis", *Agricultural administration*, Vol.20, N°1, 31-55.
- COSTELLO A., ABBAS M., ALLEN A., BALL S., BELLAMY R., ET AL., 2009, "Managing the health effects of climate change : lancet and University College London Institute for Global Health Commission", *The lancet*,

- Vol.373, N°9676, 1693-1733.
- CRAN., 2019, *Les comptes de l'agriculture en Normandie*, Pôle Économie et Prospective des Chambres d'agriculture de Normandie, 20 p.
- DAVID M., Cantat O., Planchon., 2020, "Chaleur en Normandie, types de circulation atmosphérique et changement climatique (1970 - 2019)" 197-192 in *33^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Changement climatique et territoires*, Rennes, France.
- DEBAEKE P., GAUFFRETEAU A., DUREL C.-E., JEUFFROY M.-H., 2014, "Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux", *Agronomie, Environnement & Sociétés*, Vol.4, N°2, 65-73
- DECONINCK., 2006, *Paléoclimats : l'enregistrement des variations climatiques*, Paris, Vuilbert, 240 p.
- DELAHAYE D., OUVRY JF., BRUNEL-MUGUET., DIOMARD I., 2021, *Thème Sol, Agronomie et Agriculture. Rapport pour le GIEC Normand*, 39 p.
- DÉQUÉ 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*, Vol.57, N°1-2, 16-26.
- DÉQUÉ M., DREVEYTON C., BRAUN A., CARIOLLE D., 1994, "The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling", *Climate Dynamics*, Vol.10, N°4, 249-266.
- DESNOS P., GITTEAU J.-L., LUCAS J.-R., 2012, "Les perspectives climatiques discutées dans les groupes d'agriculteurs", 399-412 in : *Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impacts et perceptions*. Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- DOBARCO R., BOURENNANE H., ARROUAYS D., SABY N. P. A., COUSIN I., MARTIN M. P., 2019, "Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products: A French case study", *Geoderma*, Vol.344, 14-30.
- DOBLER C., BÜRGER G., STÖTTER J., 2012, "Assessment of climate change impacts on flood hazard potential in the Alpine Lech watershed", *Journal of Hydrology*, Vol.460, 29-39.
- DONALD C. T., 1968, "The breeding of crop ideotypes", *euphytica*, Vol.17, N°3, 385-403.
- DORE F., Parreyn C., Larssonneur C., Rioult M., Juignet P., 1990, *Guide géologique Normandie-Maine*. Paris, Masson, 216 p.
- DREAL NORMANDIE., 2015, *Le climat. Profil environnemental de Basse-Normandie*. 80 p.
- DREAL NORMANDIE., 2020, *Le climat en Normandie. Profil environnemental*. Caen, 94 p.
- DROGUE G., FRANÇOIS D., 2013, "Détection du changement régional par rééchantillonnage de séries chronologiques : application aux précipitations dans l'espace Rhéno-Mosan", *Climatologie*, Vol.10, 75-104.
- DUBREUIL V., MEME K., BONNARDOT V., AUBERT J. F., VERGER A. C., MELEC D., 2019, "Changement climatique et dates de floraison des pommiers dans le val de Rance (Bretagne).", 83-88 in : *32^e Colloque International de l'AIC : Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, Thessalonique, Grèce.
- DUBREUIL V., 1994, *La sécheresse dans la France de l'Ouest : étude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR*. Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 381 p.
- DUBREUIL V., LAMY C., PLANCHON O., 2018, "Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur.", 15-21 in : *Les risques naturels dans le contexte de changement climatique*, Cluj, Roumanie.
- DUBREUIL V., PLANCHON O., LAMY C., BONNARDOT V., QUENOL H., 2012, "Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances", 19-30 in *Changement climatique dans l'Ouest: évaluation impacts perceptions*. Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- DUBROVSKY, M., SVOBODA, M. D., TRNKA, M., HAYES, M. J., WILHITE, D. A., ZALUD, Z., and HLAVINKA, P., 2008, "Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. Theoretical and Applied Climatology", Vol. 96, 155-171.
- DUCHARNE A., 2002, "Projet GICC-Seine: questions relatives à l'ETP", *Note technique*, N°2, 11 p.
- DUFOUR S., LESPEZ L., 2020, *Géographie de l'environnement. La nature au temps de l'anthropocène*. Paris, Armand Colin, 288 p.

- DUFRESNE J.-L., Y MELIA D. S., DENVIL S., TYTECA S., ARZEL O., BONY S., ET AL., 2006, "Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL", *La Météorologie*, Vol.55, 45-59.
- DUFUMIER M., 2016, "L'agriculture française de demain", *Pour*, N°4, 261-267.
- DUPRAZ CHRISTIAN, LIAGRE FABIEN., 2011, *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. Paris, Groupe France agricole, 432 p.
- DURAND R., 1969, "Signification et portée des sommes de températures", *Bulletin Technique d'Information-Ministère de l'Agriculture*, N°238, 185-190.
- EDWARDS P. N., 2010, *A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming*. Mit Press, 546 p.
- ESOURROU GISELE., 1978, "Climats et types de temps en Normandie", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sorbonne, 649 p.
- TURC L., 1961, "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle", *Ann. Agron.*, Vol.12, 13-49.
- FAO., 2018, *Climate change and food security : risks and response*. Rome.
- FAO, FIDA, OMS, PAM, UNICEF., 2018, *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde. Renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition*. Rome, 198 p.
- FAYE C., DIOP E. H. S., MBAYE I., 2015, "Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve Sénégal : caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés", *Belgeo. Revue belge de géographie*, N°4, 26 p.
- FISCHER R. A., 1985, "Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature", *The Journal of Agricultural Science*, Vol.105, N°2, 447-461.
- FISCHER R. A., MAURER O R., 1976, "Crop temperature modification and yield potential in a dwarf spring wheat 1", *Crop science*, Vol.16, N°6, 855-859.
- Fourment M., 2016, *Adaptation de la vigne (Vitis vinifera L.) à la variabilité de la température à méso-échelle en Uruguay*. Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 149 p.
- FOURNIER JM., CARO P., *Atlas social de Caen. De l'agglomération à la métropole ?* Laboratoire ESO Caen. [en ligne]
- FOSSOU R. M. N., DE LASME O., ONETIE O., 2015, "Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)". *Larhyss Journal*, 21, 97-120.
- FREMONT A., 2015, *Paysans de Normandie aujourd'hui*. Bayeux, Orep éditions, 160 p.
- GACHON P., 2000, "La modélisation du climat-où en sommes-nous ?", *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol.1, N°2.
- GADEDJISSO-TOSSOU A., ADJEGAN K. I., KABLAN A. K. M., 2020, "Rainfall and temperature trend analysis by Mann-Kendall test and significance for rainfed cereal yields in northern Togo", *Sci*, Vol.2, N°4, 74, 20 p.
- GALLAIS A., GATE P., OURY F.-X., 2010, "Évolution des rendements de plusieurs plantes de grande culture une réaction différente au réchauffement climatique selon les espèces", *CR Acad. Sci*, Vol.96, 4-16.
- GALLAIS A., 2015, *Pour comprendre l'amélioration des plantes : Enjeux, methods, objectifs et critères de selection*, Versailles, Quae, 240 p.
- GALLAIS A., 2017, "Evolution à long terme de la production et des besoins en plantes annuelles cultivées dans le monde", 77-88 in *La sécurité alimentaire mondiale : Etat des lieux et perspectives*, Paris, L'Harmattan.
- GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., MAURY O., 2019, "GETARI: Generic Evaluation Tool of Agroclimatic Indicators",
- GATE P., 1995, *Ecophysiologie du blé tendre. De la plante à la culture*. Paris, Tec & Doc-Lavoisier, 429 p.
- GATE P., 2009, "Les raisons du plafonnement des rendements du blé en France", *Perspectives Agricoles*, Vol.355, 6-12.
- GATE P., BLONDLOT A., GOUACHE D., DEUDON O., VIGNIER L., 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*, Vol.15, N°5, 332-336.
- GATE P., BRISSON N., GOUACHE D., 2010a, "Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique", *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, Vol.96, N°3, 17-23.
- GATE P., BRISSON N., GOUACHE D., 2010b, "Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique", *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, Vol.96, N°3, 17-23.
- GERMAIN-VALLEE C., LESPEZ L., 2012, "L'apport de recherches géomorphologiques et micromorphologiques récentes à l'archéologie des paysages de la Plaine de Caen (Calvados, Basse-Normandie)", *Norvix*, N°220, 141-176.
- GEVERS C., VAN RIJSWICK H. F., SWART J., 2019, "Peasant seeds in France : fostering a more resilient agriculture", *Sustainability*, Vol.11, N°11, 3014.
- GIBELIN A.-L., DUBUISSON B., CORRE L., DEAUX N., JOURDAIN S., LAVAL L., ET AL., 2014, "Evolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence", *La Météorologie*, N°87, 45-53
- GOLDRINGER I., ENJALBERT J., RIVIERE P., DAWSON J., 2012, "Recherche participative pour des variétés adaptées à une agriculture à faible niveau d'intrants et moins sensibles aux variations climatiques", *Pour*, N°1, 153-161.
- GOUACHE D., BOGARD M., PEGARD M., THEPOT S., GARCIA C., HOURCADE D., ET AL., 2017, "Bridging the gap between ideotype and genotype: challenges and prospects for modelling as exemplified by the case of adapting wheat (*Triticum aestivum* L.) phenology to climate change in France", *Field Crops Research*, Vol.202, 108-121.
- GOUACHE D., LE BRIS X., BOGARD M., DEUDON O., PAGÉ C., GATE P., 2012, "Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France", *European Journal of Agronomy*, Vol.39, 62-70.
- GOUDENHOOF C., BOURMAUD A., BALEY C., 2019, "Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement: exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties", *Frontiers in plant science*, Vol.10, 411.
- GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, PACHAURI R. K., MEYER L. A., 2015, *Changements climatiques 2014: rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève (Suisse), GIEC, 180 p.
- GUILLEMIN P., 2020, *Les mondes légumiers et maraîchers en Normandie : hétérogénéité sociale et renouvellement de filières agricoles et alimentaires*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie, 633 p.
- GUILLEMIN P., 2021, « La Plaine de Caen : une vocation légumière méconnue ». in *Atlas Social de Caen* <https://atlas-social-de-caen.fr:443/index.php?id=351>
- GUILLEMOT H., 2007, "Les modèles numériques de climat", *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*, Paris : La Découverte, 91-112.
- GUINET M., NICOLARDOT B., DUREY V., REVELLIN C., LOMBARD F., PIMET E., ET AL., 2019, "Fixation symbiotique de l'azote et effet précédent : toutes les légumineuses à graines se valent-elles ?", *Innovations Agronomiques*, Vol.74, 55-68.
- GUO R., LIN Z., MO X., YANG C., 2010, "Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain", *Agricultural Water Management*, Vol.97, N°8, 1185-1194.
- GUTTERMAN Y., 2000, "Maternal effects on seeds during development", *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, Vol.2, 410.
- HAGHVERDI A., ÖZTÜRK H. S., CORNELIS W. M., 2014a, "Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method", *Geoderma*, Vol.226, 31-38.
- HAGHVERDI A., ÖZTÜRK H. S., CORNELIS W. M., 2014b, "Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method", *Geoderma*, Vol.226, 31-38.

- HANSEN J., SATO M., KHARECHA P., SCHUCKMANN K. VON., 2011, "Earth's energy imbalance and implications", *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol.11, N°24, 13421-13449.
- HARRISON P. A., BUTTERFIELD R. E., 1996, "Effects of climate change on Europe-wide winter wheat and sunflower productivity", *Climate Research*, Vol.7, N°3, 225-241.
- HATZIG S. V., NUPPENAU J.-N., SNOWDON R. J., SCHIEBL S. V., 2018, "Drought stress has transgenerational effects on seeds and seedlings in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)", *BMC plant biology*, Vol.18, N°1, 1-13.
- HAWKINS E., SUTTON R., 2009, "The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.90, N°8, 1095-1108.
- HAWKINS E., SUTTON R., 2011, "The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change", *Climate dynamics*, Vol.37, N°1, 407-418.
- HINGRAY B., SAÏD M., 2014, "Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimember multimodel ensemble of climate projections", *Journal of Climate*, Vol.27, N°17, 6779-6798.
- HOLZKÄMPER A., CALANCA P., FUHRER J., 2011, "Analyzing climate effects on agriculture in time and space", *Procedia Environmental Sciences*, Vol.3, 58-62.
- HOLZKÄMPER A., CALANCA P., FUHRER J., 2013, "Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.168, 149-159.
- HOLZKÄMPER A., FOSSATI D., HILTBRUNNER J., FUHRER J., 2015, "Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland", *Regional Environmental Change*, Vol.15, N°1, 109-122.
- HOOD A., CECHET B., HOSSAIN H., SHEFFIELD K., 2006, "Options for Victorian agriculture in a "new" climate: Pilot study linking climate change and land suitability modelling", *Environmental Modelling & Software*, Vol.21, N°9, 1280-1289.
- HUARD F., 1993, "Approches théoriques de la spatialisation de variables climatiques à partir de la discrétisation du relief français.: Applications méthodologiques et cartographiques les potentialités agroclimatiques en Basse-Normandie", Thèse de Doctorat, Université de Caen, 240 p.
- IPCC., 2014, *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, PACHAURI R.K. and MEYER L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC., 2018, *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [MASSON-DELMOTTE V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T (eds.)]. In Press.
- IPCC., 2021, "Summary for Policymakers". in : *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I, Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- IRANNEZHAD M., MARTTILA H., CHEN D., KLØVE B., 2016, "Century-long variability and trends in daily precipitation characteristics at three Finnish stations", *Advances in Climate Change Research*, Vol.7, N°1-2, 54-69.
- IZAURRALDE R. C., ROSENBERG N. J., BROWN R. A., THOMSON A. M., 2003, "Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.117, N°1-2, 97-122.
- JACQUART C., CHOISNEL E., 1995, "Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisables en agrométéorologie", *Météorologie (Paris. 1925)*, N°9, 29-44.

- JAMAGNE M., JC B., 1977, "Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols.", *Bulletin Technique d'Information*. N° 324-325, 627-641
- JEANDEL C., MOSSERI R., FUCHS A., 2011, *Le climat à découvert*. Paris, CNRS éd, 285 p.
- JENKS G. F., 1977, "Optimal data classification for choropleth maps", *Department of Geography, University of Kansas Occasional Paper*.
- JOLIVET C., FALCON J.-L. A., BERCHE P., BOULONNE L., FONTAINE M., GOUNY L., ET AL., 2018a, *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)*. <https://hal.inrae.fr/hal-02791718>
- JOLIVET C., ALMEIDA FALCON J.-L., BERCHE P., BOULONNE L., FONTAINE M., GOUNY L., LEHMANN S., MAITRE B., RATIE C., SCHELLENBERGER E., SOLER-DOMINGUEZ N., 2018b, *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)*. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016-2027, INRA, 150 p.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P., 2010, "Les types de climats en France, une construction spatiale", *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- JU H., XIONG W., XU Y.L., LIN E.D., 2005, Impacts of climate change on wheat yield in China, *Acta Agronomica Sinica*, 31, 1340-1343.
- KAPLAN S. L., 2012, "La tyrannie des céréales, ou petite esquisse d'une très brève histoire de la régulation dans la filière blé-farine-pain, circa 1750-1960", 27-50 in: *Organiser les marchés agricoles. Le temps des fondateurs*. Paris, Armand Colin.
- KENDALL M. G., 1975, "Rank correlation methods. 2nd impression", *Charles Griffin and Company Ltd. London and High Wycombe*.
- KOCIS T., KOVÁCS-SZÉKELY I., ANDA A., 2020, "Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol.139, N°3, 849-859.
- KRISTENSEN K., SCHELDE K., OLESEN J. E., 2011, "Winter wheat yield response to climate variability in Denmark", *The Journal of Agricultural Science*, Vol.149, N°1, 33-47.
- KUMAR S. N., AGGARWAL P. K., RANI D. S., SAXENA R., CHAUHAN N., JAIN S., 2014, "Vulnerability of wheat production to climate change in India", *Climate Research*, Vol.59, N°3, 173-187.
- LABIDI A., 2016, "Améliorer et rendre opérationnels les modèles d'évaluation de la Réserve Utile en Eau maximale des sols calculés à partir de caractéristiques des sols couramment mesurées", 95 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01600751>
- LAMARRE D., 2013, "Propos d'un géographe climatologue sur les changements climatiques. Une approche, des perspectives", *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies*, Vol.90, N°1, 45-54.
- LAMARRE D., PAGNEY P., 1999, *Climats et sociétés*. Paris, Armand Colin, 272 p.
- LÄMKE J., BÄURLE I., 2017, "Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress memory in plants", *Genome biology*, Vol.18, N°1, 1-11.
- LAMY C., 2013, *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*. Thèse de Doctorat, Rennes 2, 274 p.
- LAMY C., CANTAT O., LE GOUEE P., DUBREUIL V., BENSÂÏD A., LEMERCIER B., ET AL., 2012, "Sécheresse et réserve en eau du sol", 195-216 in: *Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impacts et perceptions*. Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- LAMY C., DUBREUIL V., 2013, "Impact potentiel du changement climatique sur les sécheresses pédologiques en Bretagne au 21ème siècle", *Climatologie*, Vol.10, 107-121.
- LANCASHIRE P. D., BLEIHOLDER H., BOOM T. VAN DEN, LANGELÜDDEKE P., STAUSS R., WEBER E., ET AL., 1991, "A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds", *Annals of applied Biology*, Vol.119, N°3, 561-601.
- LE GOUEE P., 2016, *Référentiel Régional Pédologique du Calvados (Etude n°30234)*.

- LE GOUEE P., CANTAT O., BENSÂID A., SAVOURET E., 2010, "La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique (2000-2100)", 331-336 in : *23^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Risques et changement climatique*, Rennes, France.
- LE GOUEE P., DELAHAYE D., 2008, *Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados*. Rapport d'étude, Laboratoire Geophen, Université de Caen, 240 p.
- LE GOUEE PATRICK, MARIE M., CANTAT O., BENSÂID A., 2010, "Quand le géographe fait du sol une interface essentielle entre agriculture durable, société et environnement exemple de deux études de cas traitées en Basse-Normandie (France)" 10 p in: ISDA, 28-30 juin 2010.
- LE STUM H., BONJEAN A., RUCH O., BOUQUERY J.-M., SOPPELSA C., GRECOURT B., ET AL., 2017, *Le blé*. Paris, Editions France Agricole, 269 p.
- LE TREUT H., 2011, "Les grands équilibres naturels dans la modélisation du climat" 43-46 in *Le climat à découvert*, Paris, CNRS Editions.
- LEV-YADUN S., SEDEROFF R., 2000, "Pines as Model Gymnosperms To Study Evolution, WoodFormation, and Perennial Growth.", *Journal of Plant Growth Regulation*, Vol.19, N°3.
- LIU Yujie, TAO Fulu. Probabilistic Assessment and Uncertainties Analysis of Climate Change Impacts on Wheat Biomass[J].Acta Geographica Sinica, 2012, Vol. 67, 3, 337-345.
- LOBELL D. B., SCHLENKER W., COSTA-ROBERTS J., 2011, "Climate trends and global crop production since 1980", *Science*, Vol.333, N°6042, 616-620.
- LUO Q., BELLOTTI W., WILLIAMS M., BRYAN B., 2005, "Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.132, N°3-4, 273-285.
- LV Z., LIU X., CAO W., ZHU Y., 2013, "Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.171-172, 234-248.
- MADÉLIN M., BOIS B., CHABIN J.-P., 2010, "Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique. L'exemple des vignobles de la Côte et des Hautes-Côtes de Beaune", *EchoGéo*, N°14.
- MAGRIN G. O., TRAVASSO M. I., RODRIGUEZ G. R., SOLMAN S., NUNEZ M., 2009, "Climate change and wheat production in Argentina", *International Journal of Global Warming*, Vol.1, N°1-3, 214-226.
- MANN H. B., 1945, "Nonparametric tests against trend", *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- MARGETIC C. 340, BERMOND M. 340, JOUSSEAUME V. 340, MARIE M. (DOCTEUR EN GEOGRAPHIE) 340., 2014, *Atlas des campagnes de l'Ouest*. Rennes, Presses universitaires de Rennes, 299 p.
- MARIE M., BERMOND M., MADÉLINE P., COINAUD C., 2014, "Une typologie des combinaisons d'utilisation agricole du sol en France en 2010 : propositions méthodologiques", *M@ppemonde*, N°114, p-14203.
- MARTIN N., CARREGA P., ADNES C., 2013, "Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-climat sur les Alpes-Maritimes (France)", *Climatologie*, Vol.10, 51-72.
- MASSON V., CHAMPEAUX J-L, CHAUVIN F, MERIGUET C et LACAZE R, 2003 : A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models. *J. Clim.*, 16, 1261-1282.
- MATTHEWS K. B., RIVINGTON M., BUCHAN K., MILLER D., BELLOCCHI G., 2008, "Characterising the agro-meteorological implications of climate change scenarios for land management stakeholders", *Climate Research*, Vol.37, N°1, 59-75.
- MEROT P. 651, DUBREUIL V. 651, DELAHAYE D. 651, DESNOS P. 651., 2012, *Changement climatique dans l'Ouest: évaluation impacts perceptions*. Rennes, Presses universitaires de Rennes, 458 p.
- MICHEL-GUILLOU., 2012, « Changement climatique et ressources en eau. Quelle représentation sociale du changement climatique ? Quelle prise en compte dans la gestion locale des problèmes liés à la ressource en eau ? 387-398 in : *Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impacts et perceptions*. Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- MILLSTONE ERIK, LANG TIM, DRESCHER A. 695, BEDNARECK C. 730., 2003, *Atlas de l'alimentation dans le monde*. Paris, Autrement, 127 p.

- MKHABELA M., BULLOCK P., GERVAIS M., FINLAY G., SAPIRSTEIN H., 2010, "Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.150, N°3, 399-410.
- MONDON S., IMBARD M., 2013, "Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC", *Direction générale de l'économie et du climat, document de travail*. 11 p.
- MONFREDA C., RAMANKUTTY N., FOLEY J. A., 2008, "Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000", *Global biogeochemical cycles*, Vol.22, N°1, 19 p.
- MONTEITH J. L., 1965, "Evaporation and environment". *19th Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234. <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-env>
- MORGOUNOV A., HAUN S., LANG L., MARTYNOV S., SONDER K., 2013, "Climate change at winter wheat breeding sites in central Asia, eastern Europe, and USA, and implications for breeding", *Euphytica*, Vol.194, N°2, 277-292.
- MORIONDO M., BINDI M., KUNDZEWICZ Z. W., SZWED M., CHORYNSKI A., MATCZAK P., ET AL., 2010, "Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability", *Mitigation and adaptation strategies for global change*, Vol.15, N°7, 657-679.
- MOSSAD M., ORTIZ-FERRARA G., MAHALAKSHMI V., FISCHER R. A., 1995, Phyllochron response to vernalization and photoperiod in spring wheat. *Crop Science*, 35, 168-171.
- MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARD K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VAN VUUREN D. P., ET AL., 2010, "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature*, Vol.463, N°7282, 747-756.
- MOUNIER J., 1965, "Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne", *Norois*, Vol.48, N°1, 437-448.
- NAKICENOVIC N., SWART R., 2000, *Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 599 p.
- NEETHLING E., PETITJEAN T., QUÉNOL H., BARBEAU G. 2016. Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive process in the context of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies of Global Change*, 1-27.
- NEVEU A., 2017, "Comment satisfaire les besoins alimentaires de l'humanité à l'horizon 2050 ?", 31-38 in : *La sécurité alimentaire mondiale. Etat des lieux et perspectives*. Paris, L'Harmattan.
- NORTHROP P. J., CHANDLER R. E., 2014, "Quantifying sources of uncertainty in projections of future climate", *Journal of Climate*, Vol.27, N°23, 8793-8808.
- OLESEN J. E., BINDI M., 2002, "Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy", *European journal of agronomy*, Vol.16, N°4, 239-262.
- OLESEN J. E., CARTER T. R., DIAZ-AMBRONA C. H., FRONZEK S., HEIDMANN T., HICKLER T., ET AL., 2007, "Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models", *Climatic Change*, Vol.81, N°1, 123-143.
- OLESEN J. E., TRNKA M., KERSEBAUM K. C., SKJELVÅG A. O., SEGUIN B., PELTONEN-SAINIO P., ET AL., 2011, "Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change", *European journal of agronomy*, Vol.34, N°2, 96-112.
- OLMSTEAD C. W., 1970, "The phenomena, functioning units and systems of agriculture", *Geographica Polonica*, Vol.19, 31-41.
- OMM., 1988, *Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability*. World Meteorological Organization.
- OMM., 2021, "2020 est l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées". <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/2020-est-l%E2%80%99une-des-trois-ann%C3%A9s-les-plus-chaudes-jamais-enregistr%C3%A9es>
- ORTIZ R., BRAUN H.-J., CROSSA J., CROUCH J. H., DAVENPORT G., DIXON J., ET AL., 2008, "Wheat genetic resources enhancement by the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT)", *Genetic Resources and*

- Crop Evolution*, Vol.55, N°7, 1095-1140.
- OURY F-X., ROUSSET M., HEUMEZ E., AUZANNEAU J., DELHAYE J-M., DESHAYE S., DUTRIEZ S., GOUACHE D., GIRAUDEAU P., MICHELET C., LEBEROUR P., STRAGLIATI J., SUNDERWIRTH S., 2013, "Caractérisation du rythme de développement du blé tendre pour des variétés adaptées aux risques climatiques", *ournée Scientifique du Fonds de Soutien à l'Obtention Végétale*, Paris, 26 p.
- OUZEAU G., DEQUE M., JOUINI M., PLANTON S., VAUTARD R., 2014, "Le climat de la France au XXIe siècle", *Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat*, 63 p.
- PARKINSON C. L., 2019, "A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.116, N°29, 14414-14423.
- PARTAL T., KAHYA E., 2006, "Trend analysis in Turkish precipitation data", *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol.20, N°9, 2011-2026.
- PAUCHARD L., 2011, *Sensibilité des agriculteurs aux questions environnementales : Mesure de l'adaptation des pratiques agricoles aux changements globaux dans le bassin-versant de la Seulles*, Mémoire de Master 1, Université de Caen Normandie, 127 p.
- PATRA B-K., SADU D-D, 2007, "Use of agrometeorological indices for suitable sowing time of wheat under South Saurashtra agroclimatic zone of Gujarat", *J.Agrometeorol*, Vol.9, N°1, 74-80.
- PELTONEN-SAINIO P., KANGAS A., SALO Y., JAUHAINEN L., 2007, "Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials", *Field Crops Research*, Vol.100, N°2-3, 179-188.
- PETTTIT A. N., 1979, "A non-parametric approach to the change-point problem", *Journal of the Royal Statistical Society : Series C (Applied Statistics)*, Vol.28, N°2, 126-135.
- PISON G., 2019, *Atlas de la population mondiale*. Paris, Autrement, 96 p
- PLANTON S., MELIA S. Y., BRACONNOT P., CASSOU C., DUFRESNE J. L., HALLEGATTE S., 2013, "The new IPCC climate scenarios ; Les nouveaux scénarios climatiques du GIEC", *Pollution Atmosphérique*, 32-39.
- POITOU J., 2014, *Le climat : la Terre et les hommes*. Ullis, [France, edp sciences, 241 p.
- POUCH T., KHERAIEF N., 2016, "Le commerce extérieur agroalimentaire de l'Inde", *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, N°352, 67-80.
- PREUX T., 2019, *De l'agrandissement des exploitations agricoles à la transformation des paysages de bocage : analyse comparative des recompositions foncières et paysagères en Normandie*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie, 603 p.
- PREUX T., BEAUVAIS F., et PAUCHARD L., 2020 : « Le système agro-alimentaire des grandes cultures en Plaine de Caen : une déconnexion entre production, transformation et consommation ? », in *Atlas Social de Caen*
- PREUX T., DELAHAYE D., MARIE M., 2014, "Intérêts et limites du registre parcellaire graphique (RPG) pour l'analyse du processus d'agrandissement des exploitations agricoles" in: *Le Foncier Agricole : Usages, tensions et régulations*. Lyon, France.
- QIAN B., ZHANG X., SMITH W., GRANT B., JING Q., CANNON A. J., ET AL., 2019, "Climate change impacts on Canadian yields of spring wheat, canola and maize for global warming levels of 1.5 C, 2.0 C, 2.5 C and 3.0 C", *Environmental Research Letters*, Vol.14, N°7, 074005.
- QUÉNOL H., BONNARDOT V., 2014, "A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project", *International Journal of Vine and Wine Sciences*, 23-32.
- QUÉNOL H., DE CORTAZAR ATAURI I. G., BOIS B., STURMAN A., BONNARDOT V., LE ROUX R., 2017, "Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards?", *Oeno One*, Vol.51, N°2, 91-97.
- QUÉNOL H., GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., BOIS B., STURMAN A., BONNARDOT V., LE ROUX R., 2017, "Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards?", *OENO One*, Vol.51, N°2, 91-97.

- QUINTANA-SEGUI P., LE MOIGNE P., DURAND Y., MARTIN E., HABETS F., BAILLON M., ET AL., 2008, "Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France", *Journal of applied meteorology and climatology*, Vol.47, N°1, 92-107.
- RAMANKUTTY N., FOLEY J. A., NORMAN J., MCSWEENEY K., 2002, "The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change", *Global Ecology and biogeography*, Vol.11, N°5, 377-392.
- RASTOIN J.-L. 651, FERAULT C. 651, CARON P. 080., 2017, *La sécurité alimentaire mondiale : état des lieux et perspectives*. Paris, l'Harmattan, 312 p.
- RAY D. K., RAMANKUTTY N., MUELLER N. D., WEST P. C., FOLEY J. A., 2012, "Recent patterns of crop yield growth and stagnation", *Nature communications*, Vol.3, N°1, 1-7.
- RICHARD Y., ROUCOU P., CRETAT J., CASTEL T., POHL B., 2012, "Modèles de climats régionaux : potentiels et limites", 667-672 in : *25^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Climats régionaux : observation et modélisation*, Grenoble, France.
- RICHARDS L. A., 1941, "A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution", *Soil Sci*, Vol.51, N°5, 377-386.
- ROME S., CANIAUX G., RINGARD J., DIEPPOIS B., DIEDHIOU A., 2015, "Identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'Ouest et sur le Golfe de Guinée", 591-596 in : *28^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, Belgique.
- SAINI H. S., ASPINALL D., 1982, Abnormal sporogenesis in wheat (*Triticum aestivum* L.) induced by short periods of high temperature. *Annals of Botany*, 49, 835-846.
- SANSON J., PARDE M., 1950, "La sécheresse des années 1942-49 en France", *Revue de géographie alpine*, Vol.38, N°2, 369-404.
- SEMENOV M. A., STRATONOVITCH P., 2015, "Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections", *Climate Research*, Vol.65, 123-139.
- SENAPATI N., STRATONOVITCH P., PAUL M. J., SEMENOV M. A., 2019, "Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe", *Journal of experimental botany*, Vol.70, N°9, 2549-2560.
- SHADMANI M., MAROFI S., ROKNIAN M., 2012, "Trend analysis in reference evapotranspiration using Mann-Kendall and Spearman's Rho tests in arid regions of Iran", *Water resources management*, Vol.26, N°1, 211-224.
- SILVA B. M., SILVA É. A. DA, OLIVEIRA G. C. DE, FERREIRA M. M., SERAFIM M. E., 2014, "Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications", *Revista brasileira de ciência do solo*, Vol.38, 464-475.
- SMITHERS J., SMIT B., 1997, "Human adaptation to climatic variability and change", *Global environmental change*, Vol.7, N°2, 129-146.
- SEMENOV M. A., STRATONOVITCH P., ALGHABARI F., GOODING M. J., 2014, "Adapting wheat in Europe for climate change", *Journal of cereal science*, Vol.59, N°3, 245-256.
- SOMMER R., GLAZIRINA M., YULDASHEV T., OTAROV A., IBRAEVA M., MARTYNOVA L., ET AL., 2013, "Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia", *Agriculture, ecosystems & environment*, Vol.178, 78-99.
- SOUBEYROUX J.-M., BERNUS S., CORRE L., GOUGET V., KERDONCUFF M., SOMOT S., ET AL., 2021, *The new high resolution climate projections dataset DRLAS-2020 over France*. Copernicus Meetings, online.
- SOUBEYROUX J.-M., BERNUS S., CORRE L., Drouin A., Dubuisson B., Pierre Etchevers P., ET AL., 2020, Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole, Météo-France, 97 p. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>
- SPEEDING C. R. W., 1988, "A systems approach to agriculture", 15-40 in: *An Introduction to Agricultural Systems*. Springer.
- SPIRIDONOV V., DÉQUÉ M., SOMOT S., 2005, "ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date", *ALADIN Newsletter*, Vol.29, 89-92.
- SPRINGER N. M., 2013, "Epigenetics and crop improvement", *Trends in genetics*, Vol.29, N°4, 241-247.

- STOTT P. A., KETTLEBOROUGH J. A., 2002, "Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise", *Nature*, Vol.416, N°6882, 723-726.
- STRATONOVITCH P., SEMENOV M. A., 2015, "Heat tolerance around flowering in wheat identified as a key trait for increased yield potential in Europe under climate change", *Journal of experimental botany*, Vol.66, N°12, 3599-3609.
- SULTANA C., 1983a, "The cultivation of fibre flax", *Outlook on agriculture*, Vol.12, N°3, 104-110.
- SULTANA C., 1983b, "The cultivation of fibre flax", *Outlook on agriculture*, Vol.12, N°3, 104-110.
- TAO F., ZHANG Z., 2013, "Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection", *Agricultural and forest meteorology*, Vol.170, 146-165.
- TASHIRO T., WARDLAW I. F., 1990, "The response to high temperature shock and humidity changes prior to and during the early stages of grain development in wheat", *Functional Plant Biology*, Vol.17, N°5, 551-561.
- TAYLOR K. E., STOUFFER R. J., MEEHL G. A., 2012, "An overview of CMIP5 and the experiment design", *Bulletin of the American meteorological Society*, Vol.93, N°4, 485-498.
- THAKUR P., KUMAR S., MALIK J. A., BERGER J. D., NAYYAR H., 2010, "Cold stress effects on reproductive development in grain crops: An overview", *Environmental and Experimental Botany*, Vol.67, N°3, 429-443.
- THALER S., EITZINGER J., TRNKA M., DUBROVSKY M., 2012, "Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe", *The Journal of Agricultural Science*, Vol.150, N°5, 537-555.
- TISSOT C., QUENOL H., ROUAN M., 2020, "Adaptation de la viticulture argentine à la variabilité climatique : une approche par simulation dans la région de Mendoza", *Norois*, Vol 1, n°254, 91-108.
- TOUZE-PEIFFER L., 2018, *Le climat : de l'observation à la modélisation brève histoire d'une épopée scientifique et technologique*. Paris, Éditions Matériologiques, 135 p.
- TRNKA M., DUBROVSKÝ M., SEMERÁDOVÁ D., EITZINGER J., OLESEN J., MOZNY M., ET AL., 2008, "AgriCLIM—software package for assessment changes in agroclimatic conditions—results and planned use in COST 734", in : *Book of Abstracts Symposium on Climate Change and Variability—Agrometeorological Monitoring and Coping Strategies for Agriculture*.
- TRNKA M., RÖTTER R. P., RUIZ-RAMOS M., KERSEBAUM K. C., OLESEN J. E., ŽALUD Z., ET AL., 2014, "Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change", *Nature Climate Change*, Vol.4, N°7, 637-643.
- TRNKA M., HLAVINKA P., SEMENOV M. A., 2015, "Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol.12, N°112, 20150721.
- TRZPIT J.-P., 1970. *Atlas de Normandie*. Article de présentation du climat normand, Caen, Association pour l'Atlas de Normandie, 3 planches (texte et cartes sur le climat).
- TRZPIT J.-P., 1978, "La sécheresse en Basse-Normandie: calamité accidentelle ou mal récurrent?", *Études Normandes*, Vol.27, N°1, 55-74.
- TRZPIT J.-P., 1996, "Gens de Basse Normandie, et si l'eau vous était comptée?", *Études Normandes*, Vol.45, N°1, 9-22.
- TUAN N. T., QIU J., VERDOODT A., LI H., VAN RANST E., 2011, "Temperature and Precipitation Suitability Evaluation for the Winter Wheat and Summer Maize Cropping System in the Huang-Huai-Hai Plain of China", *Agricultural Sciences in China*, Vol.10, N°2, 275-288.
- TUBIELLO F. N., ROSENZWEIG C., GOLDBERG R. A., JAGTAP S., JONES J. W., 2002, "Effects of climate change on US crop production: simulation results using two different GCM scenarios. Part I: wheat, potato, maize, and citrus", *Climate research*, Vol.20, N°3, 259-270.
- URRUTY N., 2017, *Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques*. Poitiers. <https://www.theses.fr/2017POIT2253>
- VAN VUUREN D. P., EDMONDS J., KAINUMA M., RIAHI K., THOMSON A., HIBBARD K., ET AL., 2011, "The

- representative concentration pathways: an overview", *Climatic change*, Vol.109, N°1, 5-31.
- VASHISHT B. B., MULLA D. J., JALOTA S. K., KAUR S., KAUR H., SINGH S., 2013, "Productivity of rainfed wheat as affected by climate change scenario in northeastern Punjab, India", *Regional Environmental Change*, Vol.13, N°5, 989-998.
- VEIHMAYER F. J., HENDRICKSON A. H., 1927, "Soil-moisture conditions in relation to plant growth", *Plant Physiology*, Vol.2, N°1, 71-81.
- VERECKEN H., WEYNANTS M., JAVAUX M., PACHEPSKY Y., SCHAAP M. G., GENUCHTEN M. T. VAN., 2010, "Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review", *Vadose Zone Journal*, Vol.9, N°4, 795-820.
- VIGNEAU JEAN-PIERRE., 2005, *Climatologie*. Paris, Armand Colin, 199 p.
- VOLDOIRE A., SANCHEZ-GOMEZ E., Y MELIA D. S., DECHARME B., CASSOU C., SENESI S., ET AL., 2013, "The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation", *Climate dynamics*, Vol.40, N°9, 2091-2121.
- WANG J., WANG E., LUO Q., KIRBY M., 2009, "Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia", *Climatic Change*, Vol.96, N°1, 79-96.
- WANG B., FENG P., LI LIU D., WATERS C., 2020, "Modelling biophysical vulnerability of wheat to future climate change: A case study in the eastern Australian wheat belt", *Ecological Indicators*, Vol.114, 106290.
- WEBBER H., EWERT F., OLESEN J. E., MÜLLER C., FRONZEK S., RUANE A. C., ET AL., 2018, "Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe", *Nature communications*, Vol.9, N°1, 1-10.
- WILCOX J., MAKOWSKI D., 2014, "A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies", *Field Crops Research*, Vol.156, 180-190.
- WITZENBERGER A., VAN DEN B., HACK H., 1989, "Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides-mit Abbildungen", *Gesunde Pflanzen*, Vol.41, N°11, 384-388.
- XU W., MAGE J. A., 2001, "A review of concepts and criteria for assessing agroecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario", *Agriculture, ecosystems & environment*, Vol.83, N°3, 215-233.
- YANG X., TIAN Z., SUN L., CHEN B., TUBIELLO F. N., XU Y., 2017, "The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China", *Climatic Change*, Vol.140, N°3-4, 605-620.
- YIP S., FERRO C. A., STEPHENSON D. B., HAWKINS E., 2011, "A simple, coherent framework for partitioning uncertainty in climate predictions", *Journal of Climate*, Vol.24, N°17, 4634-4643.
- YU P.-S., YANG T.-C., WU C.-K., 2002a, "Impact of climate change on water resources in southern Taiwan", *Journal of Hydrology*, Vol.260, N°1-4, 161-175.
- YU P.-S., YANG T.-C., WU C.-K., 2002b, "Impact of climate change on water resources in southern Taiwan", *Journal of Hydrology*, Vol.260, N°1-4, 161-175.
- ZAO Y., OUYANG Q., ZHANG X., HOU S., FANG M., 2017, "The dynamic impedance matching method for high temperature electromagnetic acoustic transducer", 1923-1927 in: *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. IEEE.
- ZEMP M., HUSS M., THIBERT E., ECKERT N., McNABB R., HUBER J., ET AL., 2019, "Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016", *Nature*, Vol.568, N°7752, 382-386.
- ZHANG X.-C., LIU W.-Z., 2005, "Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.131, N°3-4, 127-142.

Table des figures

Figure 1 : Localisation de l'espace d'étude	11
Figure 2 : Chargement en blé d'un cargo au port de Rouen	19
Figure 3 : Localisation des cultures de blé tendre et leur rendement dans le monde.....	21
Figure 4 : Rendements, production mondiale (A) et surfaces en blé (B) depuis 1961	22
Figure 5 : "Commerce mondial du blé : un jeu d'interdépendance"	26
Figure 6 : Surfaces en blé tendre en France.....	33
Figure 7 : Rendement moyen du blé tendre des départements français sur la période 2000-2018	34
Figure 8 : Le blé tendre produit en moyenne par départements (2000-2018).....	35
Figure 9 : Principaux ports exportateurs de grains de céréales (campagnes 2014/15 – 2018/19).	35
Figure 10 : Organisation des secteurs de la production (d'après Abecassis et Bergez, 2009)	38
Figure 11 : Evolution en France des rendements (A), productions (B), surfaces (C) du blé tendre de 1961 à 2019	39
Figure 12 : Orientations technico-économiques des exploitations agricoles normandes en 2010.	43
Figure 13 : La surface de blé tendre dans la SAU en Normandie en 2016	45
Figure 14 : Chiffre d'affaire global (A) et composition du produit végétal (aides comprises ; B) en Normandie	47
Figure 15 : Evolution des rendements de 1973 à 2019 en Normandie	48
Figure 16 : Localisation de la Plaine de Caen dans l'occupation du sol du Calvados	50
Figure 17 : Localisation de la Plaine de Caen : situation géographique et altimétrique	50
Figure 18 : L'espace de la Plaine de Caen : comparaison du découpage de la PRA avec celui effectuée à par photointerprétation	51
Figure 19 : Exclusion de l'interface Suisse-Normande/Plaine de Caen dans le découpage de l'espace d'étude.....	53
Figure 20 : Exclusion des marges du Pays d'Auge dans le découpage de l'espace d'étude	53
Figure 21 : Plaine de Caen débordant du découpage de la PRA	54
Figure 22 : Avancée de la Plaine de Caen en direction du Bessin.....	54
Figure 23 : Progression de la Plaine de Caen dans la vallée de la Seulles.....	55
Figure 24 : Principales occupations du sol agricole en Plaine de Caen en 2016	56
Figure 25 : Cartographie de la classification de la SAU de la Plaine de Caen suivant le RPG 2012 (Agrégation des îlots dans des grilles carrés de 2000m de côté – CAH selon la méthode de Ward)	58
Figure 26 : Cartographie du système agro-industriel de la Plaine de Caen (hors légumes)	61
Figure 27 : épis de blé en Normandie	65
Figure 28 : Principe de l'effet de serre (Météo-France)	67
Figure 29 : Evolution du forçage radiatif depuis 1880 (Hansen et al., 2011)	68
Figure 30 : Contribution des gaz à effet de serre au forçage radiatif en 2019.....	69
Figure 31 : Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans de 1850 à 2012 (IPCC, 2013) ;	70
Figure 32 : Evolution de la température de surface observée entre 1901 et 2012 (IPCC, 2013) ...	71
Figure 33 : Evolution des précipitations de 1901 à 2010 à la surface du globe (IPCC, 2013)	71
Figure 34 : Evolution de la banquise : valeur minimale observée.....	72
Figure 35 : Elévation du niveau des mers entre à l'échelle du globe entre janvier 1993 et mars 2015 à partir des mesures du satellite d'océanographie TOPEX-Poseidon (d'après le GIEC, AR5)	73

Figure 36 : Représentation conceptuelle du découpage en grille de l'atmosphère dans un modèle climatique global (d'après L. Fairhead. LMD. CNRS)	76
Figure 37 : Les RCP comparés aux précédents scénarios SRES (in Planton et al., 2013)	78
Figure 38 : Augmentation de la température moyenne en surface à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5)	79
Figure 39 : Evolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5)	80
Figure 40 : Les principaux ensembles climatiques de Normandie (Cantat in DREAL, 2020)	90
Figure 41 : Localisation des 8 stations normandes ayant pour période commune 1970-2020	91
Figure 42 : Détermination des dates de rupture pour les 8 stations normandes à partir du test de Pettitt sur la période 1970-2020	93
Figure 43 : Evolution des températures minimales, maximales et moyennes pour 8 stations normandes sur la période 2070-2020.....	94
Figure 44 : Evolution du cumul pluviométrique pour 8 stations normandes sur la période 2070-2020 (le trait central correspond à la moyenne de la période)	95
Figure 45 : Evolution de la température moyenne annuelle à Caen-Carpiquet.....	96
Figure 46 : Evolution de la température moyenne à Caen-Carpiquet pour les 4 saisons	97
Figure 47 : Evolution du nombre de jours de chaleur ($T_{\text{maxi}} \geq 25^{\circ}\text{C}$).....	98
Figure 48 : Evolution du nombre de jours de gel à Caen-Carpiquet de 1947 à 2020	98
Figure 49 : Evolution du cumul pluviométrique annuel à Caen-Carpiquet de 1945 à 2020	99
Figure 50 : Evolution du cumul pluviométrique à Caen-Carpiquet pour les 4 saisons.....	99
Figure 51 : Comparaison de la température minimale annuelle en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020)	100
Figure 52 : Comparaison de la température maximale annuelle en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020).....	101
Figure 53 : Evolution de la température à Caen de 1950 à 2100 : projection à partir des scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	101
Figure 54 : Comparaison du nombre de jours de gel annuel ($T_{\text{mini}} \leq 0^{\circ}\text{C}$) en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020).....	103
Figure 55 : Comparaison du nombre de jours de chaleur annuel ($T_{\text{maxi}} > 25^{\circ}\text{C}$) en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020).....	103
Figure 56 : Comparaison du cumul annuel de précipitations en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020)	104
Figure 57 : Comparaison du nombre de jours de précipitations significatives ($P \geq 1 \text{ mm/jour}$) en Normandie de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020)	105
Figure 58 : Comparaison du cumul de précipitations entre octobre et mars (« morte saison ») en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020)	105
Figure 59 : Comparaison du cumul de précipitations entre avril et septembre (« saison végétale ») en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Beauvais et Cantat in DREAL, 2020)	106

Figure 60 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin) (Cantat et <i>al.</i> , 2021)	106
Figure 61 : sécheresse des sols : période actuelle et horizon 2100 pour le scénario A1B.....	108
Figure 62 : Pluviomètre et enregistreur de température dans une parcelle de blé tendre à Anguerny	113
Figure 63 : Modèle conceptuel de l'agrosystème sur lequel repose le projet de recherche	119
Figure 64 : Entrées choisies pour l'étude de l'agrosystème et la détermination des terrains d'étude	121
Figure 65 : « Organigramme des relations climat/sociétés. Les apports du géographe climatologue » (Cantat, 2006).....	122
Figure 66 : Les principaux stades phénologiques du blé tendre et son itinéraire technique (d'après La France Agricole).....	124
Figure 67 : Schéma d'élaboration du rendement du blé tendre d'hiver en fonction des stades phénologiques (d'après Arvalis).....	124
Figure 68 : Symptômes sur blé tendre des impacts du gel hivernal et des basses températures à la méiose	126
Figure 69 : Grains restreints en raison de l'échaudage thermique.....	127
Figure 70 : Symptômes des effets du déficit hydrique sur le blé tendre.....	128
Figure 71 : Excès d'eau et symptômes sur le blé tendre	129
Figure 72 : Verse du blé tendre (illustration Arvalis - L'Institut du Végétal)	130
Figure 73 : Grain de blé tendre germé	131
Figure 74 : Le bilan hydrique dans le bilan hydrologique.....	141
Figure 75 : « Les deux « plateaux » de la balance hydrique : un équilibre entre les disponibilités et les besoins en eau des plantes, régulé par la réserve agricole utile » (Cantat et <i>al.</i> , 2009)	142
Figure 76 : Comparaison de l'évapotranspiration potentielle calculée à partir des formules de Penman-monteith et de Turc sur la normale 1981-2010 (données Météo France de Caen-Carpiquet)	144
Figure 77 : Evolution du coefficient cultural au cours du cycle d'une culture (Allen et <i>al.</i> , 1998)	145
Figure 78 : Localisation des stations Météo France en Plaine de Caen et de Falaise	148
Figure 79 : Descente d'échelle de la simulation CNRM-2014 (Drias, site internet)	149
Figure 80 : Moyenne annuelle des indicateurs climatiques sur la période 1976-2005 du modèle ALADIN-Climat : cumul pluviométrique en mm (A), nombre de jours de pluie (B)	150
Figure 81 : Moyenne annuelle des indicateurs climatiques sur la période 1976-2005 du modèle ALADIN-Climat : température minimale en °C (A), température maximale en °C (B), jours de gel (C) et de chaleur (D)	151
Figure 82 : Comparaison des principaux paramètres climatiques simulés avec ALADIN-Climat et WRF par rapport au modèle SAFRAN et à la station météorologique de Caen-Carpiquet sur la période 1976-2005.....	154
Figure 83 : Comparaison du rayonnement global et de l'ETP Turc calculée avec ALADIN-Climat rapport à celle du modèle SAFRAN et de la station Caen-Carpiquet sur la période 1976-2005..	155
Figure 84 : Comparaison à l'échelle intra-annuelle de l'évolution des principaux paramètres climatiques simulés avec ALADIN-Climat et WRF par rapport au modèle SAFRAN et à la station météorologique de Caen-Carpiquet sur la période 1976-2005.....	156
Figure 85 : Comparaison de l'évolution de la température minimale observée (modèle SAFRAN) et simulée des modèles ALADIN-Climat et WRF sur leurs périodes historiques à partir du test d'homogénéité de Pettitt	157

Figure 86 : Comparaison de l'évolution de la température maximale observée (modèle SAFRAN) et simulée des modèles ALADIN-Climat et WRF sur leurs périodes historiques à partir du test d'homogénéité de Pettitt	157
Figure 87 : Comparaison de la comptabilité des jours d'échaudage thermique et des dates relatives au stade grain pâteux (2020 à 2500°CJ) avec et sans correction des données du modèle ALADIN	159
Figure 88 : Carte des réserves utiles des sols agricoles du Calvados (Le Gouée, 2008).....	162
Figure 89 : Système d'irrigation à Cauvicourt (sud de Caen) le 29 avril 2017.....	163
Figure 90 : Situation des fosses pédologiques dans l'occupation du sol du Calvados.....	164
Figure 91 : Localisation des fosses pédologiques d'Anguerny (A) et de Fierville-Bray (B) sur la carte topographique de l'IGN (Scan 25)	165
Figure 92 : Protocole d'échantillonnage de la fosse pédologique d'Anguerny le 2 avril 2019	168
Figure 93 : Protocole d'échantillonnage de la fosse pédologique de Fierville-Bray le 29 juin 2020	169
Figure 94 : Localisation des instruments de mesures et des relevés effectués dans la parcelle d'Anguerny (14)	173
Figure 95 : Environnement de la parcelle d'Anguerny à 360°	174
Figure 96 : Environnement de l'enregistreur de température BARANI et du pluviomètre.....	175
Figure 97 : Disposition des data logger en haut et en bas e la parcelle	176
Figure 98 : Evolution de la pousse des plants de blé tendre de la germination à la fin du tallage	179
Figure 99 : Evolution de la pousse des plants de blé tendre de la germination à la fin du tallage	180
Figure 100 : Photographies des trois sondages tarières réalisés sur la parcelle d'Anguerny.....	181
Figure 101 : Caractéristiques pédologiques des trois sondages tarière à main réalisés sur la parcelle	182
Figure 102 : Sondages pédologiques à l'aide de la tarière à gouge et prélèvements.....	183
Figure 103 : Localisation des sondages effectués à l'aide de la tarière à gouge par rapport à la fosse pédologique.....	184
Figure 104 : Carte de localisation des sièges des exploitations des agriculteurs rencontrés et des communes en lesquelles ils disposent de terres destinées aux grandes cultures en Plaine de Caen	189
Figure 105 : Présentation de l'échantillon enquêté.....	192
Figure 106 : Synthèse de la méthode et de l'approche bioclimatique construit dans le cadre de la thèse.....	196
Figure 107 : Plaine d'Audrieu le 4 août 2019 après la moisson	205
Figure 108 : Caractéristiques des variétés de blé tendre disponibles sur le site d'Arvalis (exemple de la variété Chevignon)	208
Figure 109 : Contraste biopédoclimatique entre le nord et le sud de la Plaine de Caen.....	209
Figure 110 : Exposition différentielle à l'échaudage thermique en Plaine de Caen pour différentes précocités de blé tendre d'hiver - exemple de l'année 2006	211
Figure 111 : Irrigation du lin de printemps le 20 mai 2020 à Lasson	214
Figure 112 : Les précipitations journalières entre le 1 ^{er} octobre 2019 et le 31 décembre 2019 à Caen	218
Figure 113 : Les inquiétudes des céréaliers (question ouverte 10a)	221
Figure 114 : Evolution du prix annuel du blé de 1966 à 2016.....	222
Figure 115 : Leviers d'adaptation au changement climatique envisagés par les exploitants agricoles et nombre de fois où ils furent cités	247
Figure 116 : Bottes de paille à Saint-Manvieu-Norrey après la récolte du blé le 06 août 2018.....	251

Figure 117 : Evolution du cumul pluviométrique sur les mois d'octobre, novembre et décembre sur la période 1959-2020 à Caen	252
Figure 118 : Blé semé sur un sol ressuyé à Anguerny	253
Figure 119 : Evolution de la succession des jours de secs durant la période 1959-2020 sur les mois d'octobre, novembre et décembre à Caen	254
Figure 120 : Evolution des surplus hydrologiques aux mois d'octobre, novembre et décembre de 1960 à 2020.....	255
Figure 121 : Evolution du nombre de jours de gelées à -5 °C en décembre et en janvier de 1959 à 2020 en Plaine de Caen.....	257
Figure 122 : Evolution des jours de gelées à -4 °C au mois de février de 1958 à 2020 en Plaine de Caen.....	258
Figure 123 : Evolution du nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 4 °C au cours du mois de mai de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	259
Figure 124 : Evolution du nombre de jours de vernalisation pour les mois de décembre à mars de 1959 à 2020 en Plaine de Caen	260
Figure 125 : Evolution du rayonnement cumulé pour les mois d'avril-mai et de juin-juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen.....	261
Figure 126 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique pour les mois de mai, juin et juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen.....	262
Figure 127 : Evolution de l'ETP et du cumul pluviométrique entre le 1 ^{er} avril et le 31 juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen.....	264
Figure 128 : Déficit hydrique cumulé entre le 1 ^{er} avril et le 31 juillet de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	265
Figure 129 : Remplissage des grains de blé tendre sur les petits sols.....	266
Figure 130 : Evolution de la RUD au pas de temps mensuel de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	267
Figure 131 : Evolution des épisodes de succession des jours secs de 1959 à 2020 en Plaine de Caen	268
Figure 132 : Sol limoneux en Plaine de Caen (Anguerny le 11/02/2019) soumis à la battance...269	269
Figure 133 : Conséquences des surplus hydrologiques stagnant en surface du sol sur deux parcelles au Mesnil-Patry (14) au cours de l'hiver 2020	270
Figure 134 : Surplus hydrologiques cumulés du 1 ^{er} décembre au 31 mars de 1960 à 2020 en Plaine de Caen	271
Figure 135 : Evolution du nombre de jours de précipitations et cumul journalier associé pour les mois de juin et de juillet de 1959 à 2020 en Plaine de Caen.....	272
Figure 136 : Verse du blé tendre d'hiver dans plusieurs parcelles de la Plaine de Caen en 2021 .273	273
Figure 137 : Evolution du nombre de jours de précipitations significatives en juillet et en août de 1961 à 2020.....	274
Figure 138 : Sommes de températures cumulées au 31 mars et au 31 juillet depuis le 25 octobre de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	275
Figure 139 : Récolte du blé par temps sec à Anguerny le 02 août 2019.....	276
Figure 140 : Evolution des conditions climatiques et pédoclimatiques pour les travaux de semis aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP en Plaine de Caen.....	280
Figure 141 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 3 jours secs consécutifs entre le 1 ^{er} octobre et le 31 décembre de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP.....	281
Figure 142 : Evolution du nombre de jours disponibles pour la vernalisation du 1 ^{er} décembre au 31 mars aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP.....	284
Figure 143 : Evolution du rayonnement cumulé entre le 1 ^{er} avril et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP.....	285

Figure 144 : Evolution des jours d'échaudage entre le 1 ^{er} mai et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP	286
Figure 145 : Evolution de la fréquence des températures maximales au mois de mai en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP (totalité des Normales climatiques de 30 années)	287
Figure 146 : Evolution de la fréquence des températures maximales au mois de juin en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP (totalité des Normales climatiques de 30 années)	288
Figure 147 : Evolution du contexte biopédoclimatique à l'horizon 2100 en Plaine de Caen selon 2 scénarios RCP	291
Figure 148 : Evolution du déficit hydrique le 1 ^{er} avril et le 31 juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP	292
Figure 149 : Evolution du cumul pluviométrique des mois de juillet d'août en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP.....	294
Figure 150 : Evolution du nombre de jours de pluies significatives au cours des mois de juillet d'août en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP.....	295
Figure 151 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 5 jours secs consécutifs entre le 1 ^{er} juillet et le 31 août de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP.....	296
Figure 152 : Evolution du nombre d'épisodes comptant au moins 10 jours secs consécutifs entre le 1 ^{er} juillet et le 31 août de 1960 à 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP.....	296
Figure 153 : Evolution de la somme de température entre le 1 ^{er} novembre et le 31 juillet en Plaine de Caen de 1961 à 2100 à partir des données SAFRAN et CNRM-2014 selon trois scénarios RCP	298
Figure 154 : Parcelle de blé tendre à Fontaine-Henry le 20 juillet 2019.....	303
Figure 155 : Evolution de la durée des phases phénologiques et du cycle entier du blé tendre de 1961 à 2020.....	305
Figure 156 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique entre 1961 à 2020 en Plaine de Caen	307
Figure 157 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé en Plaine de Caen pour un sol profond et mince de 1961 à 2020.....	308
Figure 158 : Evolution du déficit hydrique au cours de la montaison et du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	308
Figure 159 : Evolution du rayonnement global cumulé et du quotient photothermique au cours de la montaison et du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	311
Figure 160 : Evolution du nombre de jours de précipitations dans les 15 jours suivant la date de maturité récolte de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	312
Figure 161 : Evolution des excès d'eau en surface du sol du semis au stade épi 1 cm de 1961 à 2020 en Plaine de Caen	313
Figure 162 : Evolution de la durée moyenne des périodes phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP.....	316
Figure 163 : Evolution de la date moyenne d'apparition des stades phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon 3 scénarios RCP.....	316
Figure 164 : Evolution de la température moyenne au cours des stades phénologiques du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP.....	317
Figure 165 : Evolution du nombre de jours de vernalisation entre la levée et le stade épi 1 cm aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon trois scénarios RCP	318

Figure 166 : Evolution du nombre de jours d'échaudage thermique entre l'épiaison et la maturité physiologique du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	319
Figure 167 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	320
Figure 168 : Evolution du rendement théorique du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP (équation de réponse de la variété Arminda à l'interaction température x déficit hydrique)	322
Figure 169 : Evolution du rayonnement cumulé lors de la montaison et du remplissage des grains du blé tendre d'hiver en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	325
Figure 170 : Evolution des excès d'eau en surface du sol entre le semis et le stade 2 nœuds en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	326
Figure 171 : Evolution du nombre de jours de pluie dans les 15 jours succédant la maturité récolte en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	328
Figure 172 : Evolution des principaux stades de la phénologie du blé tendre et des principaux indicateurs phénoclimatiques associés aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon le scénario RCP 8.5	331
Figure 173 : Station météorologique disposée dans un champ de blé tendre d'hiver	341
Figure 174 : Diagrammes ombrothermique pour 5 stations météorologiques de la Plaine de Caen sur la période 2002-2020	344
Figure 175 : Comparaison de température entre 4 stations de la Plaine de Caen le 25 juin 2020	345
Figure 176 : Comparaison de la date des stades phénologiques et du nombre de jours d'échaudage thermique du blé tendre pour 5 points de grille de la maille SAFRAN 8x8 km en Plaine de Caen sur la période historique 1976-2005	348
Figure 177 : Altitude des mailles SAFRAN 8x8 km comparée au MNT 25 m de l'IGN	349
Figure 178 : Prévision météorologique de la température le 24 juillet 2019 à 15h à partir du modèle AROME de Météo-France (maille de 1,3 km)	350
Figure 179 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps entre Hermanville et Périers-sur-le-Dan projetée sur le MNT de l'IGN	352
Figure 180 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps entre Hermanville et Périers-sur-le-Dan projetée sur l'image satellite	353
Figure 181 : Evolution de la température et de l'altitude de 14h18 à 15h20 UTC + 2h associées au transect entre Hermanville-sur-Mer et Périers-sur-le-Dan	354
Figure 182 : Evolution de la température dans la partie la plus abritée du transect de 14h59 à 15h20 UTC + 2h (vue 3D Google Earth)	354
Figure 183 : Localisation et photographie des trois sondes de températures fixes disposées sur le transect de 13h51 à 15h36 UTC + 2h	355
Figure 184 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps dans la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey projetée sur le MNT de l'IGN	357
Figure 185 : Evolution de la température mesurée en itinérance par beau temps dans la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey projetée sur l'image satellite	358
Figure 186 : Evolution de la température dans la parcelle de blé tendre la plus abritée du transect de la Plaine de Saint-Manvieu-Norrey	359
Figure 187 : Evolution de la température et de l'altitude de 15h09 à 16h05 (UTC + 2h) associées au transect de la Plaine agricole de Saint-Manvieu-Norrey	359
Figure 188 : Data logger accroché sur l'antenne de l'automobile	360
Figure 189 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 15 avril 2021	362

Figure 190 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l’Odon le 19 avril 2021	364
Figure 191 : Evolution de la température sur le transect du 19 avril 2021 à Epinay-sur-Odon...	365
Figure 192 : Evolution de la température sur le transect du 19 avril 2021 à Parfouru-sur-Odon	365
Figure 193 : Photographies associées au secteur le plus froid du transect du 15 avril 2021	367
Figure 194 : Parcelle de colza en floraison dans le fond de vallée d’Epinay-sur-Odon le 19 avril 2021 à 06h49 (température relevée in situ : -3,6 °C)	368
Figure 195 : Comparaison de température entre le haut et le bas de la parcelle d’Anguerny du 24 juin au 1 ^{er} juillet 2019	371
Figure 196 : Différence d'avancement de la phénologie entre le haut et le bas de la parcelle le 15 avril 2019 à Anguerny	373
Figure 197 : Enregistreur de température et pluviomètre sur la parcelle de blé tendre d'Anguerny	375
Figure 198 : Evolution de la température sur la parcelle d'Anguerny du 15 novembre 2018 au 02 août 2019 lors des différentes phases phénologiques du blé tendre d'hiver observées au champ	376
Figure 199 : Evolution de la pluviométrie sur la parcelle d'Anguerny du 15 novembre 2018 au 02 août 2019 lors des différentes phases phénologiques du blé tendre d'hiver observées au champ	378
Figure 200 : Sondage à la tarière à gouge le 24 juin 2019 à Anguerny.....	379
Figure 201 : Evolution de la RUDT comparée aux valeurs théoriques acquises avec le bilan hydrique	382
Figure 202 : Coucher de soleil en Plaine de Caen sur un champ d'orge	387
Figure 203 : Site retenus pour l’étude et part de la Surface Agricole utilisée par le blé à l’échelle française (données du registre Parcellaire Graphique 2016 de l’ASP).....	388
Figure 204 : Diagrammes ombrothermiques, nombre de jours de gelées et de chaleur sur la période de référence 1976-2005	391
Figure 205 : Evolution des conditions biopédoclimatiques à Niort à l’horizon 2100 pour deux scénarios RCP d’après un bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile (ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux – données CNRM-2014)	394
Figure 206 : Evolution du nombre de jours d’échaudage thermique (Tx25) cumulés de la méiose à la maturité physiologique du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP	397
Figure 207 : Evolution du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP	398
Figure 208 : Evolution du nombre de jours disponibles pour la vernalisation du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP	404
Figure 209 : Synthèse par approche experte de l’évolution de la vulnérabilité du blé aux aléas climatiques sur les 7 sites français étudiés entre la période de référence 1976-2005 et l’horizon lointain 2071-2100 pour deux scénarios RCP.....	406
Figure 210 : La floraison du lin fibre de printemps en Plaine de Caen	408
Figure 211 : Carte de la production de lin fibre en France et localisation du site étudié.....	409
Figure 212 : Rouissage du lin fibre de printemps à Tessel le 09 juillet 2020	410
Figure 213 : Verse du lin fibre de printemps le 23 juin 2021	411
Figure 214 : Evolution possible de la durée des périodes phénologiques du lin fibre de printemps en Plaine de Caen d’ici 2100 avec les modèles ALADIN-Climat et WRF	413
Figure 215 : Comparaison de la période de référence (1976-2005) avec la période lointaine (2071-2100) des valeurs associées : à la durée du cycle du lin fibre de printemps, de son déficit hydrique,	

du nombre de jours de chaleur et de la température moyenne durant la phase « floraison-maturité des fibres ».....	414
Figure 216 : Photographies post averses de grêle et gelées pour une parcelle de colza en Plaine de Caen le 7 avril 2021	421
Figure 217 : Alvéographe (A) et alvéogramme (B).....	478
Figure 218 : La Plaine de Caen le 20 juillet 2019 à Fontaine-Henry (photographie : F.Beauvais)	480
Figure 219 : Exploitation maraichère à Coulomb.....	480
Figure 220 : Exploitation de la "Grande ferme" maraichère à Fontenay le Marmion	481
Figure 221 : Champ de colza le 18 avril 2021 à Carcagny (photographie : F. Beauvais)	482
Figure 222 : Surface en herbe autour d'un siège d'exploitation au nord-ouest de la Plaine de Caen à Cristot (lieu-dit « Le Hamel »)	482
Figure 223 : Prairies et bois au sud-ouest de la Plaine de Caen dans la vallée du Laizon.....	483
Figure 224 : Les "Arpents du soleil" - Vignoble au sud-est de la Plaine de Caen (photographie : Ouest-France)	483
Figure 225 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Caen-Carpiquet et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14137001).....	486
Figure 226 : Localisations et emplacements successifs de la station de Caen-Carpiquet (source : Météo France, fiche de poste n° 14137001).....	486
Figure 227 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Bernières-sur-Mer et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14066001).....	487
Figure 228 : Localisations et emplacements successifs de la station de Bernières-sur-Mer (source : Météo France, fiche de poste n° 14066001).....	487
Figure 229 : : Paramètres climatiques disponibles à la station de Saint-Sylvain et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14659001).....	488
Figure 230 : Localisations et emplacements successifs de la station de Saint-Sylvain (source : Météo France, fiche de poste n°14659001)	488
Figure 231 : Paramètres climatiques disponibles à la station de L'Oudon-Lieury et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14624001).....	489
Figure 232 : Localisations et emplacements successifs de la station de L'Oudon-Lieury (source : Météo France, fiche de poste n°14624001)	489
Figure 233 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Damblainville et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14216001).....	490
Figure 234 : Localisations et emplacements successifs de la station de Damblainville (source : Météo France, fiche de poste n°14624001)	490
Figure 235 : Les grand types de climats français et diagrammes ombrothermiques associés	492
Figure 236 : <i>Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par</i>	493
Figure 237 : Test de Pettitt et comparaison de la température moyenne des périodes.....	494
Figure 238 : Evolution du nombre de gelées de 1961 à 2019 pour 8 villes françaises.....	495
Figure 239 : Evolution du nombre de chaleur de 1961 à 2019 pour 8 villes françaises.....	496
Figure 240 : Des vagues de froid moins nombreuses en moins intenses en France métropolitaine	497
Figure 241 : Des vagues de chaleur plus nombreuses et plus sévères en France métropolitaine.....	498
Figure 242 : Recul du glacier d'Ossoue dans le massif du Vignemale (Pyrénées françaises)	498
Figure 243 : Evolution du cumul pluviométrique sur la période 1960-2010.....	500
Figure 244 : Pourcentage annuel de la surface des sols touchée par la sécheresse en France métropolitaine sur la période 1959-2020	501

Figure 245 : Comparaison de la température moyenne annuelle en France sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	503
Figure 246 : Comparaison du nombre de jours de chaleur annuel ($T_{\text{maxi}} > 25^{\circ}\text{C}$) en France sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	504
Figure 247 : Comparaison du nombre de jours de gel annuel ($T_{\text{mini}} \leq 0^{\circ}\text{C}$) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	505
Figure 248 : Comparaison du cumul pluviométrique sur la période automnale et hivernale (octobre – mars) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	507
Figure 249 : Comparaison du cumul pluviométrique sur la période printanière et estivale (avril - septembre) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	508
Figure 250 : Comparaison du profil bioclimatique du printemps et de l'été sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100	509
Figure 251 : Les 4 sites représentatifs des plaines agricoles normandes sur la carte du blé	514
Figure 252 : Evolution des principaux indicateurs phénoclimatiques du blé tendre pour quatre sites normands sur la période 1961-2020	516
Figure 253 : Images infrarouges relatives à la nuit du 15 avril 2021 et photographie du ciel avant le lever du jour	518
Figure 254 : Images infrarouges relatives à la nuit du 19 avril 2021 et photographie du ciel avant le lever du jour	519
Figure 255 : Evolution de la température mesurée non corrigée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 15 avril 2021	520
Figure 256 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 19 avril 2021	521
Figure 257 : Evolution de la température et de l'altitude relatives au transect du 15 avril 2021 dans la vallée de l'Odon	522
Figure 258 : Evolution de la température et de l'altitude relatives au transect du 19 avril 2021 dans la vallée de l'Odon	523
Figure 259 : Haie composée d'arbres de hauts jets sur les hauteurs de Parfouru-sur-Odon	524
Figure 260 : Précipitations relevées aux stations Météo-France de Caen-Carpiquet et de Bernières-sur-Mer comparées à celles de la station expérimentale d'Anguerny.....	525
Figure 261 : Comparaison de la température moyenne annuelle et du cumul pluviométrique annuel du point de grille SAFRAN (période 1976-2005 du scénario historique des données CNRM-2014) retenu avec les huit points voisins pour les 7 sites céréaliers.....	529
Figure 262 : Localisation des parcelles observées.....	531
Figure 263 : Comparaison du stade phénologique observé pour la parcelle 4 en comparaison au stade de la parcelle 5 à Saint-Manvieu-Norrey	532

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les plus grands producteurs de blé tendre dans le monde.....	24
Tableau 2 : Débouchés de la production de blé tendre mise sur le marché	30
Tableau 3 : Exigences requises pour la fabrication de différents produits de la boulangerie viennoiserie-pâtisserie	31
Tableau 4 : Moyenne de la qualité des blés tendres des régions françaises sur la période 2004-2018	32
Tableau 5 : Evolution en France des rendements, productions, surfaces du blé tendre par décennies de 1961 à 2019	40
Tableau 6 : Les cinq premières cultures normandes	42
Tableau 7 : Principales céréales cultivées en Normandie (2016 – 2020).....	46
Tableau 8 : Comparaison de la répartition de l'assolement de la Plaine de Caen entre 2012 et 2016	57
Tableau 9 : Classification de la SAU de la Plaine de Caen - tableau des écarts types complémentaire à la cartographie.....	59
Tableau 10 : Forçage radiatif, concentration en ppp et trajectoire des quatre scénarios RCP.....	78
Tableau 11 : Évolution projetée de la moyenne de la température de l'air à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen des mers pour le milieu et la fin du XXIe siècle par rapport à la période de référence 1986-2005 (AR5, 2014 ; moyennes multi-modèles CMIP5).....	80
Tableau 12 : Evolution de la température de l'air sur 50 ans (de 1970 à 2020), calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 8 stations météorologiques régionales	92
Tableau 13 : Indicateurs agroclimatiques retenus et conséquences associées	133
Tableau 14 : Synthèse des indicateurs phénoclimatiques étudiés associés à des pertes de productions	135
Tableau 15 : Sommes de températures relatives à la phénologie du blé tendre en France.....	136
Tableau 16 : Notes de précocité attribuées aux variétés de blé tendre à la montaison et à l'épiaison (d'après Arvalis-L'Institut du Végétal).....	137
Tableau 17 : Note d'alternativité des variétés de blé tendre et exigence en vernalisation associée (d'après LG Semences).....	137
Tableau 18 : Sommes de températures relatives aux stades phénologiques relevés au champ à Anguerny pour le mélange variétal semé le 15 novembre 2018	139
Tableau 19 : Les 10 premières variétés de blé tendre semées en Normandie en 2019	139
Tableau 20 : Caractéristiques des variétés expérimentées.....	140
Tableau 21 : Coefficient cultural selon le stade de développement du blé tendre (d'après la Chambre d'Agriculture de Seine et Marne et Arvalis L'Institut du végétal)	145
Tableau 22 : Comparaison de la durée du cycle du blé tendre et des indicateurs climatiques associés sur la période de référence 1976-2005 entre les données observées et les simulations historiques des modèles ALADIN et WRF avec et sans correction.....	158
Tableau 23 : Humidité w terrain, pF 2,0 et 4,2 (humidité pondérale) pour les sites d'Anguerny et de Fierville-Bray déterminées à l'aide de la presse à membrane et de l'extracteur à plaque (moyenne des 8 répétitions)	170
Tableau 24 : Valeur des densités apparentes en g/cm ³ des prélèvements effectués à Anguerny (02 avril 2019) et Fierville-Bray (29 juin 2020).....	171

Tableau 25 : Ensemble des variables mesurées par tranche de sol recoupées à partir des valeurs de DA et des prélèvements de mottes avec le RUM calculé correspondant	172
Tableau 26 : Détermination des stades phénologiques selon le protocole	177
Tableau 27 : Organisation des entretiens effectués lors de l'enquête (la codification des exploitants ne respecte pas l'ordre chronologique des entretiens mais celui relatif à la première prise de contact)	188
Tableau 28 : Déficit hydrique moyen et nombre de jours d'échaudage thermique pour le blé tendre en Plaine de Caen selon différentes précocités sur la Normale 1991-2020 pour un sol mince	212
Tableau 29 : Réponse des exploitants agricoles de la Plaine de Caen à la.....	227
Tableau 30 : Synthèse des évolutions constatées par les exploitants agricoles enquêtés au cours des questionnaires et entretiens (2016)	228
Tableau 31 : Evolution du nombre de jours de gelées au seuil de -5 °C au cours du mois de décembre aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen.....	281
Tableau 32 : Evolution du nombre de jours de gelées au seuil de -10 °C au cours des mois de janvier et de février aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen	282
Tableau 33 : Evolution du nombre de jours de basses températures au seuil de 4 °C au cours au cours du mois de mai aux horizons 2050 et 2100 pour 3 scénarios RCP en Plaine de Caen	283
Tableau 34 : Evolution des fortes chaleurs (Tx 30) au cours des mois de mai et de juin aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP	289
Tableau 35 : Evolution des fortes précipitations au cours des mois de juin et de juillet aux horizons 2050 et 2100 en Plaine de Caen selon 3 scénarios RCP	293
Tableau 36 : Synthèse de l'exposition du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 à partir d'une approche agroclimatique.....	300
Tableau 37 : Température moyenne en °C au cours des principales périodes phénologiques du blé tendre d'hiver entre 1961-1990 et 1991-2020.....	305
Tableau 38 : Occurrence de basses températures au cours de la période proche méiose pollinique en Plaine de Caen sur la période 1961-2020.....	310
Tableau 39 : Occurrence des jours de fortes précipitations au cours du remplissage des grains de 1961 à 2020 en Plaine de Caen.....	313
Tableau 40 : Evolution du confort hydrique du blé tendre d'hiver au cours de ses principales périodes phénologiques en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	321
Tableau 41 : Evolution de l'occurrence de températures minimales inférieures ou égales à 4 °C en Plaine de Caen sur la période proche de la méiose aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	323
Tableau 42 : Evolution du quotient photothermique des phases phénologiques comprises entre le stade épi 1 cm et la maturité physiologique en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP	325
Tableau 43 : Evolution de l'occurrence des fortes précipitations journalières aux seuils de 10 et 20 mm entre le stade grain laiteux et la maturité physiologique en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 selon trois scénarios RCP.....	327
Tableau 44 : Synthèse de l'exposition du blé tendre en Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 à partir d'une approche phénoclimatique	330
Tableau 45 : Comparaison du nombre de jours de chaleur et d'heures ≥ 25 °C pour 4 stations de la Plaine de Caen du 1er au 30 juin 2020	345
Tableau 46 : Date de réalisation des stades phénologiques du blé tendre d'hiver pour 5 stations météorologiques de la Plaine de Caen sur la période 2002-2021	346

Tableau 47 : Orientation et force du vent (moyenne et rafale) du 24 juin au 1er juillet 2019 à la station Météo-France de Caen-Carpiquet.....	372
Tableau 48 : Comparaison des dates des stades phénologiques observées au champ sur la parcelle d'Anguerny avec celles calculées sur la Normale 1991-2020	374
Tableau 49 : Comparaison du confort hydrique de l'année 2018-2019 avec le confort hydrique moyen de la Normale climatique 1991-2020.....	377
Tableau 50 : Teneurs en eau calculées à partir des échantillons prélevés sur la parcelle d'Anguerny	380
Tableau 51 : RUDT (Terrain) calculées à partir des échantillons prélevés sur la parcelle d'Anguerny	380
Tableau 52 : Codification employée pour qualifier les RUD présentées.....	381
Tableau 53 : Sommes de températures retenues en fonction des dates d'apparition des stades phénologiques propres à chaque site en période de référence	389
Tableau 54 : Evolution de 5 indicateurs climatiques pour les sites étudiés entre la période de référence et l'horizon 2100 à partir de deux scénarios RCP (simulation CNRM-2014).....	393
Tableau 55 : Déficit hydrique annuel attendu pour les sols des 7 plaines agricoles étudiées à l'horizon 2100 pour deux scénarios RCP d'après un bilan hydrique à décroissance logarithmique de la réserve utile (ETP Turc sans prise en compte de coefficients culturaux)	394
Tableau 56 : Evolution de la date de maturité physiologique pour une date de semis le 20 octobre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP	395
Tableau 57 : Evolution du rayonnement cumulé pendant la montaison et le remplissage des grains (en cal/cm ² /jour entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP	400
Tableau 58 : Evolution du quotient photothermique du stade 2 nœuds à floraison en cal/cm ² /degrés jour entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP.....	401
Tableau 59 : Occurrence d'au moins une journée avec une température minimale inférieure ou égale à 4°C pendant la période proche méiose (+/- 6 jours) et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même période.....	402
Tableau 60 : Evolution de l'occurrence de jours de pluie où le cumul pluviométrique est supérieur ou égal à 20 mm : nombre d'année avec au moins une occurrence et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même période	403
Tableau 61 : Facteurs limitants pour les productions de lin fibre de printemps et indicateurs associés	412
Tableau 62 : Evolution possible du nombre d'années concernées par au moins une journée où les précipitations sont supérieures ou égales à 10 mm et 20 mm durant les périodes « 10 cm - floraison » et « floraison – maturité » et nombre de jours moyens	416
Tableau 63 : Nombre d'année avec au moins une occurrence de basses températures sur la période proche méiose pollinique et le nombre de jours maximum associé dans les plaines céréalières Normandes	517
Tableau 64 : Présentation des sols retenus pour les 7 sites étudiés.....	526
Tableau 65 : Caractéristiques des sols retenues pour la détermination du RUM.....	527
Tableau 66 : Photographies des profils de sol des plaines agricoles étudiées.....	528
Tableau 67 : Comparaison des données de température minimales et maximales du scénario historique CNRM-2014 avec celles observées du modèle SAFRAN sur la période 1960-2005 (Avec : Anr = année de rupture (test de Pettit) ; prr = période pré-rupture ; por = période.....	530

Tableau 68 : Comparaison de la durée du cycle du blé simulé avec les données CNRM-2014 sans et avec correction par rapport aux simulations réalisées avec les données du modèles SAFRAN sur la période de référence 1976-2005 (Avec : dr = durée du cycle ; sc = sans co	530
Tableau 69 : Stades observés le 9 mai, 17 mai et 11 juin dans les 7 parcelles à Saint-Manvieu-Norrey	531

Table des matières

Sommaire	3
Remerciements	5
Introduction générale	9
Partie 1. Changement climatique et céréaliculture : contextualisation, état de l'art et méthodologie	17
Introduction	17
Chapitre 1. Le blé : une céréale au centre d'enjeux à différentes échelles	19
Introduction.....	19
1.1. Les enjeux alimentaires, économiques et géopolitiques du blé dans le monde	20
1.1.1. La plante cultivée la plus spatialement répandue dans le monde.....	20
1.1.2. L'augmentation de la production mondiale pour satisfaire la demande alimentaire.....	21
1.1.3. Les principaux acteurs du marché du blé : producteurs, exportateurs et importateurs	24
1.1.4. Satisfaire la demande alimentaire mondiale : un défi du XXI ^e siècle.....	27
1.2. Le blé en France : une culture majeure de la filière céréalière.....	29
1.2.1. Poids économique et organisation de la filière céréalière.....	29
1.2.2. Les débouchés du blé tendre en France.....	29
1.2.3. Le blé dans le territoire français	32
1.2.4. La culture de blé en France : une productivité qui stagne à partir des années 1990.....	36
1.3. La Normandie : une région productrice de blé tendre	40
1.3.1. La Normandie : une région productrice de blé tendre	41
1.3.1.1. Le blé tendre dans la SAU Normande.....	41
1.3.1.2. Productions normandes et poids économique de la filière céréalière.....	46
1.4. La plaine de Caen : une plaine de grandes cultures en Normandie.....	49
1.4.1. Situation géographique.....	49
1.4.2. Une plaine agricole de grandes cultures	50
1.4.3. Le système agro-alimentaire des grandes cultures en Plaine de Caen : une déconnexion entre production, transformation et consommation ?.....	59
Conclusion du chapitre 1	63
Chapitre 2. Le changement climatique : une menace pour la céréaliculture normande ? 65	65
Introduction.....	65
2.1. Le changement climatique : définition, cause et observations à l'échelle mondiale	66

2.1.1. Changement climatique : de quoi parle-t-on ?	66
2.1.2. Les causes du changement climatique (contemporain)	66
2.1.2.1. Effet de serre naturel et bilan radiatif	66
2.1.2.2. L'effet de serre additif	67
2.1.3. Les observations du changement climatique à l'échelle globale.....	69
2.1.4. Les évolutions attendues pour le futur.....	73
2.1.4.1. Le recours à la modélisation prédictive du climat.....	74
2.1.4.2. Les scénarios en entrée des simulations climatiques	76
2.1.4.3. L'évolution du climat associée : synthèse du cinquième rapport du GIEC.....	78
2.1.5. Quelles sont les conséquences attendues sur la culture du blé tendre dans le monde ?	81
2.1.5.1. Plusieurs études exposant une réduction des rendements	81
2.1.5.2. Plusieurs études présentant une augmentation des rendements	83
2.1.5.3. Evolution des conditions climatiques vécues par la plante	84
2.2. Le changement climatique en Normandie	88
2.2.1. Le climat de Normandie.....	88
2.2.2. Le changement climatique observé en Normandie.....	91
2.2.3. Evolutions à l'horizon 2100	100
2.4. Constat d'un besoin de recherche sur les conséquences du changement climatique pour l'agriculture normande	108
Conclusion du chapitre 2.....	111
Chapitre 3. Méthodologie et données pour la recherche.....	113
Introduction.....	113
3.1. Concepts et posture épistémologique retenus pour étudier les conséquences du changement climatique sur l'agriculture.....	114
3.1.1. Les définitions du concept d'agrosystème pour l'étude des espaces agricoles.....	114
3.1.1.1 Les définitions de l'agrosystème d'après la littérature scientifique.....	114
3.1.1.2. Définition de l'agrosystème proposé dans le cadre de la thèse	116
3.1.2. Entrées spatiales, systémique et temporelles déclinées en sous-entrées agricoles et climatiques	119
3.2. Simulations bioclimatiques.....	123
3.2.1. Le cycle du blé tendre d'hiver et aléas climatiques impactant le rendement	123
3.2.2. Présentation des approches agroclimatiques et phénoclimatiques	131
3.2.2.1. Les indicateurs agroclimatiques	131
3.2.2.2. Les indicateurs phénoclimatiques.....	133
3.2.3. Le bilan hydrique	140
3.2.3.1. Capacité de rétention en eau des sols : quelques définitions.....	140
3.2.3.2. Définition du bilan hydrique.....	141

3.2.4. Les tests statistiques retenus	145
3.3. Données météorologiques observées et modélisées issues de la modélisation prédictive du climat	147
3.3.1. Les stations météorologiques de Météo France.....	147
3.3.2. Le modèle SAFRAN.....	148
3.3.3. Les données sorties du modèle ALADIN-Climat.....	149
3.3.4. Comparaison du climat observé au climat simulé par les modèles ALADIN-Climat et WRF : identification d'un biais froid.....	152
3.3.5. Conséquences du biais froid sur la simulation du cycle du blé tendre.....	158
3.4. Les données de terrain en entrée de la modélisation et estimation des limites du modèle	161
3.4.1. Relevés pédologiques dans le cadre de l'estimation du RUM pour le bilan hydrique	161
3.4.1.1. Contexte pédologique de la Plaine agricole et contraste NO/SE.....	161
3.4.1.2. Sélection de deux parcelles agricoles représentatives de l'enveloppe pédologique Caennaise	163
3.4.1.3. Estimation des RUM à partir du protocole RMQS2 (prélèvements, labo et calculs).....	166
3.4.2. Instrumentation d'une parcelle agricole : observation phénologique, climatique et pédologique	173
3.4.2.1. Présentation de la parcelle agricole	174
3.4.2.2. Disposition du pluviomètre et du data logger température - hygrométrie	175
3.4.2.3. Observation phénologique	177
3.4.2.4. Un RUM homogène sur l'ensemble de la parcelle : sondages exploratoires	181
3.4.2.5. Relevés pédologiques pour suivre l'évolution de la RUD	182
3.5. Enquête de terrain.....	185
3.5.1. Justification de la remobilisation d'une enquête réalisée en 2016	185
3.5.2. Présentation du protocole de l'enquête de 2016.....	187
3.5.3. Présentation de l'échantillon enquêté.....	191
3.6. Autres bases de données mobilisées.....	193
3.6.1. Les données agricoles.....	193
3.6.2. Les autres bases de données	193
Conclusion du chapitre 3.....	195
Conclusion de la partie 1.....	199
Partie 2. Les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre de 1961 à 2100 en Plaine de Caen	203
Introduction	203
Chapitre 4. Adaptation de l'agriculture aux conditions locales et évolutions climatiques observées par les céréaliers	205

Introduction.....	205
4.1. L'adaptation de l'agriculture au sol et au climat	206
4.1.1. Le choix des dates de semis du blé	206
4.1.2. Le choix des variétés selon le contexte pédoclimatique et le risque d'échaudage.....	207
4.1.3. L'irrigation est-elle pratiquée en Plaine de Caen pour compenser les faibles RUM ?	213
4.1.4. Le non labour et l'apport de matière organique pour retenir l'eau des sols.....	216
4.1.5. Prise en compte des sols et de la météo pour les interventions dans la parcelle.....	217
4.2. Le changement climatique : une inquiétude ?.....	221
4.2.1. Les inquiétudes immédiates	221
4.2.2. Des réactions partagées lors de l'évocation du changement climatique	224
4.3. Evolutions climatiques constatées par les exploitants agricoles	227
4.3.1. Des évolutions constatées par les exploitants agricoles.....	227
4.3.2. Anticipation des dates de semis.....	230
4.3.3. Douceur hivernale : risque de maladies et avancée de la végétation	231
4.3.4. Anticipation de la date de récolte.....	232
4.3.5. Des étés plus humides perturbant les récoltes	235
4.3.6. Une accentuation des déficits hydriques ?	237
4.3.7. Absence de changement d'occupation du sol.....	238
4.2.8. La souscription des assurances témoin des risques climatiques en Plaine de Caen ?	240
4.4. Les agriculteurs de la Plaine de Caen envisagent-ils l'adaptation au changement climatique ?.....	242
4.4.1. Le climat du futur en Plaine de Caen imaginé par les exploitants agricoles.....	242
4.4.2. L'absence actuelle d'adaptation au changement climatique.....	242
4.4.3. Quelle est l'adaptation envisagée par les agriculteurs pour l'avenir ?	244
Conclusion du chapitre 4.....	249
Chapitre 5. Evolutions agroclimatiques du blé tendre de 1961 à 2100.....	251
Introduction.....	251
5.1. Evolutions agroclimatiques sur la période historique 1961-2020.....	252
5.1.1. Absence d'évolution significative des conditions agroclimatiques pour les semis.....	252
5.1.2. Une faible pression gélive sur les stades de développement du blé	256
5.1.3. Maintien de la pression des basses températures à la méiose.....	258
5.1.4. Stabilisation du nombre de jours disponibles pour la vernalisation (entre +3 et +10 °C)	259
5.1.5. Augmentation du rayonnement cumulé lors de la montaison.....	260
5.1.6. Augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique.....	261
5.1.7. Augmentation du déficit hydrique	263
5.1.8. Evolution des surplus hydrologiques	268
5.1.9. Absence d'évolution significative des fortes précipitations	271
5.1.10. Baisse des jours disponibles pour les récoltes.....	273

5.1.11. Augmentation des sommes de températures disponibles	274
5.2. Evolutions agroclimatiques aux horizons 2050 et 2100.....	278
5.2.1. Légère amélioration des conditions de semis.....	278
5.2.2. Baisse de la pression liée aux gelées et aux basses températures.....	281
5.2.3. Baisse du nombre de jours de vernalisation	283
5.2.4. Hausse du rayonnement solaire cumulé entre avril et juillet	284
5.1.5. Augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique.....	285
5.1.6. Augmentation du déficit hydrique et réduction des surplus hydrologiques.....	289
5.1.7. Absence d'évolution significative des jours de fortes précipitations	293
5.1.8. Hausse des jours disponibles pour la moisson	293
5.2.9. Augmentation des sommes de températures	297
Conclusion du chapitre 5.....	301
Chapitre 6. Evolutions phénoclimatiques du blé tendre de 1961 à 2100.....	303
Introduction.....	303
6.1. Quelles évolutions phénoclimatiques sur la période 1961-2020 ?.....	304
6.1.1. Réduction de la durée du cycle et anticipation des stades phénologiques dans le calendrier ...	304
6.1.2. Légère diminution des jours disponibles pour la vernalisation	306
6.1.3. Augmentation du nombre de jours d'échaudage thermique.....	306
6.1.4. Stabilisation du déficit hydrique	307
6.1.5. Réduction des gelées au cours du cycle et des basses températures à la méiose	309
6.1.6. Augmentation du rayonnement et du quotient photothermique.....	310
6.1.7. Baisse des jours disponibles pour les récoltes	311
6.1.8. Absence d'évolutions significatives des excès d'eau en surface du sol	312
6.1.9. Absence d'évolution significative des fortes précipitations	313
6.2. Evolutions phénoclimatiques aux horizons 2050 et 2100	315
6.2.1. Anticipation de la phénologie et risque d'une infaisabilité du cycle	315
6.2.2. Hausse contenue de l'échaudage thermique.....	319
6.2.3. Réduction du déficit hydrique cumulé et amélioration du confort hydrique.....	320
6.2.4. Une diminution des gelées	322
6.2.5. Hausse de l'occurrence de basses températures sur la période proche de la méiose.....	323
6.2.6. Déficit de rayonnement solaire en début de montaison.....	324
6.2.7. Stabilisation des excès d'eau en surface du sol.....	326
6.2.8. Hausse des fortes précipitations pendant le remplissage des grains.....	326
6.2.9. Une réduction des jours de pluie lors de la période de récoltes.....	327
Conclusion du chapitre 6.....	333
Conclusion de la partie 2.....	335

Partie 3. Approches expérimentales et multiscalaires pour l'étude bioclimatique des agrosystèmes	339
Introduction	339
Chapitre 7. L'approche multiscalaire en géographie pour estimer les limites sur le terrain et compléter l'étude bioclimatique	341
Introduction	341
7.1. Diversité spatiale de la température à différentes échelles.....	342
7.1.1. Diversité des conditions climatiques à l'échelle de la Plaine de Caen	342
7.1.2. Différences de températures dans la Plaine agricole en contexte de faibles dénivelés.....	351
7.1.3. Contrastes de températures gélives dans la vallée de l'Odon	360
7.1.4. Diversité de la température dans la parcelle agricole	369
7.2. L'intérêt d'un suivi à échelle fine	374
7.2.1. Suivi du cycle 2018-2019 à Anguerny.....	374
7.2.2. Déterminer la RUD à l'aide de relevés <i>in situ</i>	379
Conclusion du chapitre 7.....	385
Chapitre 8. Etendre l'analyse à d'autres régions et cultures	387
Introduction.....	387
8.1. Evolution des indicateurs phénoclimatiques à l'échelle française	388
8.1.1. Sélection des sites, méthode et présentation du cadre géoclimatique actuel et futur	388
8.1.1.1. Ajustement de la méthodologie pour les 7 sites.....	389
8.1.1.2. Présentation du cadre géoclimatique actuel et futur.....	390
8.1.2. Anticipation de la phénologie.....	395
8.1.3. Hausse contenue de l'échaudage thermique.....	396
8.1.4. Stabilité et réduction légère du déficit hydrique.....	397
8.1.5. Réduction du rayonnement cumulé pendant la montaison	399
8.1.6. Réduction des gelées mais hausse de l'exposition de la méiose aux basses températures	401
8.1.7. Augmentation des jours de très fortes pluies en fin de cycle	403
8.1.8. Réduction du nombre de jours disponibles pour la vernalisation	403
8.1.9. Synthèse des évolutions constatées sur les grandes plaines céréalières.....	404
8.2. S'intéresser aux autres cultures présentes dans les rotations culturales : l'exemple du lin.....	408
8.2.1. La Normandie : première région productrice de lin fibre de printemps dans le monde	409
8.2.2. Ajustement de la méthode pour le lin fibre de printemps	411
8.2.3. Réduction de la durée du cycle	412
8.2.4. Réduction du déficit hydrique	414
8.2.5. Augmentation des jours de chaleur	415
8.2.6. Les fortes et très fortes pluies.....	415

Conclusion du chapitre 8.....	419
Conclusion de la partie 3.....	423
Conclusion générale et perspectives.....	427
Bibliographie.....	439
Table des figures.....	455
Liste des tableaux	465
Table des matières	469
Annexes	477

Annexes

Annexe 1. Les causes des insécurités alimentaires dans le monde

Chaque année dans le monde, deux milliards de personnes souffrent de sous-alimentation chronique et 18 millions meurent de faim, principalement dans les pays pauvres (Charvet, 2018). C'est le premier risque sanitaire dans le monde. Pourtant, les productions agricoles devraient être suffisantes pour nourrir la population mondiale. D'ailleurs, les productions céréalières à elles seules suffiraient si elles étaient également réparties (Millstone et al., 2003). A l'inverse, deux milliards de personnes sont suralimentées, principalement dans les pays riches (Charvet, 2018).

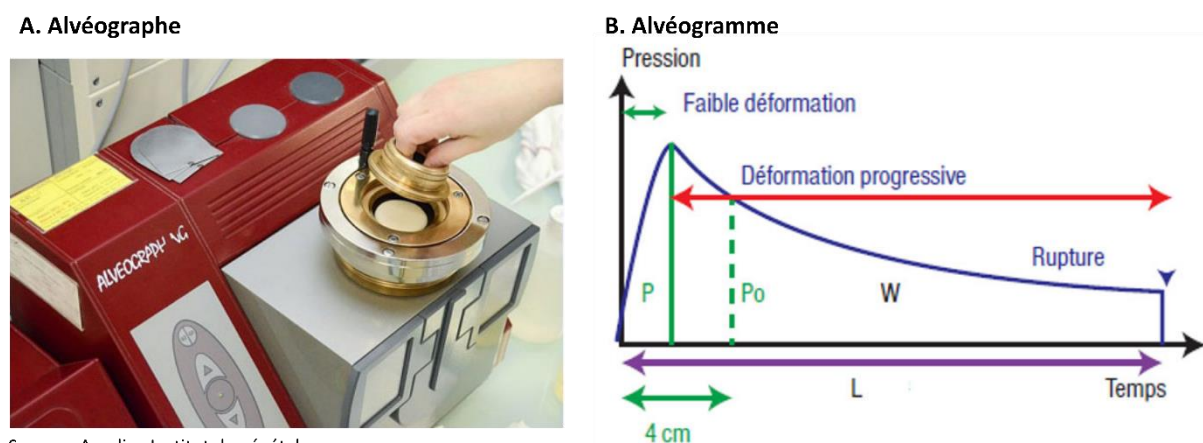
L'insécurité alimentaire est d'abord liée à la pauvreté des populations (Charvet, 2004 ; Rastoin, 2017). L'absence ou les faibles revenus ne permettent pas l'achat de denrées alimentaires. Lorsque les prix des aliments de base augmentent, ces populations sont particulièrement vulnérables. Dans les pays les moins développés, plus de la moitié de la dépense totale des ménages est consacrée aux aliments. Par ailleurs, la pauvreté empêche l'investissement dans le matériel et les intrants agricoles qui permettent de produire des aliments en quantité suffisante. C'est notamment le cas en Haïti, Bolivie, Bangladesh ou le Sahel Africain (Charvet, 2004). Compte-tenu de la globalisation, les agricultures locales sont concurrencées par les productions des pays riches équipés et mobilisant peu de main d'œuvre, d'autant plus que dans le même temps de nouveaux modèles de consommations viennent fragiliser les producteurs locaux. Les importations à des fins alimentaires augmentent mais les prix instables des marchés internationaux amènent les plus pauvres dans des situations de précarité alimentaire encore plus prononcée. Aussi, les populations se concentrant dans les villes, et certaines zones rurales ne sont plus correctement desservies par les réseaux d'approvisionnement, précarisant les populations qui y vivent. Ce sont les "déserts alimentaires", localisés aussi bien dans les pays du Nord que du Sud (Rastoin, 2017). Par ailleurs, les structures politico-administratives sont souvent défailtantes à différentes échelles. Les conflits entre états le développement des productions agricoles et la sécurité des biens et des personnes. Il en va de même pour le manque d'encadrement, que ce soit économique, financier, commercial ou technique (Charvet, 2004). La dégradation des ressources naturelles (érosion hydrique et éolienne, la salinisation des sols, le déficit en matière organique, les pertes en éléments nutritifs, surpâturage, ...) contribue également à l'insécurité alimentaire (Benoit, 2017). Enfin, la variabilité du climat et les accidents climatiques associés sont également sources d'insécurité alimentaire. Depuis quelques décennies le changement climatique a des répercussions sur l'agriculture et la sécurité alimentaire (FAO, 2016, 2018).

Pour garantir la sécurité alimentaire dans le monde, il convient tout d'abord de lutter contre la pauvreté mais également de développer des politiques alimentaires aux échelles nationale et internationale, en favorisant les modèles de proximités territorialisés et durables, fondés sur une approche qualitative et culturelle des denrées alimentaires, au dépens du modèle agroindustriel globalisé (Rastoin, 2017). En outre, l'atténuation (réduction des émissions de GES) du changement climatique et l'adaptation sont nécessaires pour garantir des productions suffisantes pour nourrir la population mondiale.

Annexe 2. La force boulangère (W)

La force boulangère (W) est un indicateur de l'aptitude du blé à la panification. Elle correspond à la surface de la courbe de l'alvéogramme, graphique issu des mesures de l'avéographe enregistrant les déformations et pressions subies par la pâte (Arvalis, 2017 ; **Figure 217**). La longueur (L en mm) de la courbe exprime l'extensibilité, c'est-à-dire la capacité de la pâte à s'allonger sans déchirure, tandis que la hauteur (P en mm) donne l'élasticité, soit l'aptitude de la pâte à retrouver sa forme initiale après la déformation. Le rapport P/L donne l'équilibre de la farine (Le Stum, 2017).

Figure 217 : Alvéographe (A) et alvéogramme (B)



Source : Arvalis - Institut du végétal

Annexe 3. Compléments sur la CAH de la Plaine de Caen à partir du RPG

Pour faire ressortir les cultures ou groupes de cultures ayant une faible part dans la SAU, mais qui peut être caractéristiques de certains espaces au sein de la Plaine de Caen, une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) est établie à partir de la méthode de Ward. Elle permet de mettre en évidence des éléments de l'occupation du sol qui peuvent passer inaperçus en raison de la domination du blé dans la SAU. Les îlots RPG sont convertis en points en calculant leur barycentre dans le logiciel Arcgis. Ils sont ensuite agrégés dans des mailles de 2000 m de côté, ce qui correspond à une surface de 400 ha¹⁴³. Les cultures ou groupes de cultures sont les suivants : blé tendre, maïs grain et ensilage, autres céréales, colza, tournesol, protéagineux, autres oléagineux, plantes à fibres, herbe (prairies permanentes, prairies temporaires et landes), autres cultures industrielles, légumes et fleurs et le rebus (vergers, vignes, fruits à coques, gels, divers). Les données sont ensuite exportées vers XLstats pour réaliser les statistiques multi-variées qui, en géographie, ont pour but de synthétiser et faire ressortir des liens, ressemblances, dissemblances entre un grand nombre de données. Il s'agit ici de l'application d'une méthode approuvée par Marie et al (2014).

Trois ensembles se dégagent au sein de la classification. Le premier concerne les classes où le blé est surreprésenté. Le second regroupe celles mettant en évidence un partage de la SAU entre les

¹⁴³ Le choix de cette surface avait été établi à partir de l'expertise de Maxime Marie lors de la réalisation de ce travail en 2016.

grandes cultures, l'herbe et les rebus au sein des surreprésentations. Le dernier ensemble comprend les classes où les autres grandes cultures sont surreprésentées par rapport au blé. Les éléments ayant fait l'objet de la CAH sont lus comme surreprésentés ou sous-représentés dans une grille (appartenant à une classe) par rapport à leur représentation moyenne dans l'ensemble des grilles. Le blé par exemple est surreprésenté dans les grilles appartenant à cinq classes (A1, A2, A3, B4, C1), mais cela ne veut pas dire qu'il n'est pas présent dans les autres où il est sous-représenté. Au contraire au vu de son importance dans la SAU il l'est, mais dans une proportion moindre que dans les classes où celui-ci est surreprésenté. Lorsqu'il est sous-représenté dans une classe, cela ne veut pas non plus dire que les éléments surreprésentés dans celle-ci ont une part dans la SAU de ces grilles en question plus importante que le blé.

Surreprésentation dans la SAU du blé

Le premier ensemble est marqué par la surreprésentation du blé (**Figure 218**), notamment pour les classes A1 et A2. Seules quelques autres grandes cultures se démarquent (betterave sucrière, lin) ainsi que des éléments atypiques (rebus et herbe) mais dans une faible proportion. La classe A3, en revanche, met en lumière une forte surreprésentation des légumes et fleurs, même si le blé et d'autres grandes cultures sont légèrement surreprésentées. Cette dernière classe est une transition vers le second ensemble. Cet ensemble est caractéristique des plateaux, et de la culture céréalière intensive de champs ouverts, se structurant en particulier ici autour du blé. La surreprésentation de la catégorie légumes et fleurs peut s'expliquer par l'activité maraichère à proximité de l'agglomération caennaise (endives à Cambes-en-Plaine, asperges à Démouville, ...) où en bordure de littoral. Une activité maraichère est également perceptible au milieu des champs ouverts (**Figures 219 et 220**), au cœur de la Plaine de Caen (Coulomb et la Grande Ferme à Fontenay le Marmion). Mais si elle est située à distance des sièges d'exploitations et villages, il est probable qu'il s'agisse parfois de la culture de la pomme de terre, rattachée dans la nomenclature du RPG aux légumes et fleurs. Outre la pomme de terre, d'autres cultures comme les oignons ou le céleri sont cultivées par les exploitants agricoles même si ces derniers ont une plus grande part de la SAU destinée aux grandes cultures.

Figure 218 : La Plaine de Caen le 20 juillet 2019 à Fontaine-Henry (photographie : F.Beauvais)



Figure 219 : Exploitation maraichère à Coulomb



Figure 220 : Exploitation de la "Grande ferme" maraichère à Fontenay le Marmion



Une surreprésentation de la SAU partagée entre grandes cultures, herbe et rebus

Le second ensemble peut se découper en deux sous-ensembles. Le premier composé des classes B1 et B2, est marqué par la sous-représentation du blé. Les grandes cultures telles que le colza (**Figure 221**), le tournesol et le lin, partagent une surreprésentation avec les surfaces en herbes. Le deuxième met en avant avec la classe B3 le maïs et le fourrage ainsi que les protéagineux et les rebus alors que la classe B4 surreprésente une nouvelle fois l'herbe où une légère surreprésentation du blé est à noter.

Le partage de la grande culture avec des éléments qui n'y sont pas liés (B1 et B2) ainsi que cette dernière au profit des systèmes fourragers (B3), sans oublier la surreprésentation des rebus (B3) et le partage de la SAU entre le blé et l'herbe (B4), peuvent être considérés comme atypique au sein de la Plaine de Caen (**Figure 222 et 223**). Ces éléments d'occupation du sol se retranscrivent dans le paysage. C'est le cas par exemple des petites vallées, où la plaine alluviale, parfois large (Louvigny, Reviers) est recouverte de prairies, ce qui augmenta le part de surface en herbe pour ces mailles. L'encaissement parfois est significatif pour constituer une rupture dans le paysage, surtout lorsque les versants sont boisés. La partie amont de la vallée du Laizon à proximité de Soumont-Saint-Quentin (La brèche au diable) où la géologie (schistes) est différente de celle présente sur l'ensemble de l'entité (Calcaires) constitue elle aussi un espace singulier, contrastant avec les champs ouverts. Par ailleurs, les rebords de la Plaine de Caen, soit par exemple ses limites avec le Pré-Bocage peuvent également expliquer certaines surreprésentations, où l'occupation du sol peut refléter la présence de systèmes d'exploitation à la fois tournés vers la polyculture et l'élevage. C'est le cas notamment au nord-ouest à proximité de la vallée de la Seullès et entre celle-ci et la Mue sous un axe élargie Audrieu/Fontenay-le-Pesnel/Cristot/Brouay/Saint-Manvieu-Norrey où les villages ont conservé des surfaces en herbes à proximité des sièges d'exploitations. La grande culture se trouve alors au sein des champs ouverts situés entre les villages. La présence de vergers au sein des bourgs

ou encore les vignes des « Arpents du soleil » à côté de Saint-Pierre-sur-Dives peuvent aussi localement constituer une autre explication (Figure 224).

Figure 221 : Champ de colza le 18 avril 2021 à Carcagny (photographie : F. Beauvais)



Figure 222 : Surface en herbe autour d'un siège d'exploitation au nord-ouest de la Plaine de Caen à Cristot (lieu-dit « Le Hamel »)



Figure 223 : Prairies et bois au sud-ouest de la Plaine de Caen dans la vallée du Laizon



Figure 224 : Les "Arpents du soleil" - Vignoble au sud-est de la Plaine de Caen (photographie : Ouest-France)



Surreprésentation dans la SAU des autres grandes cultures par rapport au blé

Le troisième ensemble met en avant une surreprésentation de la grande culture, mais sans que le blé soit l'élément le plus surreprésenté. En effet ce dernier est sous représenté dans trois classes, excepté la première. Deux sous-ensembles sont distingués. Le premier met en avant la surreprésentation des céréales et des oléagineux (C1 et C2). Le deuxième met en lumière une surreprésentation de la grande culture, mais n'est pas rattachée aux céréales. En C3 les oléagineux sont surreprésentés (colza et tournesol) et en C4 ce sont les betteraves sucrières. Comme pour le premier ensemble celui-ci est caractéristique de la grande culture de plateaux. Toutefois celui-ci est réparti de façon plus homogène dans l'espace de la plaine, tandis que le premier se concentre davantage dans la partie sud.

Annexe 4. Les contrats de vente entre l'agriculteur et la société de collecte

Il existe le contrat « prix de campagne », qui d'après la Coopérative de Creully concerne environ 70 % du volume des blés vendus. C'est la structure qui s'occupe de la commercialisation, donc de la vente des productions. Plusieurs contrats peuvent être établis. L'exploitant peut vendre en avance pour bénéficier d'un prix plus élevé (puisque lors de la récolte l'offre est plus importante que la demande), s'engager sur un prix à la récolte ou encore sur un prix moyen à l'année. Ces spécificités concernent le blé puisque le colza et l'orge sont vendus à la moisson. Néanmoins, outre ces contrats les agriculteurs peuvent décider de céder leur blé à ces structures lorsqu'ils le souhaitent de leur propre initiative avant ou après la récolte, ce qui nécessite le stockage des céréales à la ferme (ou à la Coopérative avec des frais de stockage). C'est la vente « à déclencher » au travers du dépôt/vente. Les prix sont scrutés par les agriculteurs et les organismes collecteurs. Le blé suit les cours mondiaux qui oscillent. En 2016, les prix bas, autour de 140 €/t sont liés à la chute du prix du pétrole, les craintes relatives à l'économie chinoise ou encore la possible concurrence des producteurs de la Mer Noire. Au début 2021, les prix flirtent avec le seuil de 230 €/t en raison de la taxe Russe à l'exportation, de la forte demande chinoise en céréales, de la vague de froid en Russie et en Ukraine menaçant les productions ou encore la baisse des stocks mondiaux¹⁴⁴.

¹⁴⁴ <https://www.terre-net.fr/marche-agricole/actualite-marche-agricole/article/des-cours-du-ble-mais-et-colza-au-plus-haut-depuis-7-8-ans-1395-175526.html#:~:text=Pour%20le%20bl%C3%A9%2C%20les%20facteurs,int%C3%A9rieur%20et%20limiter%20l'inflation.>

Annexe 5. Définition du sol

Définition du sol d'après Lozet et Mathieu (2002).

« Produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui se manifestent (Aubert et Boulaine).

C'est donc un milieu complexe et dynamique évoluant sous l'influence des facteurs externes (hydrosphère, atmosphère et biosphère). Ses propriétés s'acquièrent progressivement sous l'action combinée de ces facteurs : la roche-mère s'altère sous l'influence du climat et d'une végétation pionnière, la matière organique se mélange au sol, des minéraux de la roche s'altèrent, la matière organique se dégrade lentement d'abord en humus frais, finalement en acide carbonique, eau, ammoniacale et nitrates. Enfin, des éléments minéraux et organiques peuvent être déplacés par l'eau de pluie infiltrée et différencier ainsi le sol en une succession de couches de texture, de structure et de couleurs différentes, appelées horizons.

Le sol ainsi défini atteint donc un degré de développement variant selon la manière dont il a été soumis à l'action des facteurs pédogénétiques et le laps de temps pendant lequel il l'a été. Le sol est en conséquence une structure quadridimensionnelle (temps, espace) dans laquelle persistent et transitent :

- *Les résultats et les produits de l'altération de la couche minérale superficielle du globe ;*
- *Les matières organiques mortes ou vivantes de la biomasse associée à cette couche superficielle ;*
- *Les éléments provenant de l'atmosphère, soit de façon accidentelle, soit de façon cyclique (Boulaine) ».*

Annexe 6. Publiothèque de Météo France et types de stations

La Publiothèque de Météo France permet de visionner l'ensemble des stations météorologiques de cet organisme et disponibles sur le territoire français. Elles sont de plusieurs types dont Rosa et al (2011) en ont effectué la synthèse. Les éléments de détails sont également disponibles sur le site de la Publiothèque¹⁴⁵. Les stations synoptiques, regroupent les sites avec observation humaine du temps (couverture nuageuse, visibilité, température, vent, ...) avec une transmission horaire et quotidienne. Elles sont de « type 0 » (station professionnelle avec observation par le personnel) et de « type 1 » (observation humaine non professionnelle ou réalisée à distance). Les stations de « types 2 » sont automatiques avec capteurs sans observation du temps, relevant des données au pas de temps horaire ou quotidien mais dont la transmission est quotidienne. A la différence des stations de « types 2 », celles de « type 3 » ont une transmission différée. Il reste des stations manuelles, c'est le « type 4 ». Si les données sont quotidiennes, la transmission peut être différée. La dernière catégorie, le « Type 5 » correspond à des stations où l'expertise des données n'est pas garantie. Toutes ces données mesurées sont accessibles par l'intermédiaire d'une convention unissant Météo France à l'Université de Caen Normandie. Sur l'ensemble du territoire métropolitain à partir de l'onglet « chercher directement les stations » il est possible de recenser : 150 stations de « type 0 » ; 441 stations de « type 1 » ; 449 stations de « type 2 » ; 485 stations de « type 3 » ; 714 stations de « type 4 » ; 40 stations de « type 5 ».

¹⁴⁵ Types de stations et disponibilité des données : <http://publitheque.meteo.fr/aide/publitheque/reseauPostes/aideTypePoste.html#:~:text=Les%20stations%20de%20type%200,observations%20humaines%20avec%20temps%20sensibles.&text=une%20station%20de%20type%205,dont%20l'interrogation%20est%20occasionnelle>.

Annexe 7. Les paramètres climatiques et profondeurs temporelles des stations Météo France mobilisées pour la thèse

Figure 225 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Caen-Carpiquet et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14137001)

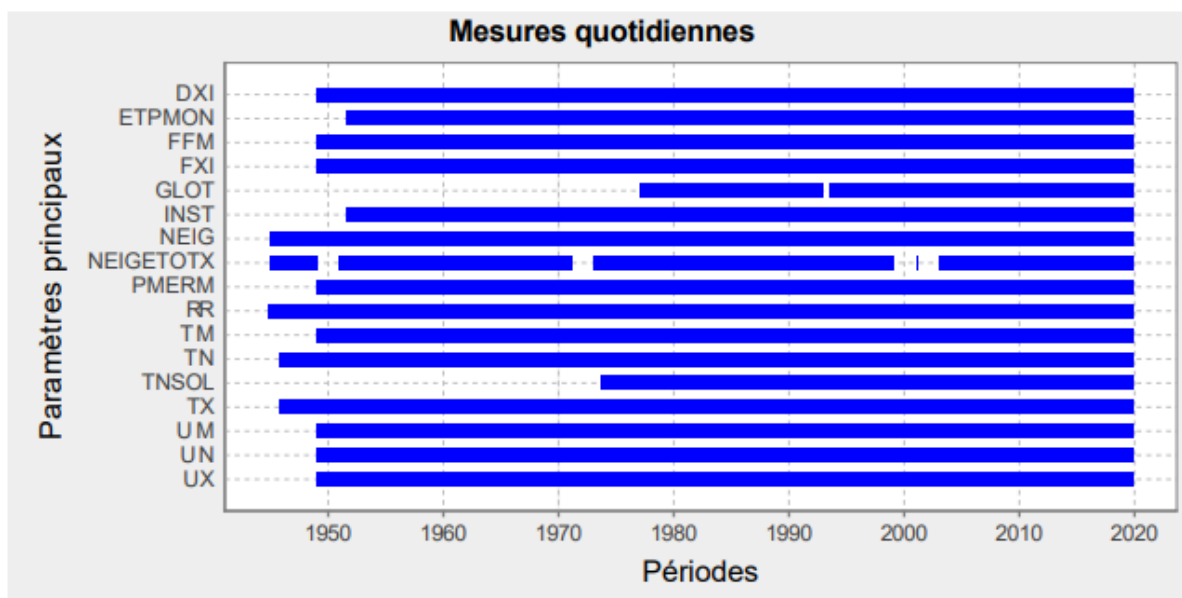


Figure 226 : Localisations et emplacements successifs de la station de Caen-Carpiquet (source : Météo France, fiche de poste n° 14137001)

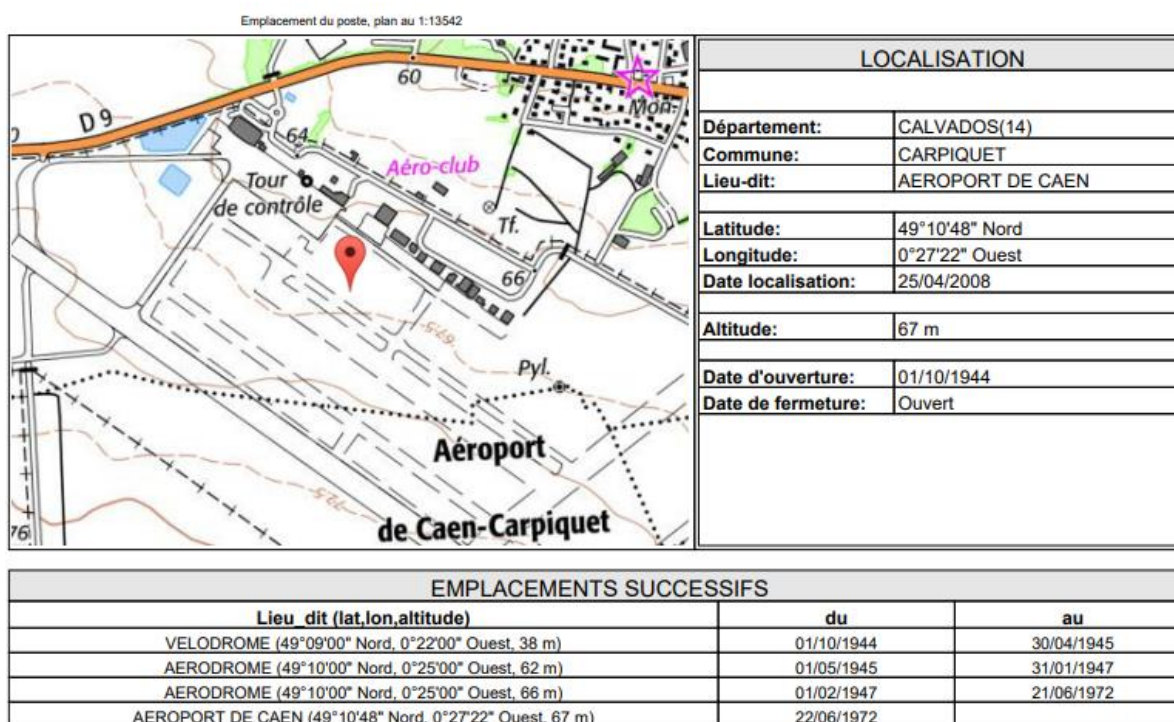


Figure 227 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Bernières-sur-Mer et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14066001)

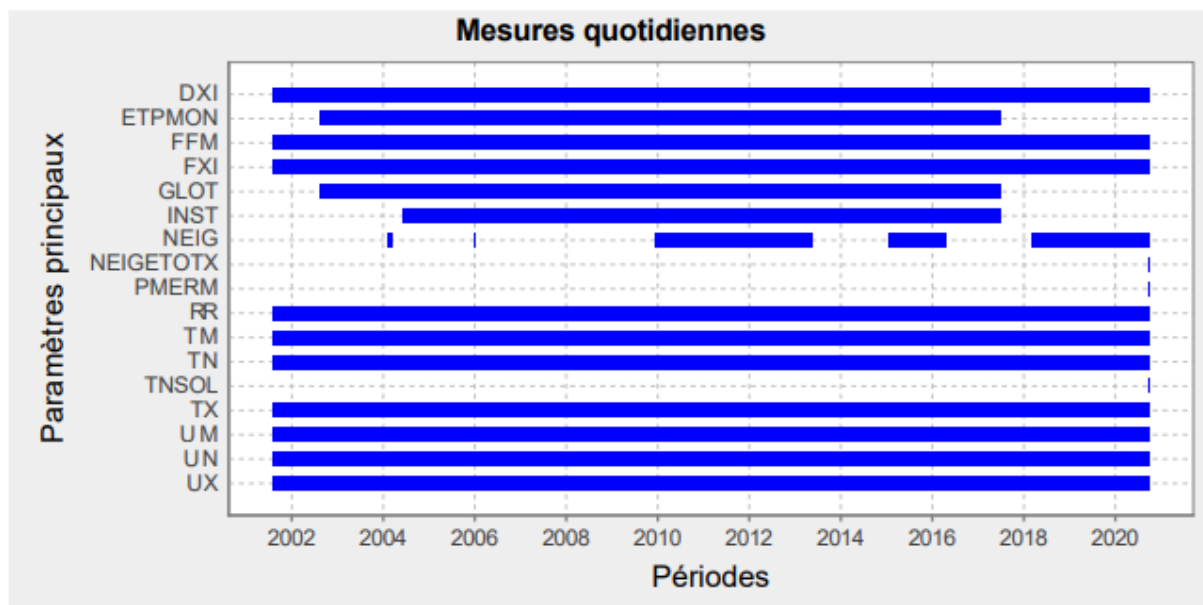


Figure 228 : Localisations et emplacements successifs de la station de Bernières-sur-Mer (source : Météo France, fiche de poste n° 14066001)

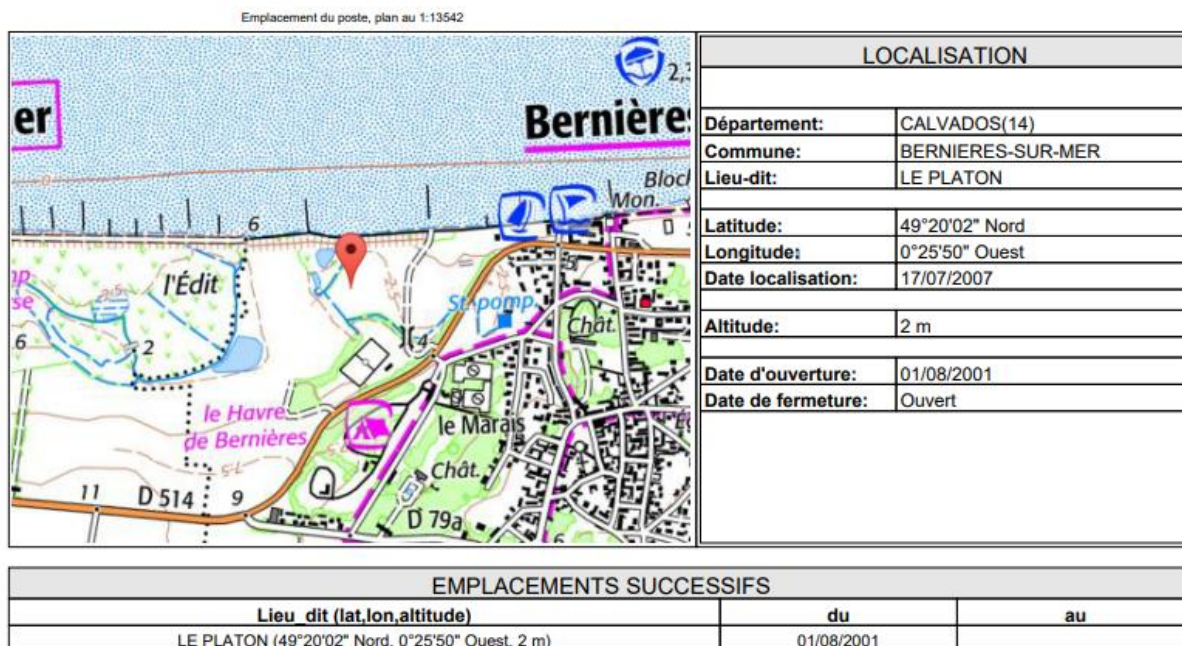


Figure 229 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Saint-Sylvain et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14659001)

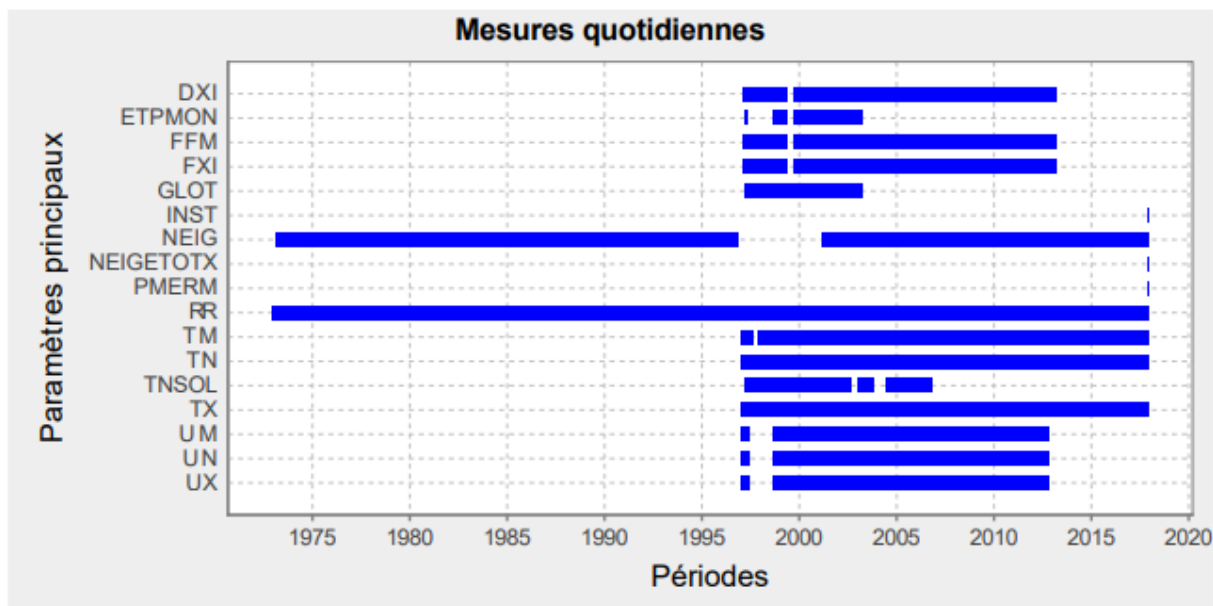


Figure 230 : Localisations et emplacements successifs de la station de Saint-Sylvain (source : Météo France, fiche de poste n°14659001)

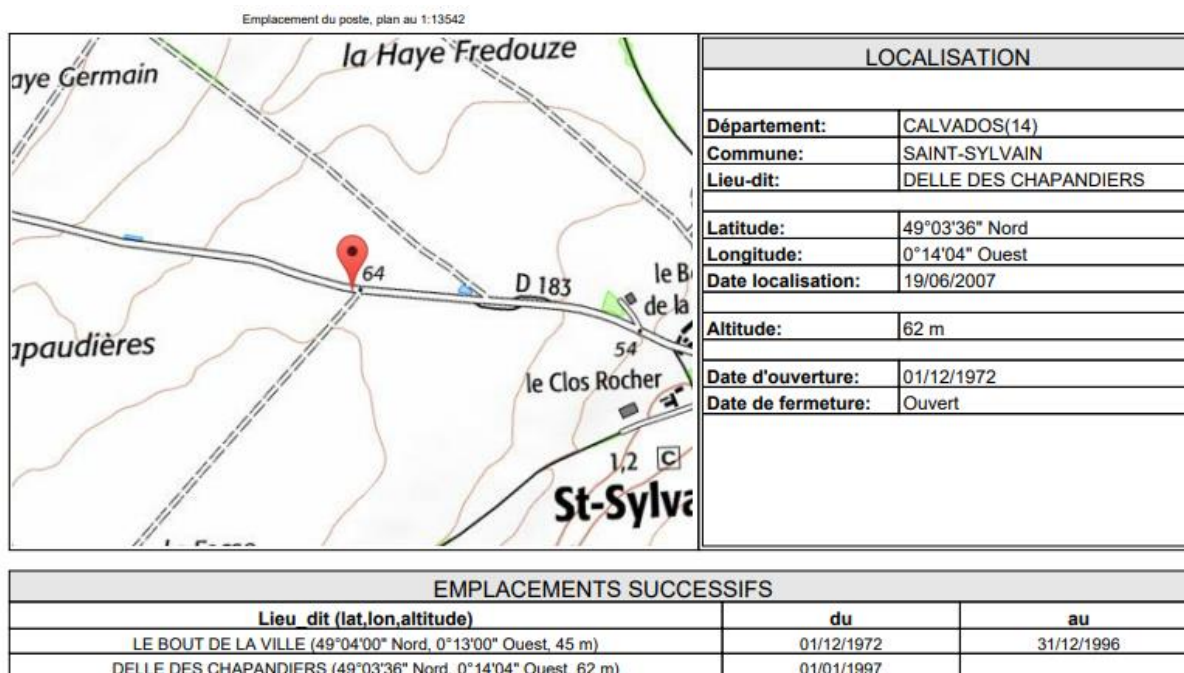


Figure 231 : Paramètres climatiques disponibles à la station de L'Oudon-Lieury et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14624001)

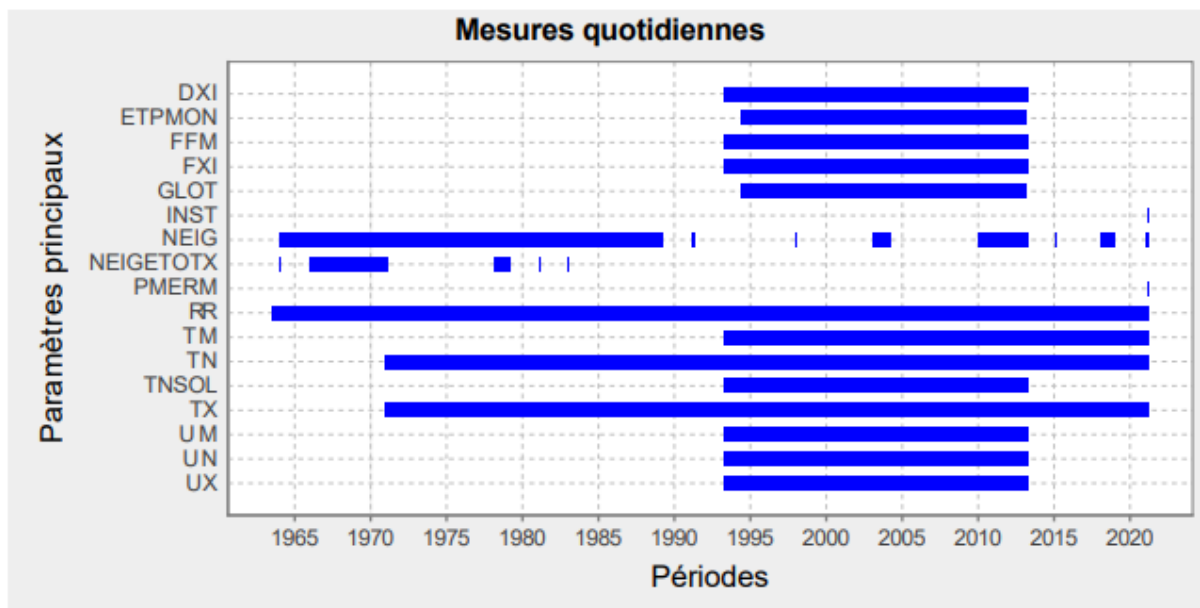


Figure 232 : Localisations et emplacements successifs de la station de L'Oudon-Lieury (source : Météo France, fiche de poste n°14624001)

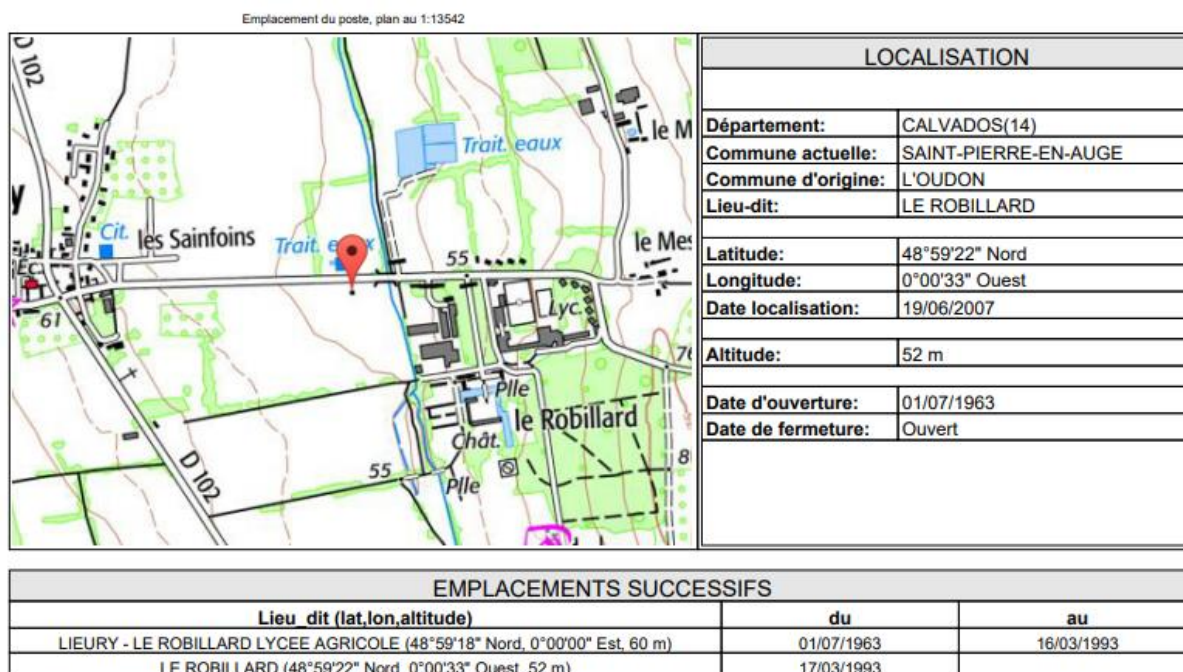


Figure 233 : Paramètres climatiques disponibles à la station de Damblainville et profondeur temporelle associée (source : Météo France, fiche de poste n° 14216001)

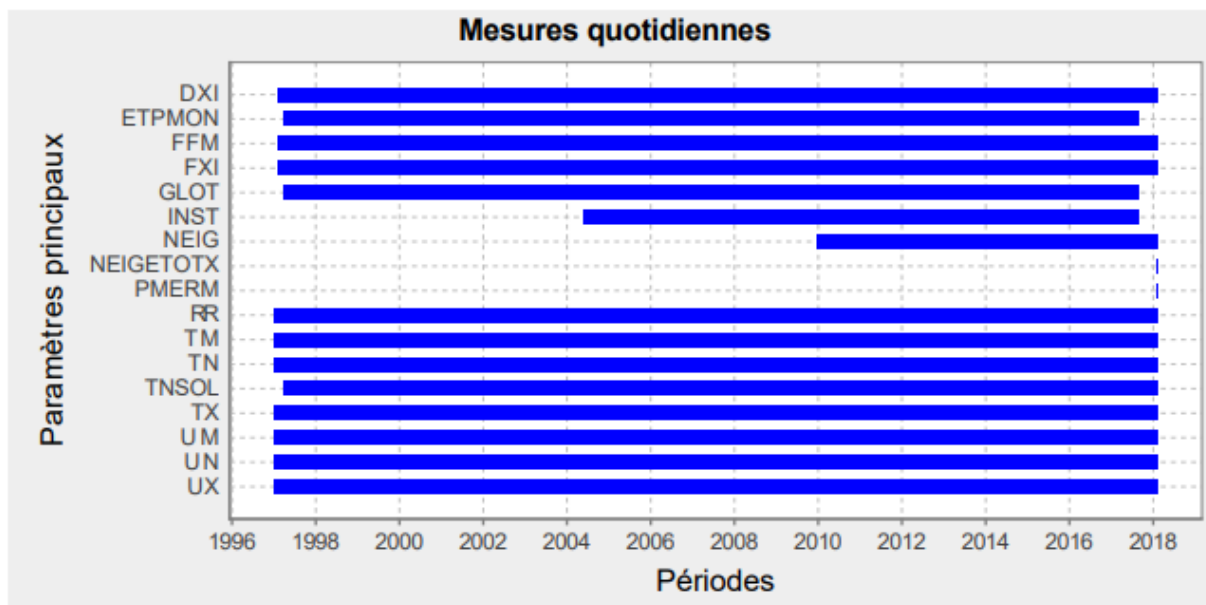
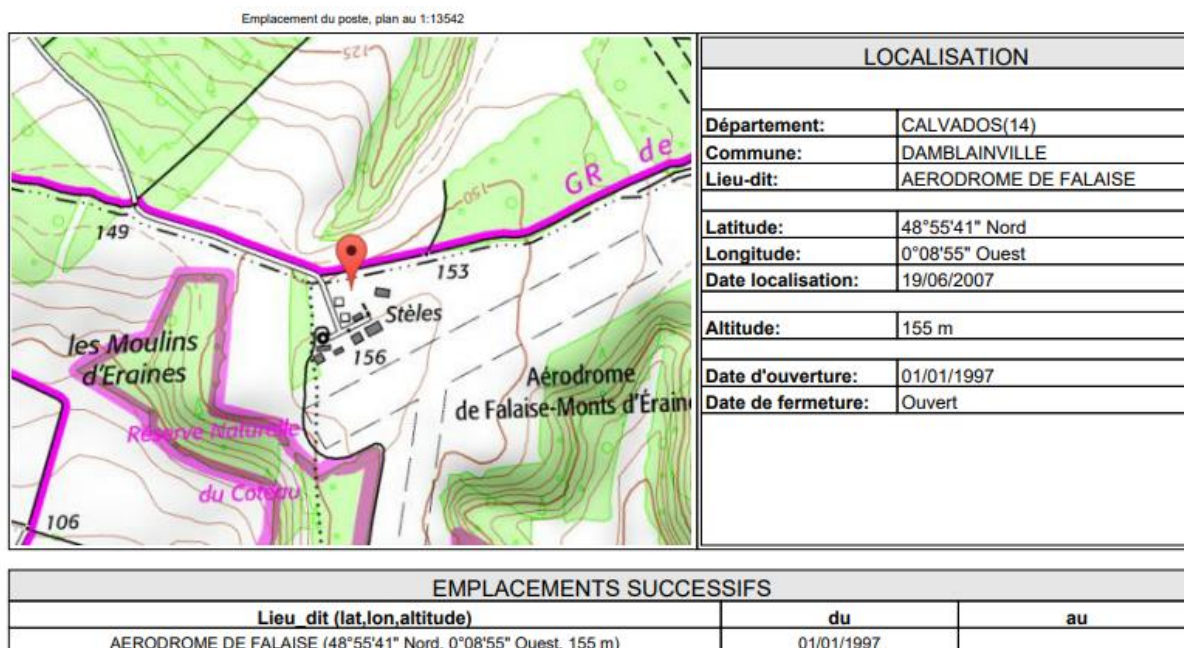


Figure 234 : Localisations et emplacements successifs de la station de Damblainville (source : Météo France, fiche de poste n°14624001)



Annexe 8. Les climats français et leurs évolutions

Le changement climatique présenté dans le chapitre 2 se répercute à l'échelle du territoire métropolitain. Cette annexe s'attache à présenter la diversité du climat en France ainsi que les évolutions observées et futures.

1. Présentation du climat français

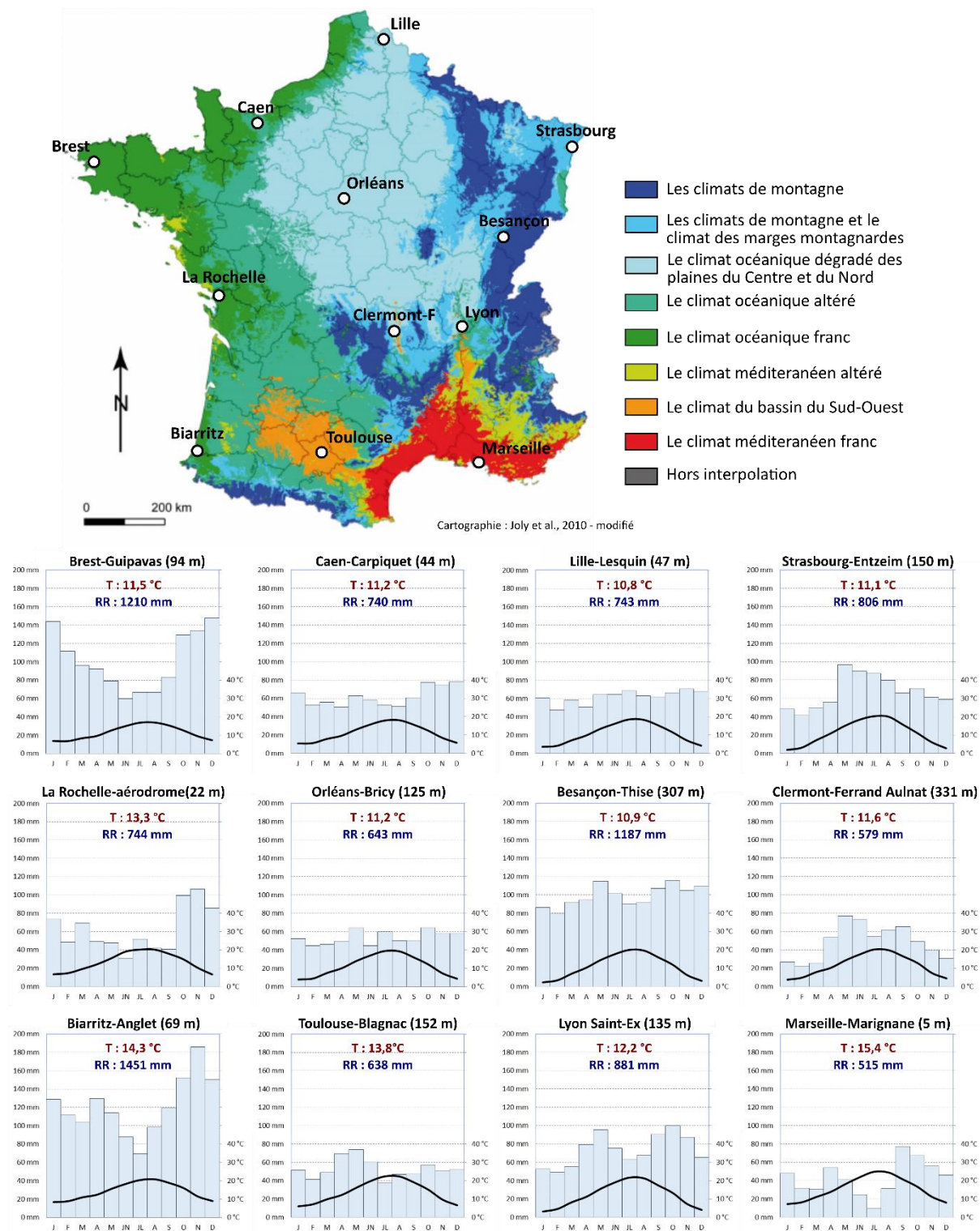
La France est située aux latitudes moyennes. Sous l'influence de l'océan atlantique, le climat est qualifié de "tempéré" dans la classification de Koppen (1900), à l'exception du sud-est rattaché au climat méditerranéen. Mais à l'échelle nationale, plusieurs types de climats sont recensés, dont les disparités sont perceptibles aux échelles régionales.

A la fin des années 2000, Joly et al (2010) constatent que la climatologie ne s'est que peu intéressée à caractériser le climat français au cours des 20 années précédentes. Les rares recherches portant sur cette thématique ne présentaient pas de cartographie du climat. Leurs travaux aboutissent alors à la création d'une carte du climat du pays à partir des méthodes d'interpolations et de traitements multivariés AFC (Analyse Factorielle des Correspondances) et CAH (Classification Ascendante Hiérarchique). C'est d'après cette carte (**Figure 235**), à laquelle sont greffés les diagrammes ombrothermiques, que s'appuie la présentation des ensembles climatiques français. Par ailleurs, pour percevoir les ordres de grandeurs des différents paramètres climatiques, les cartes de la période de référence 1976-2005 de la partie 2 de cette annexe servent également de support.

La façade atlantique de Dunkerque à Biarritz est caractérisée par un "climat océanique franc". Il s'avance jusqu'à une cinquantaine de km dans les terres le long de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique pour la Vendée et la Charente, et sur une bande plus réduite dans le sud-ouest. Ce climat domine la quasi-totalité du territoire Breton en position péninsulaire (ouverture sur l'Atlantique). Ces régions bénéficient de l'inertie thermique de l'océan. Les jours de gel et de chaleurs sont faibles, caractéristiques d'hivers doux et d'étés frais, surtout au nord-ouest (et à l'exception du sud-ouest). Les précipitations sont régulières (mais renforcées en hiver). Elles sont abondantes puisque les cumuls pluviométriques peuvent dépasser 1200 mm dans les zones les plus océaniques comme à Brest ou à l'ouest de la Normandie. Ce climat océanique s'altère dans les terres jusqu'à devenir dégradé dans les plaines du Centre et du Nord. Les pluies restent régulières mais moins fréquentes, en attestent les cumuls pluviométriques annuels inférieurs à 700 mm. Les jours de gel et de chaleur sont plus nombreux. Au nord-est du territoire et au nord du couloir Rhodanien, on ne parle plus de climat océanique dégradé mais d'influences continentales. Les hivers y sont plus rudes où la neige et le gel sont fréquents. Les étés sont chauds et souvent marqués par des orages. Les précipitations restent faibles, notamment dans les régions abritées par l'effet de Foehn. Le climat montagnard azonal concerne les zones de reliefs (Pyrénées, Massif-Central, Alpes, Jura et Vosges) et leurs contreforts. En altitude les chutes de neige sont importantes en hiver. Les jours de gel sont conséquents et les jours de chaleur sont faibles (excepté dans les grandes vallées de basses altitudes). La variabilité intra-annuelle des précipitations y est importante. Dans le sud-ouest de la France la température moyenne annuelle est élevée (supérieure à 13°C), avec de nombreux jours de chaleur et où les fortes gelées sont rares. Les précipitations sont faibles et un peu plus importantes en été en raison des perturbations orageuses provenant de l'Espagne et du Golf de Gascogne. Enfin, le pourtour méditerranéen est caractérisé par un climat différent puisqu'il fait la

transition entre la zone des moyennes latitudes de l'ouest des continents et la zone tropicale aride (Beltrando, 2004). L'été est chaud et aride tandis que l'hiver est doux et pluvieux lors de brefs épisodes parfois violents.

Figure 235 : Les grands types de climats français et diagrammes ombrothermiques associés

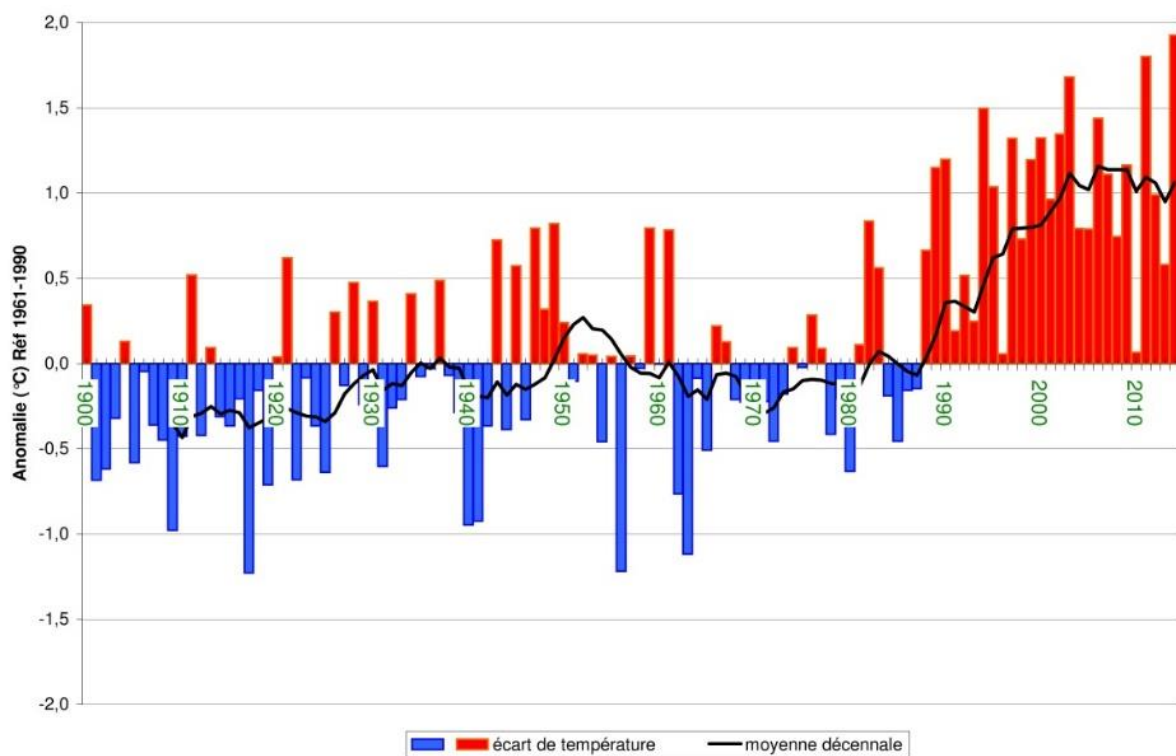


Diagrammes ombrothermiques : Beauvais, 2021 (d'après les données Météo France ; Normale climatique 1981-2010)

2. Le changement climatique observé en France

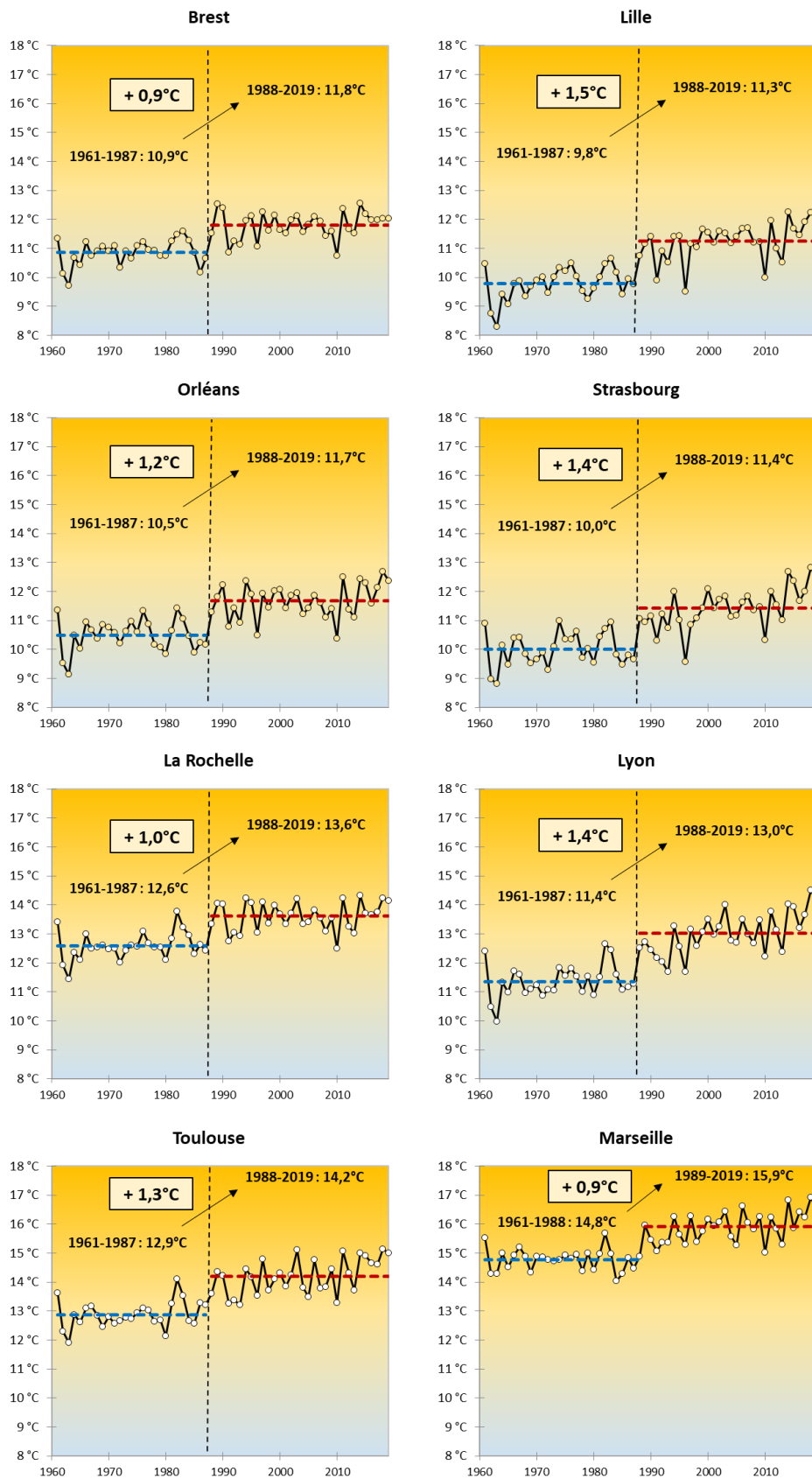
D'après Météo-France, la température moyenne annuelle a augmenté de 1,7°C sur la période 1901-2012. C'est 0,8°C de plus qu'à l'échelle mondiale. Ce constat a déjà été effectué par Moisselin et al (2002) au début du siècle. Sur la période 1959-2009 l'évolution de la température est estimée à 0,3°C par décennie (Gibelin et al., 2014). En considérant une Normale 1961-1990 pour 30 postes météorologiques métropolitains, le réchauffement s'accroît à partir des années 1990, ce qui se matérialise par une anomalie de température positive sans interruption (**Figure 236**). Cette augmentation de la température, qui concerne autant les minimales que les maximales, est observée sur l'ensemble du territoire.

Figure 236 : Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence 1961-1990 (11,8°C ; Météo France)



Ce constat relève des données des postes météorologiques disposant de longues séries fiables en différents points géographiques sous différents climats : Brest, La Rochelle, Lille, Lyon, Marseille, Orléans, Strasbourg et Toulouse. Sur l'ensemble de ces sites une rupture de la température moyenne annuelle est constatée au test de Pettitt au seuil $\alpha = 0,05$ en 1987, à l'exception de Marseille où celle-ci apparaît en 1988 (**Figure 237**). En comparant les températures pré et post-rupture l'écart est de l'ordre de 1°C à Brest, Marseille et la Rochelle. Il est supérieur à ce seuil pour les autres sites et allant même jusqu'à 1,5°C à Lille.

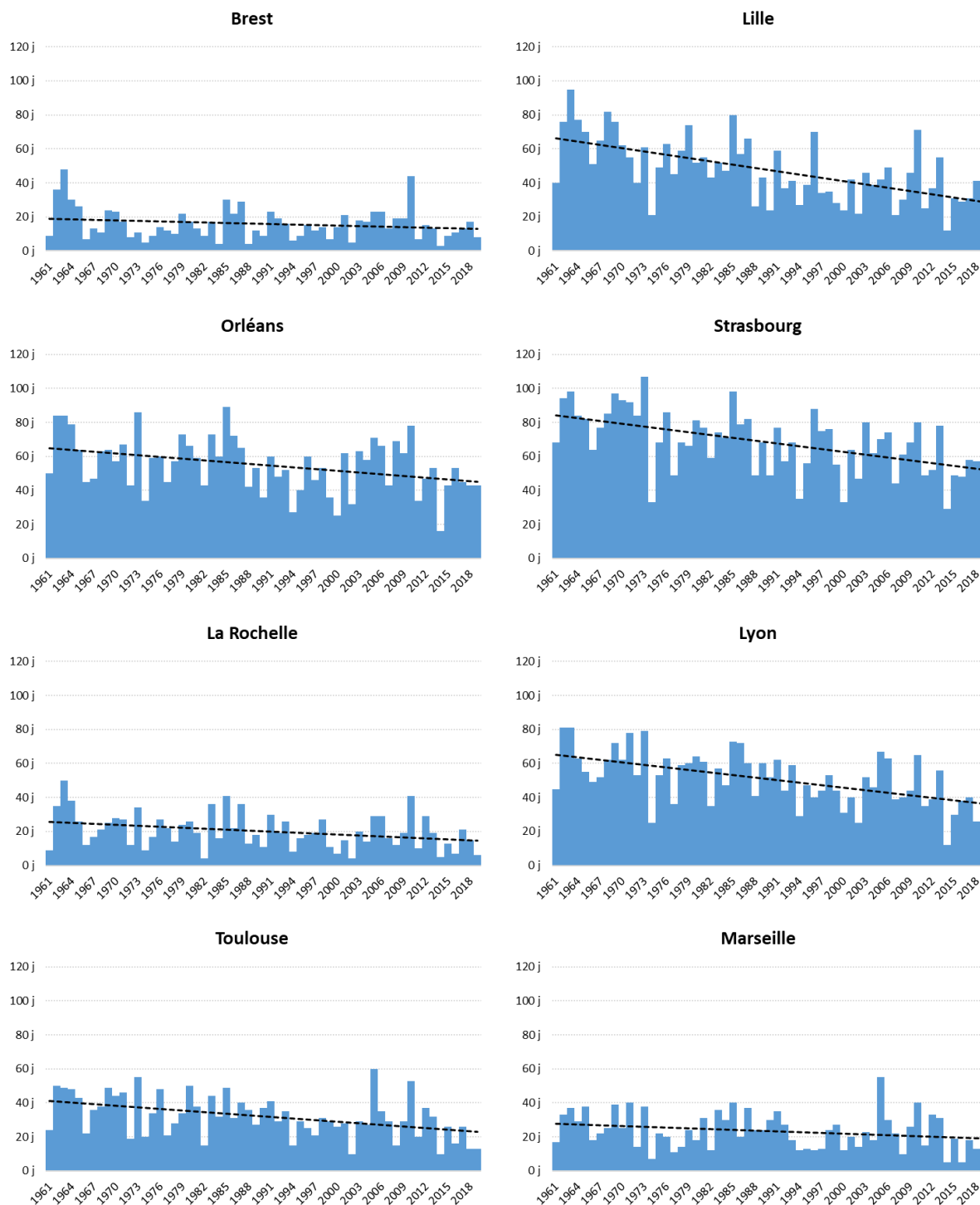
Figure 237 : Test de Pettitt et comparaison de la température moyenne des périodes pré et post-rupture



Réalisation : Beauvais, 2020 (d'après les données Météo France)

En conséquence, le nombre de jours de gel a chuté de près de moitié entre les années 1960 et 2010 (**Figure 238**). A titre d'exemple, Lille et Strasbourg qui dénombraient 70 et 80 jours dans les années 1960, n'ont plus que 30 et 50 occurrences gélives (sur 2011-2019). La Rochelle, Marseille et Toulouse n'observent plus qu'une vingtaine de gelées. Brest, site le plus océanique et donc moins soumis aux gelées n'en relève plus que 10 chaque année.

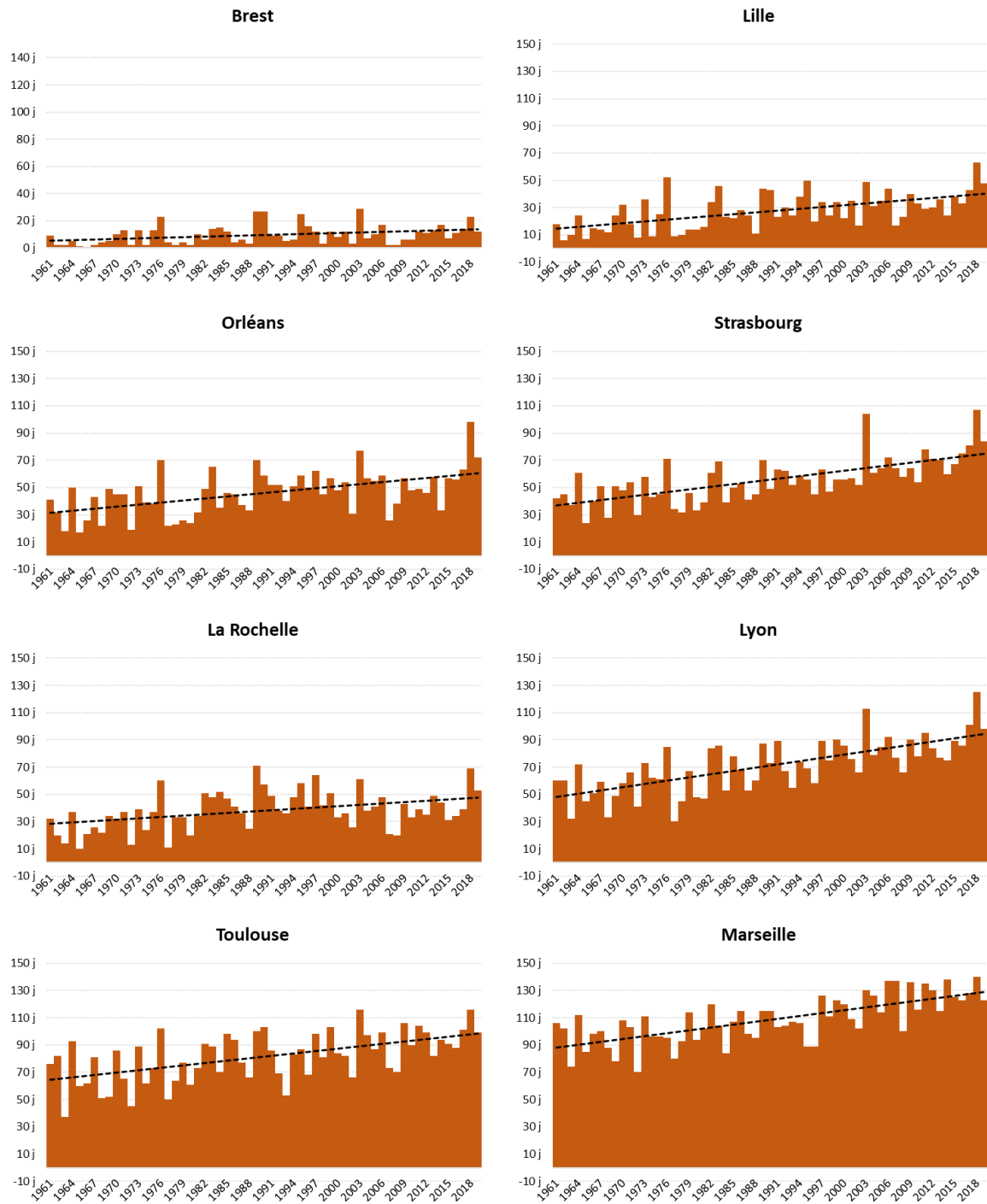
Figure 238 : Evolution du nombre de gelées de 1961 à 2019 pour 8 villes françaises



Réalisation : Beauvais., 2020 (d'après les données Météo France)

Les jours de chaleur ont drastiquement augmenté (**Figure 239**). Marseille en dénombre désormais 130, contre moins de 100 dans les années 1960. Lyon et Toulouse flirtent avec le seuil de 100 jours et Strasbourg avec celui de 80 jours. Orléans en compte plus que Toulouse dans les années 1960. Cette même comparaison s'opère pour Lille par rapport à Orléans. Brest, site normalement épargné par les jours de chaleur en dénombre aujourd'hui 13 occurrences.

Figure 239 : Evolution du nombre de chaleur de 1961 à 2019 pour 8 villes françaises

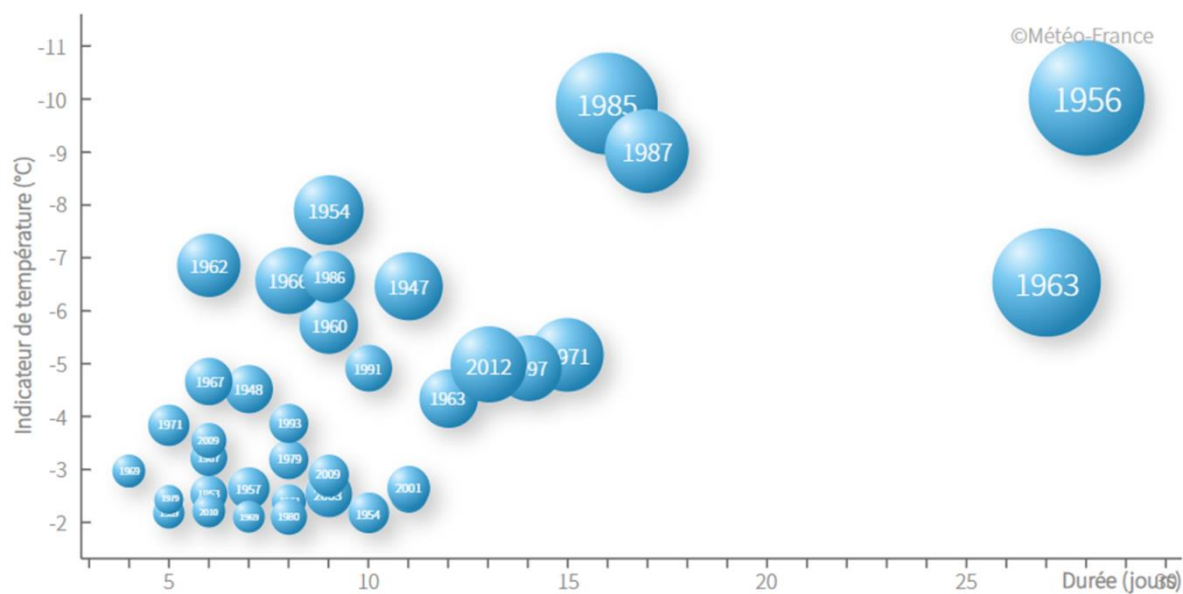


Réalisation : Beauvais., 2020 (d'après les données Météo France)

La durée et l'intensité des vagues de froid diminuent (**Figure 240**). La plus connue est celle de février 1956 avec des valeurs minimales extrêmes (jusqu'à -15°C à Paris et Bordeaux ; -17°C à

Marseille ; -20 à Aix-en-Provence ; -21°C à Macon ; ...) et d'une durée exceptionnelle (trois semaines). Depuis, aucun épisode d'une telle sévérité ne s'est reproduit. Celle de 1963 d'une durée de près de 3 semaines fut moins intense tandis que celles de 1985 et 1987 étaient plus courtes. Les vagues de froid les plus sévères sont observées avant l'an 2000 et celle de 2012 fait désormais figure d'exception.

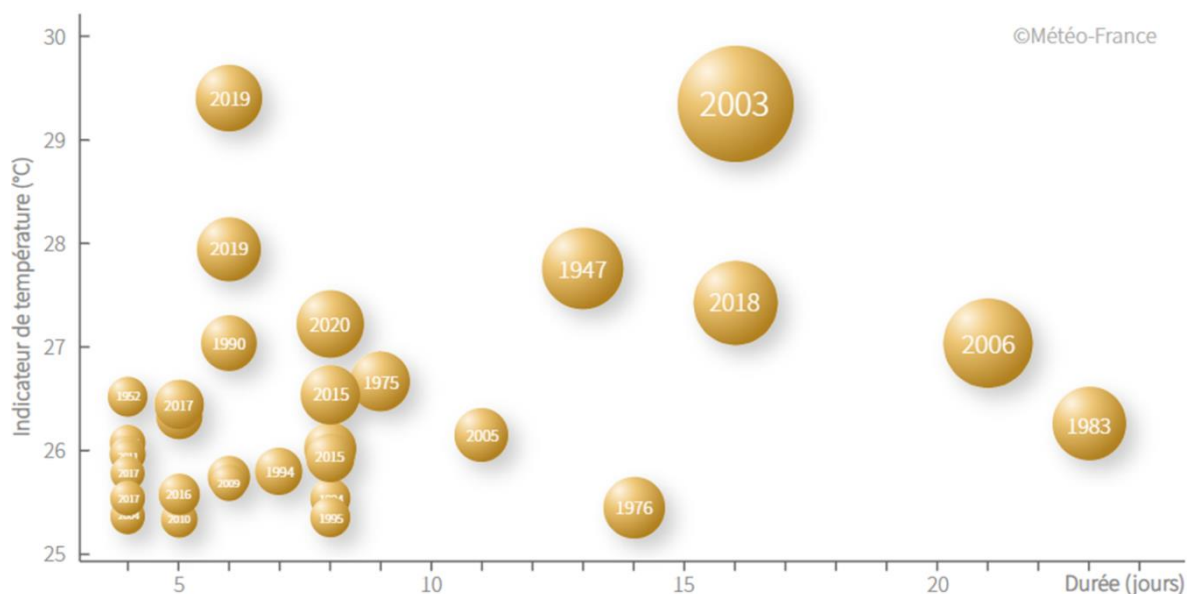
Figure 240 : Des vagues de froid moins nombreuses en moins intenses en France métropolitaine de 1947 à 2020 (d'après Météo-France)



Les vagues de chaleur sont plus récurrentes (**Figure 241**) et correspondent à des températures anormalement élevées sur plusieurs jours consécutifs. D'après Météo France, 41 épisodes sont recensés entre 1947 et 2019¹⁴⁶. Seulement 9 se sont déroulés avant 1989, contre 32 après cette date. Le renforcement de ces vagues de chaleur s'observe notamment par le fait que plus de la moitié ont eu lieu au début du XXI^e siècle. Depuis 2000, seule l'année 2014 n'en a pas subi. Ces épisodes de chaleur peuvent donner lieu à des canicules, durant lesquelles les températures diurnes et nocturnes sont extrêmement élevées. La plus sévère reste celle du 1^{er} au 15 août 2003 engendrant une surmortalité de plus de 15 000 personnes en France (Rousseau, 2005). Récemment, celle du 21 au 29 juillet 2019 est marquée par plusieurs records de température maximales absolues sur plus de la moitié du réseau principal de Météo France. Le seuil de 40°C a été franchi au nord comme au sud du territoire (jusqu'à 46°C à Vérargues dans l'Hérault) en journée, avec des nuits exceptionnellement chaudes (localement plus de 25°C).

¹⁴⁶ Météo France en dénombre 41 entre 1947 et 2019 auquel on ajoute celle d'août 2020, soit 42 épisodes. <http://www.meteofrance.fr/actualites/74317979-changement-climatique-des-canicules-deux-fois-plus-frequentes-ici-2050>

Figure 241 : Des vagues de chaleur plus nombreuses et plus sévères en France métropolitaine de 1947 à 2020 (d'après Météo-France)



Les conséquences de l'élévation s'observent également en montagne où elle est d'ailleurs plus importante qu'en plaine (+2°C de 1900 à 2016 dans les Alpes). Les conditions d'enneigement ont évolué comme en témoignent les relevés au col de Porte (Isère). La limite pluie/neige s'élève, engendrant une augmentation de la part des précipitations liquides au détriment des précipitations solides. Le cumul de précipitations neigeuses est plus faible, tout comme la durée d'enneigement (fonte précoce des neiges au printemps). La hauteur moyenne du manteau neigeux entre les périodes 1960-1990 et 1990-2020 a diminué de 38 cm. Les glaciers quant à eux diminuent en surface, épaisseur et donc en volume. A titre d'exemple, la surface du glacier d'Ossoue (entre 2800 et 3200 m ; **Figure 24**) dans les Pyrénées a diminuée de 64 % (de 90 à 32 Ha) entre 1924 et 2019.

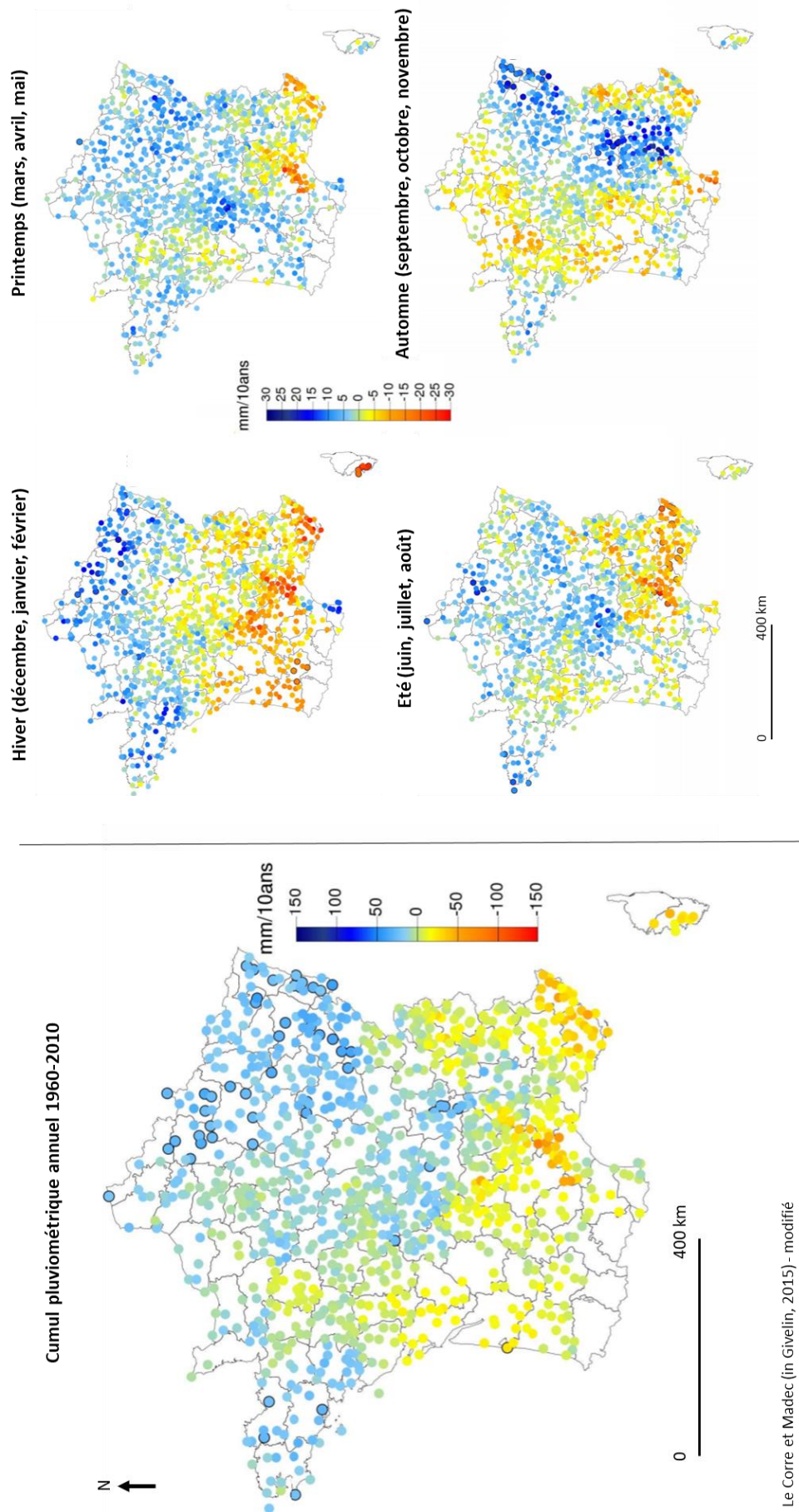
Figure 242 : Recul du glacier d'Ossoue dans le massif du Vignemale (Pyrénées françaises) entre 2000 et 2009



Du côté du cumul pluviométrique, il n'y a pas de tendance significative à l'échelle du territoire national (**Figure 243**). Les évolutions ne sont que peu marquées et peuvent différer selon la période

analysée. Cependant, s'il fallait caractériser ces évolutions, sur la période 1960-2010, on constate une augmentation des précipitations totales annuelles dans la moitié nord (à l'exception de l'intérieur des terres du Grand-Ouest) et une diminution dans la moitié sud. Cependant, la hausse est surtout perceptible dans le nord-est (jusqu'à 100 mm localement) et la baisse dans le sud-est (50 à 100 mm). A l'échelle saisonnière cette analyse vaut également au printemps et en été. En automne, les précipitations diminuent sur la moitié ouest (à l'exception de la Bretagne) tandis qu'elles augmentent à l'est (à l'exception des Alpes). En hiver, les pluies se renforcent au nord et déclinent au sud.

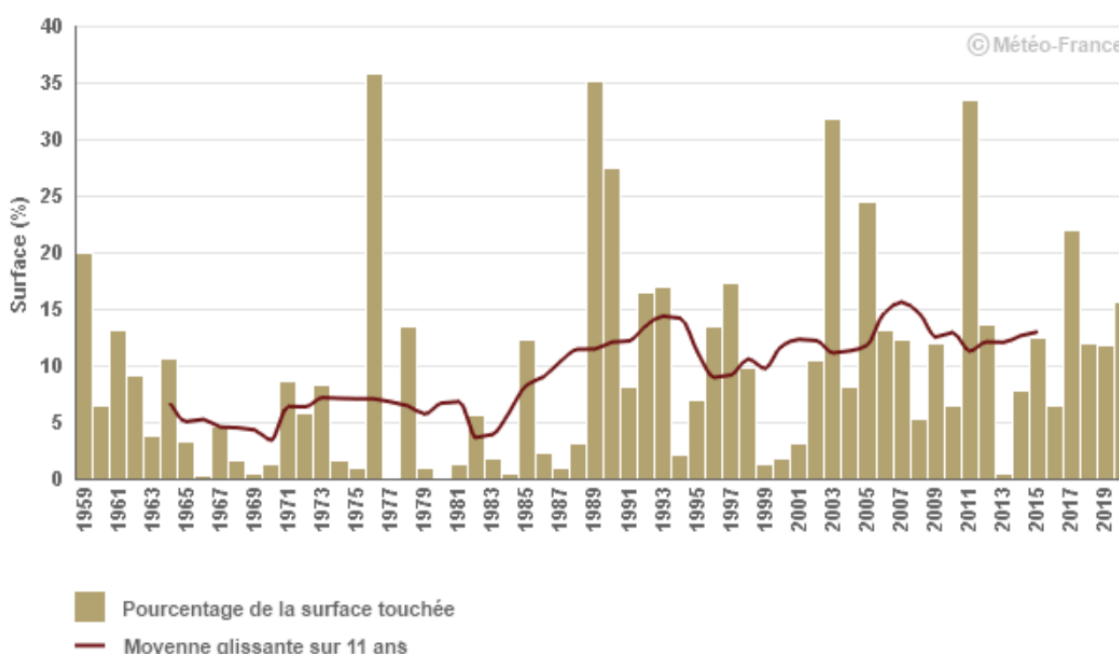
Figure 243 : Evolution du cumul pluviométrique sur la période 1960-2010



Le Corre et Madec (in Givelin, 2015) - modifié

A l'échelle du territoire français, il n'y a pas d'évolution significative des sécheresses météorologiques qui correspondent à un déficit de précipitations. En revanche, compte tenu du réchauffement et de l'augmentation associée de l'évapotranspiration, les sécheresses édaphiques (agricoles) progressent. Elles correspondent à un déficit hydrique des sols. Le projet ClimSec (2008-2011) caractérise les sécheresses en France à partir de la réanalyse de la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) sur la période 1958-2010 (Soubeyroux et *al.*, 2011 ; Soubeyroux et *al.*, 2012 ; Vidal et *al.*, 2010a ; Vidal et *al.*, 2010b). Plusieurs sécheresses ont eu lieu au cours des dernières décennies : 1976, 1989, 2003 et 2011. Leur fréquence et intensité sont en hausse. Depuis les années 1990 les surfaces touchées par la sécheresse augmentent (**Figure 244**) en raison d'un assèchement des sols.

Figure 244 : Pourcentage annuel de la surface des sols touchée par la sécheresse en France métropolitaine sur la période 1959-2020



Les épisodes de précipitations intenses extrêmes (cumul quotidien supérieur à 150 et 200 mm), augmentent quant à eux en fréquence et en intensité.

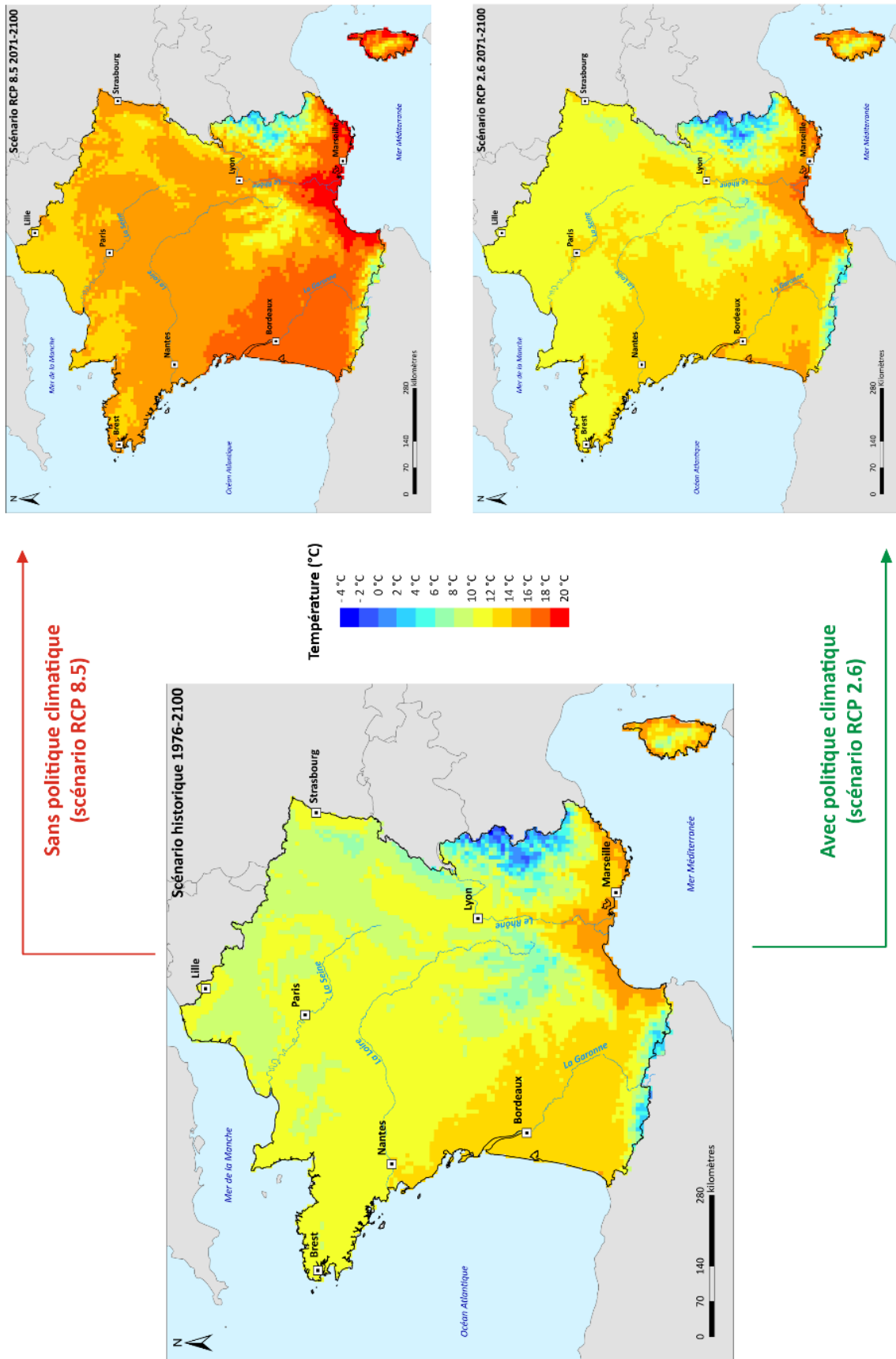
Aucun signal d'évolution significative des tempêtes ne se dégage dans la variabilité interannuelle de leur occurrence. Les années 1980 sont les plus marquées avec parfois plus de 15 évènements par année (1981, 1984 et 1988). Leur fréquence diminue dans les années 2000 alors qu'une augmentation est constatée la décennie suivante (Météo-France HD).

3. Quel climat en France à l'horizon 2100 ?

Nous avons vu précédemment que la résolution des modèles globaux est de l'ordre de 100 km de côté. Elle est insuffisante pour distinguer les disparités climatiques à l'échelle du territoire français et pour mener des études d'impacts. Les données à fines résolutions spatiales sont obtenues par descente d'échelle (régionalisation) afin de prendre en compte les caractéristiques de la surface telles que la topographie, l'occupation du sol, l'hydrologie, etc. Cette descente d'échelle peut être dynamique, en mobilisant un modèle régional, c'est-à-dire à aire limitée (résolution de 12 km) et dont les conditions aux limites sont celles du modèle global. Mais il existe aussi la méthode statistique recourant à des fonctions mathématiques qui établissent un lien entre les conditions globales et locales. L'évolution du climat français, présentée ci-dessous s'appuie sur les données sorties du modèle régional ALADIN-Climat (décrites dans le chapitre 3). Les scénarios RCP 2.6 et 8.5 permettent d'exposer l'enveloppe des possibles à l'horizon 2100 (Normale 2071-2100) comparativement à la période de référence 1976-2005.

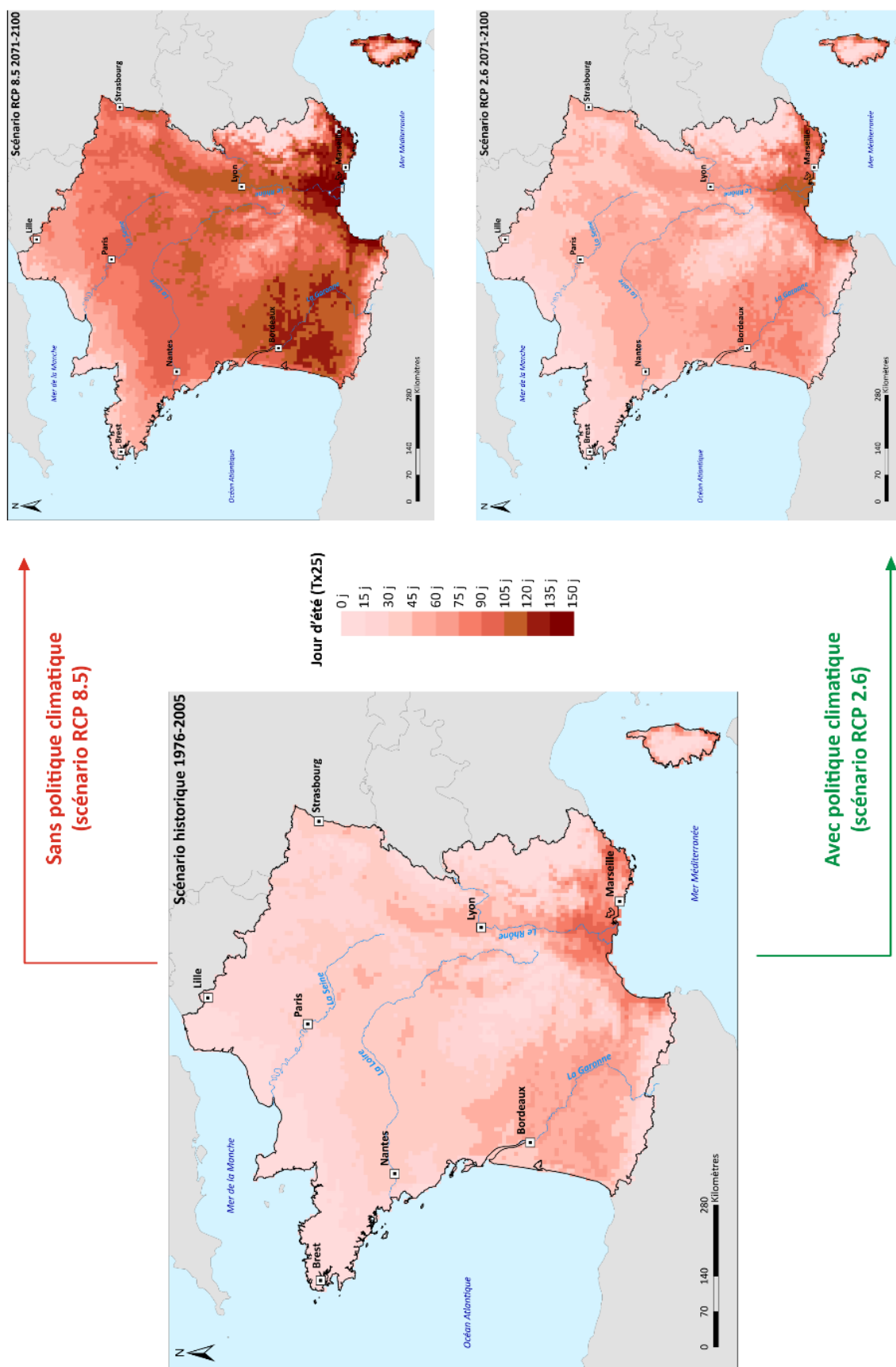
L'élévation des températures en France pourrait être de +1 à +1,5°C dans le cas du respect des accords de Paris 2015 sur le climat (scénario « bas » RCP 2.6 ; **Figure 245**). Les jours de chaleurs augmenteraient en moyenne de 15 jours (de 34 à 49 jours ; **Figure 246**) et les jours de gel diminueraient de 13 jours (de 52 à 39 jours ; **Figure 247**). En revanche dans le cas d'une poursuite de la trajectoire actuelle des gaz à effet de serre (scénario « haut » RCP 8.5), l'augmentation de la température serait alors de l'ordre de +4°C (**Figure 245**). A l'ouest, le réchauffement serait un peu moins important, notamment pour le département de la Manche et le Finistère occidental sous le seuil de +3 °C. L'augmentation la plus sévère (entre +4,5 et 5 °C) concernerait le sud du massif du Jura, les Vosges, les Préalpes, les hauteurs du Morvan et les contreforts ouest et est du Massif Central. En conséquence, les températures moyennes des régions du nord de la France seraient celles qui caractérisent aujourd'hui le sud du pays. Le nombre de jours d'été augmenterait en moyenne de 15 unités (de 34 à 49 jours) avec le premier scénario (**Figure 246**). Les jours de gel diminueraient de 13 jours (de 52 à 39 jours ; **Figure 247**). Les changements sont beaucoup plus prononcés avec le second scénario. Les journées où la température maximale dépasse 25°C passeraient en moyenne de 34 à 90 jours. Le sud et le centre de la France (à l'exception des zones d'altitudes) enregistreraient plus de 100 jours de chaleur à l'année, alors même qu'en période de référence ce cumul ne concerne que les zones les plus chaudes du Gard et du Var. A long terme, ces deux derniers départements auraient des journées estivales sur presque la moitié de l'année (plus de 150 jours). Les régions les plus préservées, avec moins de 50 jours de chaleur à l'année seraient celles du nord et de l'ouest, principalement à proximité de la mer de la Manche et de l'Atlantique. Les sites d'altitude resteraient également épargnés. Le nombre de gelées serait en moyenne de 19 jours, soit 33 jours de moins que sur la période 1976-2005 où seules les façades maritimes de l'ouest et le pourtour méditerranéen cumulent actuellement aussi peu de jours de gel. Avec ce scénario, l'ensemble du territoire, excepté les régions de moyennes et de hautes montagnes se situeraient sous ce seuil compte tenu de la douceur des hivers.

Figure 245 : Comparaison de la température moyenne annuelle en France sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100



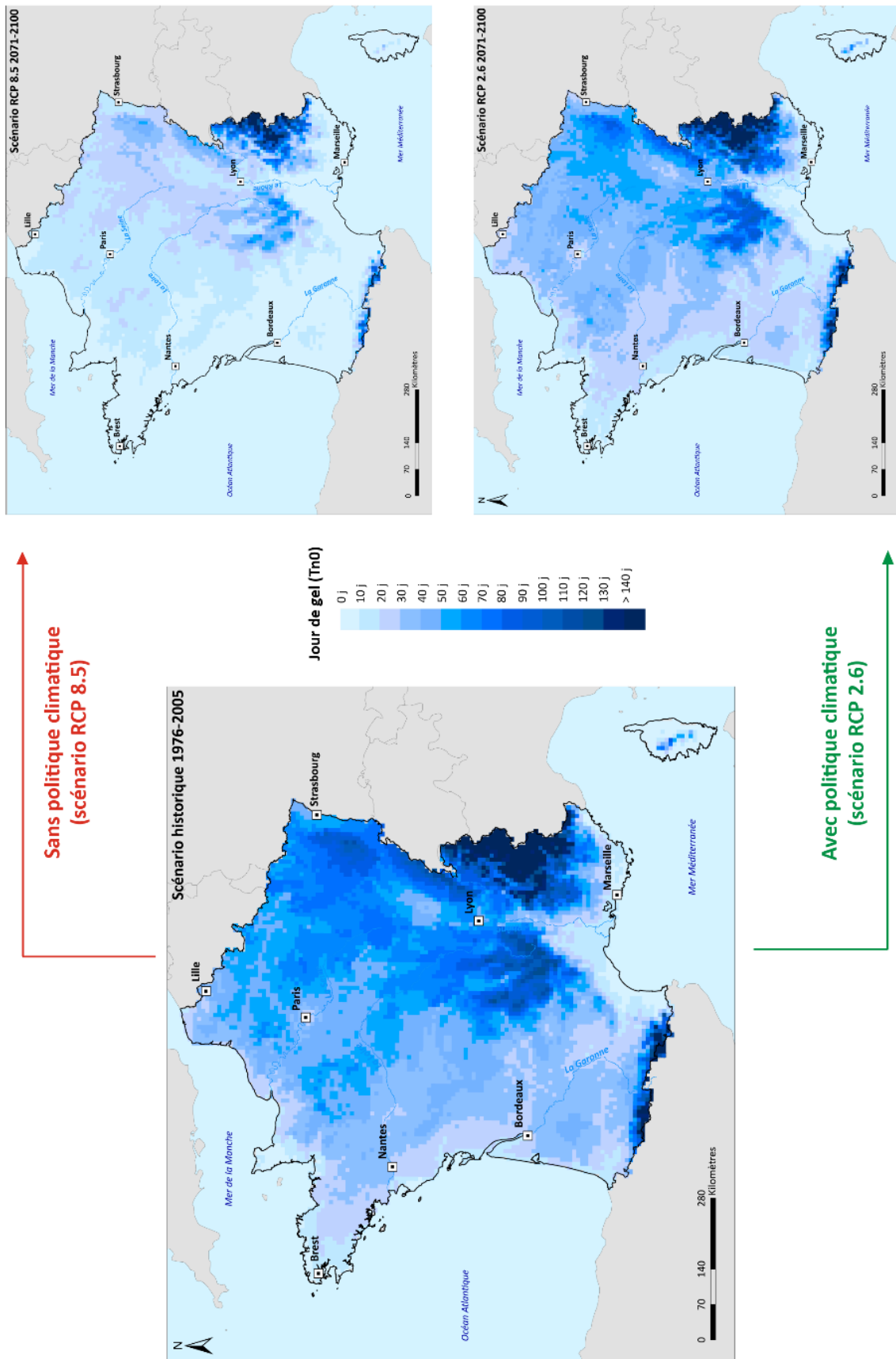
François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)

Figure 246 : Comparaison du nombre de jours de chaleur annuel ($T_{\text{maxi}} > 25^{\circ}\text{C}$) en France sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100



François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)

Figure 247 : Comparaison du nombre de jours de gel annuel ($T_{\text{mini}} \leq 0^{\circ}\text{C}$) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100

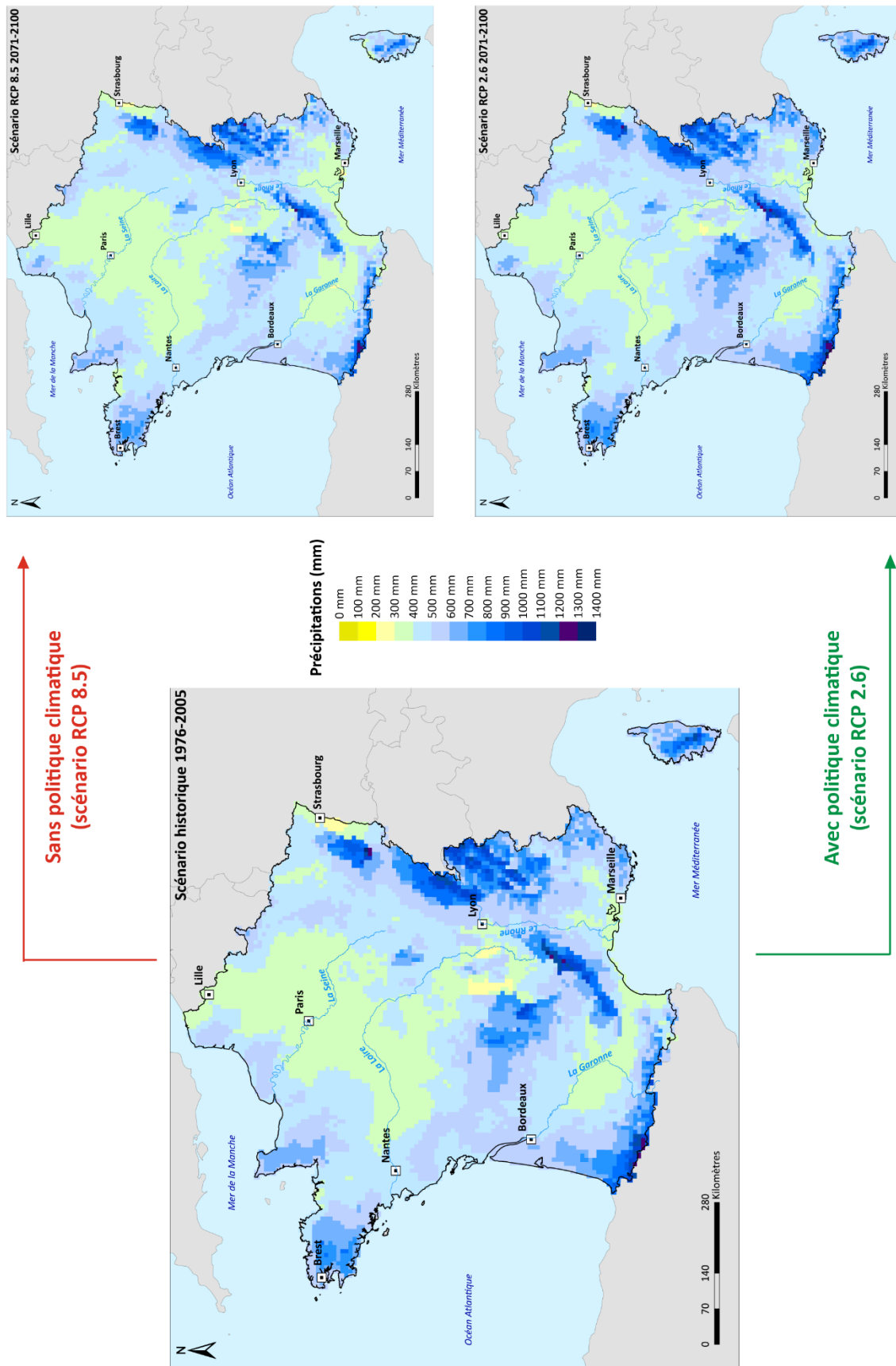


François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)

La cartographie des précipitations automnales et hivernales (**Figure 248**) à partir du scénario RCP 2.6 reste assez proche de celle de la période de référence. Une légère diminution est en revanche constatée pour le scénario RCP 8.5 de l'ordre de -6 % en moyenne. Néanmoins, au sein de cette "saison morte", les automnes seraient plus secs (-21 %) alors que les hivers deviendraient un peu plus humides (+10 %). Le cumul pluviométrique sur la période printanière et estivale (**Figure 249**) resterait globalement inchangé pour le scénario optimiste, malgré une très légère diminution à l'ouest et au sud. En revanche, avec le scénario pessimiste, il diminuerait d'environ 8 % (de 906 à 833 mm) pour l'ensemble du territoire. Cette diminution serait plus forte dans le Nord-Ouest, l'Ouest et le Sud-Ouest du pays, ainsi qu'à l'ouest du massif central, dans le Jura et sur le pourtour méditerranéen (entre -15 et -20 %). La Bretagne et l'ouest de la Normandie connaîtraient la réduction la plus forte (-20 %).

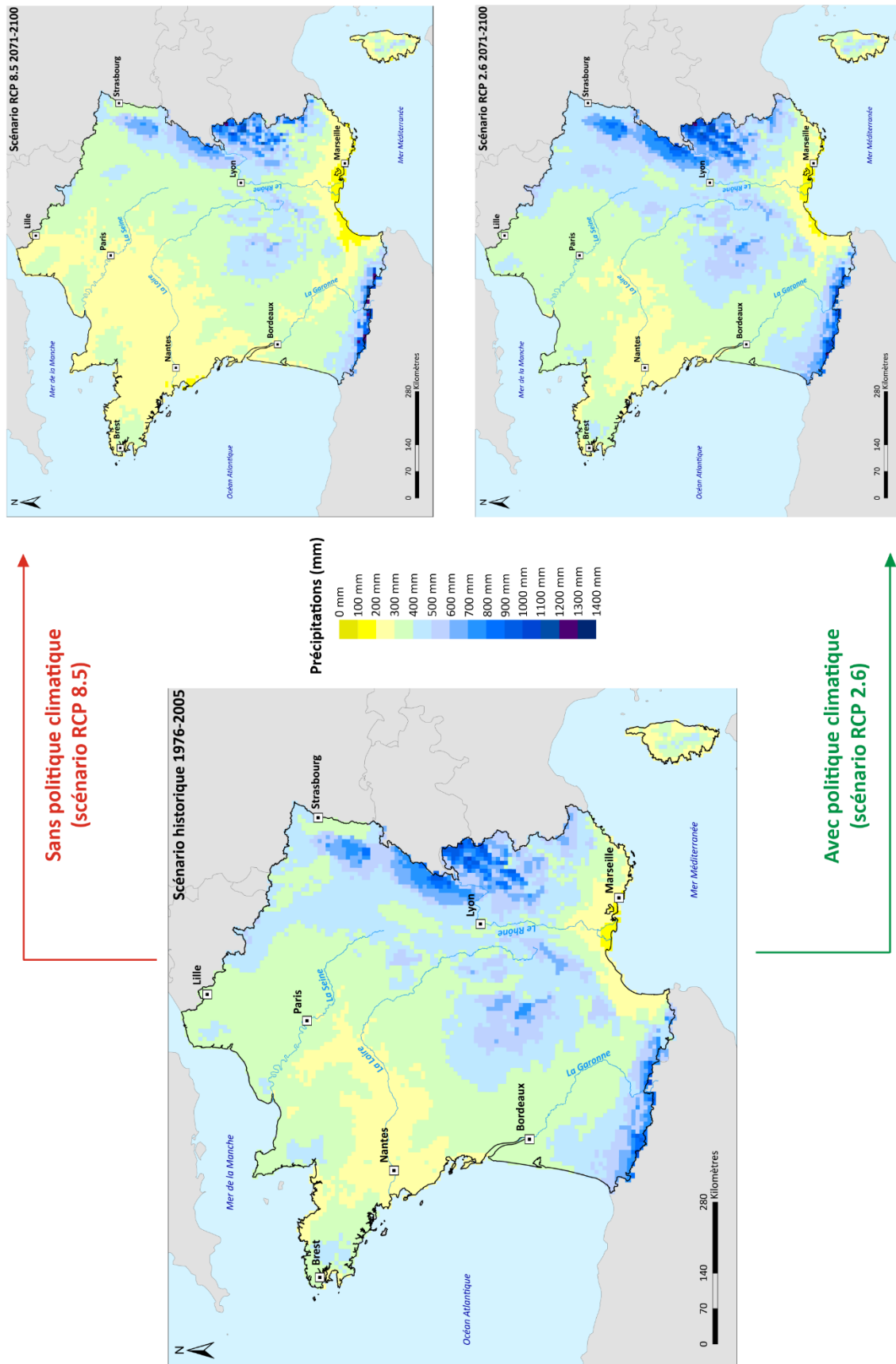
Au final, compte-tenu de l'augmentation de la température et de la diminution du cumul pluviométrique, le profil bioclimatique des régions françaises s'en trouverait affecté (**Figure 250**). L'étendue des régions classées « humides » se réduirait aux espaces montagneux. Les contreforts de ces massifs et les reliefs de l'ouest de la France n'entreraient plus dans cette catégorie. Les plaines céréalières passeraient de « subsec » à « déficient », tandis que l'étendue de la catégorie « sec » - caractéristique actuellement des régions méditerranéennes - s'étendrait considérablement vers le nord via la vallée du Rhône et vers le nord-ouest via la vallée de la Garonne.

Figure 248 : Comparaison du cumul pluviométrique sur la période automnale et hivernale (octobre – mars) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100



François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)

Figure 249 : Comparaison du cumul pluviométrique sur la période printanière et estivale (avril - septembre) en France de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100

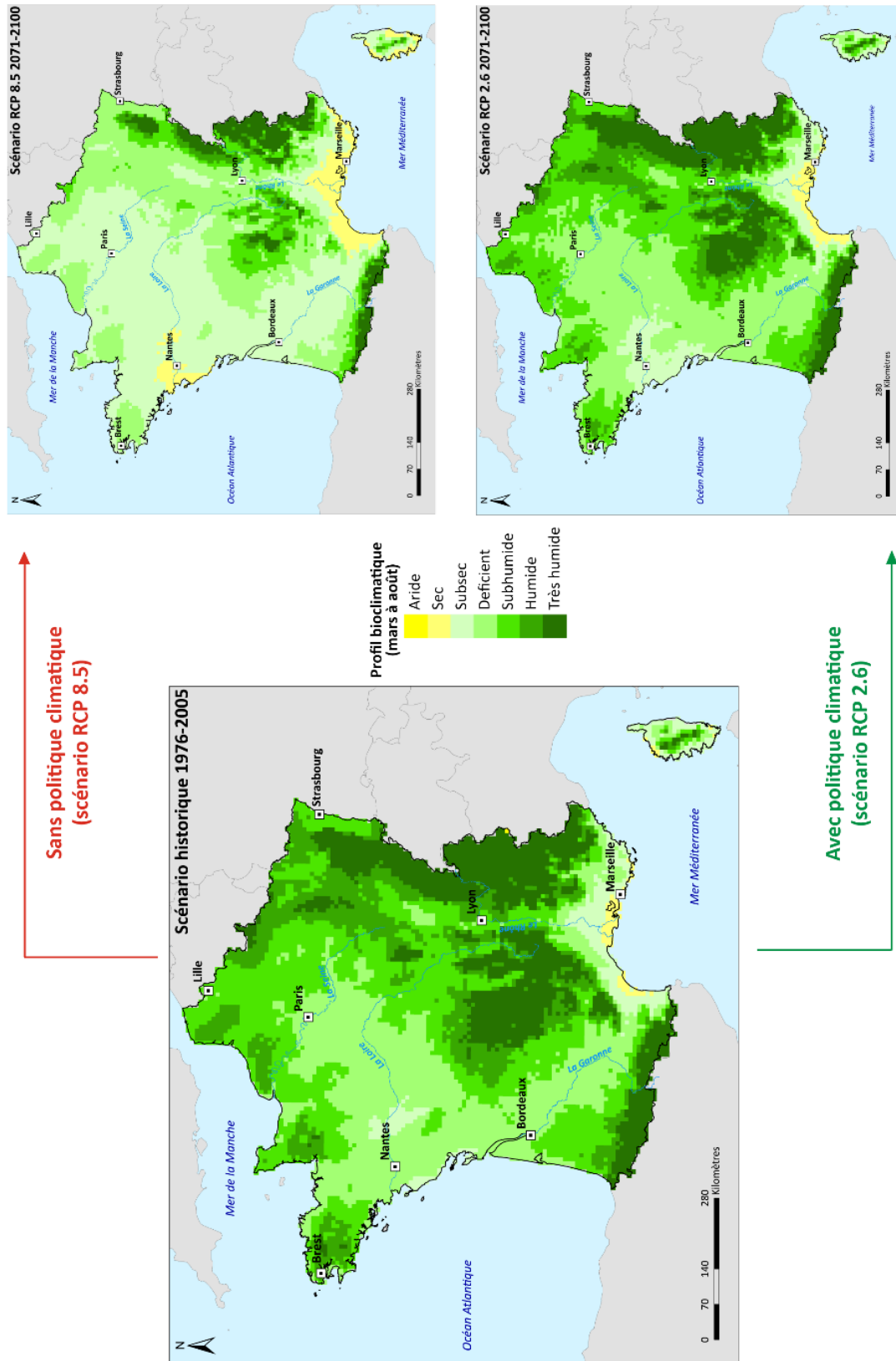


Sans politique climatique
(scénario RCP 8.5)

Avec politique climatique
(scénario RCP 2.6)

François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)

Figure 250 : Comparaison du profil bioclimatique du printemps et de l'été sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100



François Beauvais, 2020 (données CNRM-2014)
 Classification effectuée à partir de l'échelle d'Houzard (cité par Amat et al., 2008) où le profil bioclimatique, appelé également biofacès, correspond au rapport P/T allant d'aride (< 1) à hyperhumide (> 6).

Augmentation de la température, vagues de chaleur, diminution des gelées, fonte des glaces, sécheresses, ... le changement climatique est constaté sur l'ensemble de l'Hexagone. Cette évolution du climat devrait se poursuivre dans les prochaines décennies. Des conséquences sont attendues sur les sociétés, les territoires et les milieux. Si la Normandie est située au nord-ouest du pays et profite d'un climat tempéré océanique, elle n'est et ne sera pas épargnée par ce processus.

Questionnaire à l'intention des agriculteurs de la Plaine de Caen

Ce questionnaire est réalisé dans le cadre d'un mémoire de recherche en géographie à l'Université de Caen Normandie (UFR SEGGAT – Département de géographie).

Renseignement enquêteur

1. Code enquête :

2. Localisation du siège social :

Renseignements sur l'enquêté et son exploitation agricole

L'enquêté :

3. Actuellement vous êtes :

- Chef d'exploitation
- Ouvrier agricole
- Membre de la cellule familiale du chef d'exploitation et intervenant sur l'exploitation :
- Membre de la cellule familiale du chef d'exploitation mais n'intervenant pas sur l'exploitation :
- Associé dans le capital de l'exploitation mais non agriculteur
- Chef d'exploitation retraité
- Ouvrier agricole retraité
- Autre :

4. Depuis combien de temps exercez-vous ce métier ?

5. Quel âge avez-vous ?

6. Quel est votre niveau d'étude ?

7. Etes-vous investis dans une organisation en lien avec l'agriculture ?

- Oui
- Non

8. Si oui, précisez de laquelle il s'agit et dans quel but :

.....
.....

L'exploitation :

4. Votre exploitation est :

- Autonome (exploitant individuel ou exploitation familiale)
- EARL
- En GAEC
- Autre :

5. De combien d'hectares disposez-vous (propriété et fermage) ?

6. Où sont localisées vos terres ?
.....
.....
.....

7. Quelle est la spécialisation de votre exploitation ?.....
.....
.....

8. Quelle sont les cultures majoritaires ?
.....
.....

9. Au près de quelle(s) société(s) vos productions sont exportées ?
.....
.....
.....

Agriculture et avenir : des inquiétudes générales au changement climatique

Inquiétudes générales sur l'avenir de l'agriculture

10. Des éléments vous inquiètent-ils pour l'avenir de votre exploitation agricole ?

- Oui
- Non

10a. Si oui lesquelles ?

.....
.....
.....

10b. Pour quelles raisons ?

.....
.....
.....

Inquiétudes liés au changement climatique

11. Le changement climatique est-il une inquiétude pour vous ?

- Oui
- Non
- Sans avis

12. Pour quelles raisons ?

.....
.....
.....
.....
.....

13. Avez-vous remarqué des changements liés à votre activité qui peuvent y être rattachés ?

- Oui
- Non

13a. Si oui lesquels ?

.....
.....
.....

14b. Ces changements vous causent-ils des dommages ?

- Oui
- Non
-

14c. Si oui, précisez :

.....
.....
.....
.....

15. Diriez-vous que vos cultures manquent d'eau ?

- Oui constamment (chaque année)
- Oui lors des années dites sèches (mais récurrentes)
- Oui lors d'années dites sèches (occasionnellement)
- Oui mais rarement
- Jamais

15a. Si oui, cela vous occasionne t-il des pertes ?

- Oui
- Non

15b. Si oui, avez-vous remarqué une intensification du phénomène au cours de votre carrière ?

- Oui
- Non
- Ne sais pas car le phénomène est trop variable
- Ne se prononce pas

16. Comment pensez-vous que la réserve en eau de vos terres répondra au changement climatique ?

.....
.....
.....

Stratégies d'adaptations

17. Avez-vous déjà envisagé ou envisagez vous des stratégies d'adaptation face aux éléments précédemment cités ?

- Oui
- Non

17a. Si oui lesquelles ?

.....
.....
.....

17b. Si non pour quelles raisons ?

.....
.....
.....

18. Prenez-vous en compte le changement climatique dans le développement de votre exploitation ?

- Oui
- Non

Moyens d'information sur le changement climatique, réglementations et rapports avec les organisations et instances

19. Comment vous informez-vous sur le sujet du changement climatique ?

.....
.....
.....

20. Êtes-vous informé sur des réglementations, conseils, outils mis en place pour vous informer et vous adapter au changement climatique ?

.....
.....
.....

21. Êtes-vous consulté pour des stratégies d'adaptation dans le but de contrer les inconvénients du changement climatique ?

- Oui
- Non

22. Si oui, par qui ?

.....
.....

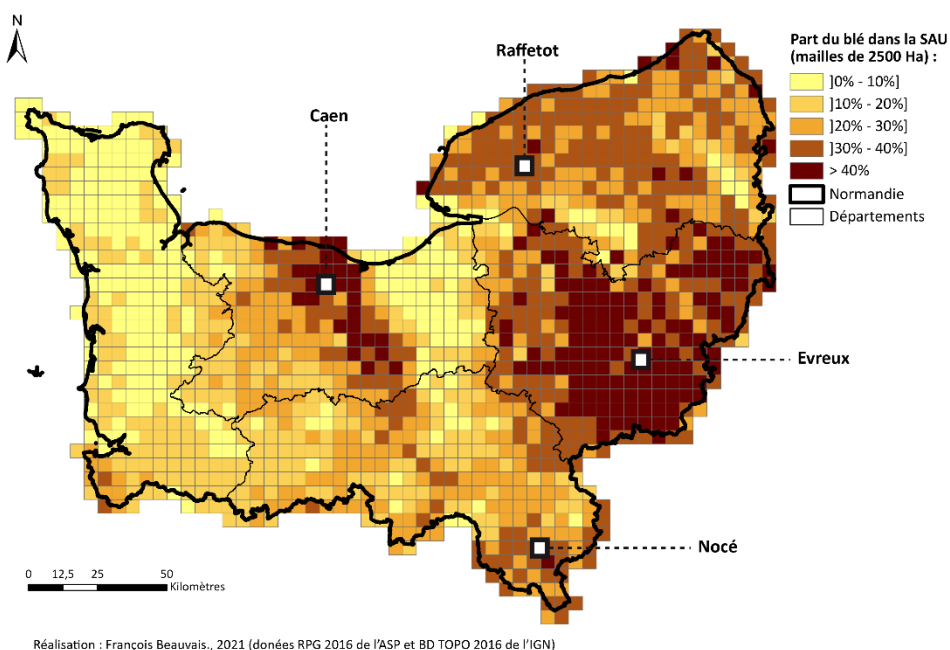
23. Acceptez-vous de poursuivre ce questionnaire sous forme d'entretien ?

- Oui
- Non

Annexe 10. Evolutions phénoclimatiques du blé tendre d'hiver pour 4 plaines céréalières normandes sur la période 1961-2020.

Afin de savoir si ces évolutions constatées pour la Plaine de Caen dans le chapitre 5 le sont dans les 3 autres grandes plaines céréalières de Normandie et, analyser des différences, nous comparons quatre sites représentatifs des plaines céréalières : Caen (Plaine de Caen - 14), Nocé (Perche - 61), Evreux (Plaine d'Evreux et de Saint-André - 27) et Raffetot (Pays de Caux - 76) (**Figure 251**). Les sommes de températures mobilisées sont celles relevées au champ à Anguerny lors de la campagne 2018-2019 dont la précocité est intermédiaire. Dans ce cas, la date de semis ne peut pas être tardive car elle engendrerait un début de montaison retardataire pour les deux sites intérieurs (Nocé et Evreux) où les hivers sont un peu plus rudes. Mais les semis ne peuvent pas être trop anticipés sur les deux sites les plus océaniques (Caen et Raffetot) sans quoi la végétation serait trop avancée en sortie d'hiver, dont la particularité est d'être plus doux qu'à l'intérieur des terres. Le 25 octobre semble être la période de semis la plus polyvalente entre ces plaines agricoles de façon à ce que les stades se déroulent à des dates réalistes sur la dernière Normale climatique. Les calculs phénoclimatiques ont été effectués à partir des données SAFRAN de Météo-France.

Figure 251 : Les 4 sites représentatifs des plaines agricoles normandes sur la carte du blé



La réduction de la durée du cycle est constatée sur les quatre sites entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020 : - 12 jours à Caen ; - 15 jours à Nocé ; - 13 jours à Evreux et - 14 jours à Raffetot. Par conséquent la date de maturité intervient plus tôt dans le calendrier puisqu'elle est avancée du 24 au 12 juillet à Caen ; 1^{er} août au 17 juillet à Nocé ; du 2 août au 20 juillet à Evreux et du 1^{er} août au 18 juillet à Raffetot. La variabilité de cette durée totale du cycle est en légère diminution (**Figure 252 A**).

L'exigence en vernalisation (45 jours) est satisfaite sur l'ensemble des sites (**Figure 252 B**). D'ailleurs les variétés de type hiver nécessitant plus de 60 jours de basses températures sont faisables. Néanmoins, si les semis sont plus tardifs, il conviendrait d'être vigilant car ce cumul

débiterait plus tardivement, ce qui pourrait initier un stade épi 1 cm retardataire ou dans le cas le plus pessimiste empêcher la montaison. Sur les deux sites océaniques, Caen et Raffetot, la diminution est d'environ 10 jours, passant respectivement de 95 à 85 jours et de 105 à 96 jours. En revanche, à Nocé et à Evreux la réduction n'est que d'environ 4 jours, ce qui s'explique par une compensation. Les jours où la température moyenne est inférieure à 3 °C entrent désormais dans la gamme 3 à 10 °C de la vernalisation. Par ailleurs, en raison du raccourcissement en durée des périodes phénologiques, la durée de cumul des jours de vernalisation est réduite.

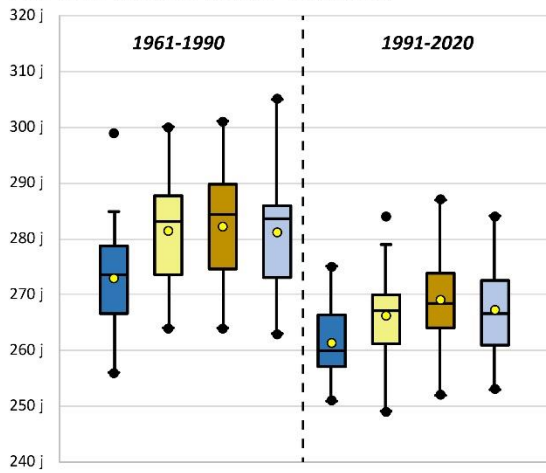
Cette variété est semée à la même date sur les quatre sites. Compte tenu des hivers plus rudes à l'intérieur des terres, la montaison débute plus tard que dans les sites plus océaniques. A titre d'exemple sur la période 1991-2020, elle débute le 24 mars à Raffetot contre le 2 avril à Nocé. Par conséquent le blé tendre profite d'un rayonnement plus important à Nocé et à Evreux puisque qu'il est plus important à mesure que l'on avance dans le printemps, notamment en raison de l'allongement de la durée du jour. Le rayonnement cumulé entre le stade épi 1 cm et la floraison a augmenté de 12 % à Nocé, passant de 20 560 cal/cm² à 22 585 cal/cm² entre les deux Normales climatiques 1961-1990 et 1991-2020. Sur les autres sites cette hausse est de l'ordre de 6 % : de 20 500 à 21 581 cal/cm² à Caen ; de 20 561 à 21 813 cal/cm² à Evreux et de 21 781 à 23 306 cal/cm² à Raffetot. La variabilité interannuelle reste globalement inchangée, malgré une valeur extrême à Raffetot (année 1991) en raison de stades tardifs qui profitent d'un rayonnement plus prononcé qu'à l'habitude (**Figure 252 E**).

Les régions intérieures sont plus vulnérables à l'échaudage thermique lors de la formation et du remplissage du grain en raison de l'éloignement à la mer qui limite l'effet doucissant de celle-ci, différence qui s'exprime ici compte-tenu de la même date de semis pour une même variété. L'échaudage thermique augmente de 2,5 jours à Caen, passant de 3,8 à 6,3 jours. La hausse est moins prononcée sur les autres sites. Elle est de 1,3 jours à Raffettot, où le cumul passe de 2,9 à 4,2 jours. A Evreux l'augmentation n'est que d'une journée puisque 10 jours d'échaudage thermique sont relevés sur la Normale 1991-2020. A Nocé il s'agit également de 10 jours de chaleurs, mais le bilan est inchangé entre les deux Normales climatiques compte-tenu d'une anticipation de la maturité un peu plus prononcée. Les valeurs extrêmes de la Normale 1961-1990 se dégageant des moustaches des boxplots correspondent au nombre de jours de chaleur rencontrées en 1976. Un tel cumul de jours échaudant n'est pas rencontré sur la Normale 1991-2020. Si l'on retire l'année 1976 de la première Normale, on constate que la variabilité interannuelle est plus importante pour la seconde en raison d'une récurrence des années très échaudantes (**Figure 252 C**).

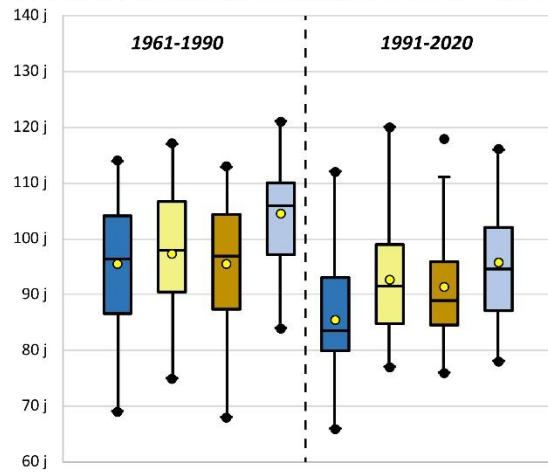
Pour comparer les quatre régions agricoles, nous avons considéré un sol moyen d'un RUM de 100 mm. Par conséquent, les valeurs de déficit hydrique exposées seraient plus importantes pour un sol mince et plus faibles pour un sol épais. Le manque d'eau pour la plante est un peu plus prononcé dans le Perche et en Plaine d'Evreux où il est respectivement de 103 et 94 mm contre 84 et 76 mm en Plaine de Caen et en Pays de Caux sur la Normale 1991-2020. Ces déficits hydriques n'ont que peu évolué par rapport à la Normale 1961-1990 à Caen (2 %), Evreux (- 4 %) et Raffettot (4 %). En revanche à Nocé une hausse de 12 % est constatée (**Figure 252 C**).

Figure 252 : Evolution des principaux indicateurs phénoclimatiques du blé tendre pour quatre sites normands sur la période 1961-2020

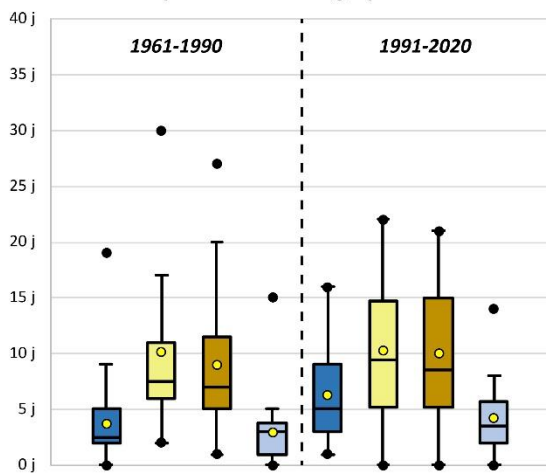
A. Durée du cycle (semis - maturité)



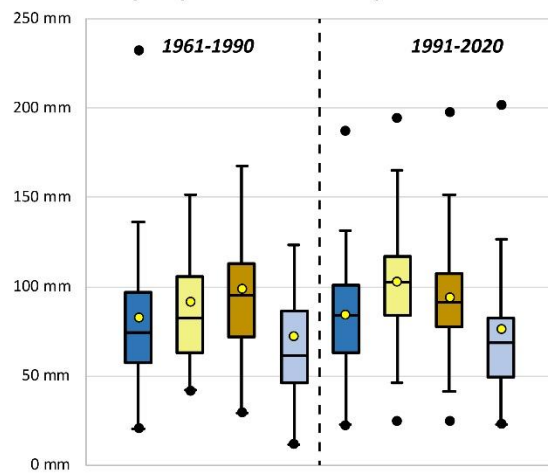
B. Nombre de jours de vernalisation (levée - épi 1 cm)



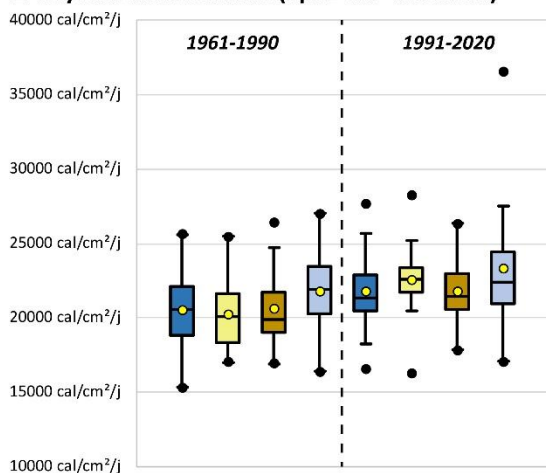
C. Nombre de jours d'échaudage (mésiose - maturité)



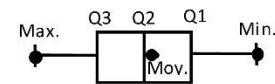
D. Déficit hydrique RUM 100 mm (semis - maturité)



E. Rayonnement cumulé (épi 1 cm - floraison)



■ Caen ■ Evreux
■ Nocé ■ Raffetot



Réalisation : François Beauvais., 2021 (simulation bioclimatique à partir des données SAFRAN de Météo France)

Les basses températures à la méiose sont rarement rencontrées, entre 1 et 3 années sur 10 selon les lieux (**Tableau 63**). Lorsqu'elles interviennent il s'agit au maximum de deux journées. Bien que l'on pourrait penser que l'avancée des stades occasionnée par l'élévation de la température puisse rendre vulnérable le blé à cet aléa, il n'y a pas de tendances qui se dégagent.

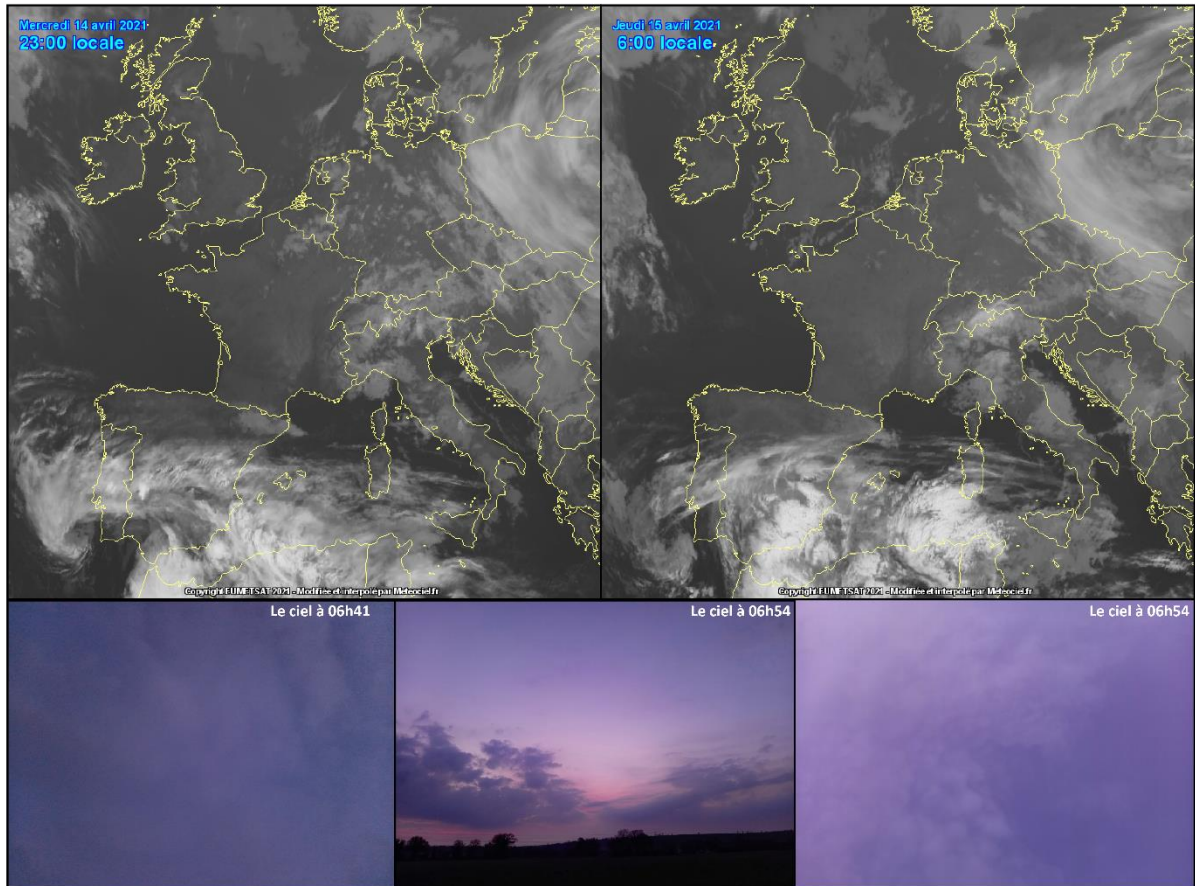
Tableau 63 : Nombre d'année avec au moins une occurrence de basses températures sur la période proche méiose pollinique et le nombre de jours maximum associé dans les plaines céréalières Normandes

	Caen	Nocé	Evreux	Raffetot
1961-1970	02/30a 1 j	02/30a 1 j	01/30a 1 j	00/30a 1 j
1971-1980	03/30a 2 j	01/30a 2 j	01/30a 2 j	01/30a 2 j
1981-1990	02/30a 1 j	02/30a 1 j	02/30a 1 j	02/30a 1 j
1991-2000	01/30a 2 j	01/30a 1 j	01/30a 1 j	00/30a 1 j
2001-2010	03/30a 2 j	01/30a 2 j	03/30a 2 j	01/30a 2 j
2011-2020	02/30a 1 j	02/30a 1 j	02/30a 1 j	02/30a 1 j

Dans l'ensemble les tendances observées sur les trois autres sites normands sont similaires à celles constatées à Caen pour un semis le 15 novembre. Les valeurs associées aux indicateurs diffèrent, mais les évolutions sont les mêmes, à l'exception de l'échaudage thermique qui n'augmente pas à Nocé et que très légèrement à Evreux. Mais en revanche ce premier site est un peu plus exposé au déficit hydrique. La comparaison d'une même variété pour une date de semis équivalente permet de montrer qu'à base comparable, le blé cumule un peu plus de jours de chaleur à l'intérieur des terres qu'à proximité du littoral, mais qu'il profite d'un rayonnement légèrement supérieur puisque la montaison débute plus tard en raison des hivers plus froids. Toutefois, on peut remarquer que le 25 octobre est un semis précoce pour cette variété à Caen et à Raffetot. Si elle était semée un peu plus tard sur ces deux sites, les écarts avec Nocé et Evreux seraient moins importants.

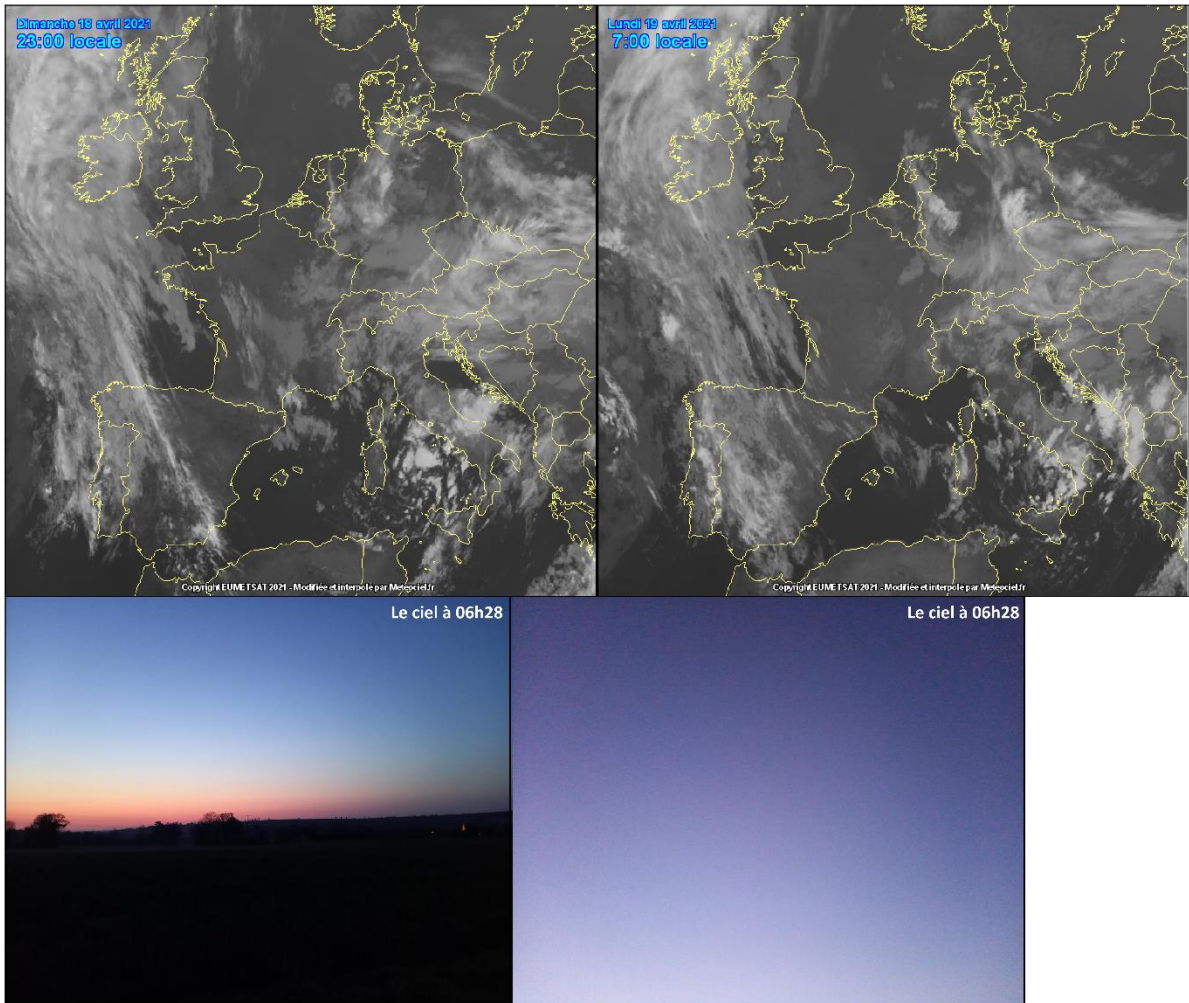
Annexe 11. Images infrarouges et photographies du ciel pour les campagnes de mesures les 15 et 19 avril 2021

Figure 253 : Images infrarouges relatives à la nuit du 15 avril 2021 et photographie du ciel avant le lever du jour



Images infrarouges : EUMETSAT disponibles sur Météociel.fr - photographies : François Beauvais., 2021

Figure 254 : Images infrarouges relatives à la nuit du 19 avril 2021 et photographie du ciel avant le lever du jour



Images infrarouges : EUMETSAT disponibles sur Météociel.fr - photographies : François Beauvais, 2021

Annexes 12. Evolution de la température mesurée non corrigée dans la vallée de l'Odon les 15 et 19 avril 2021

Figure 255 : Evolution de la température mesurée non corrigée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 15 avril 2021

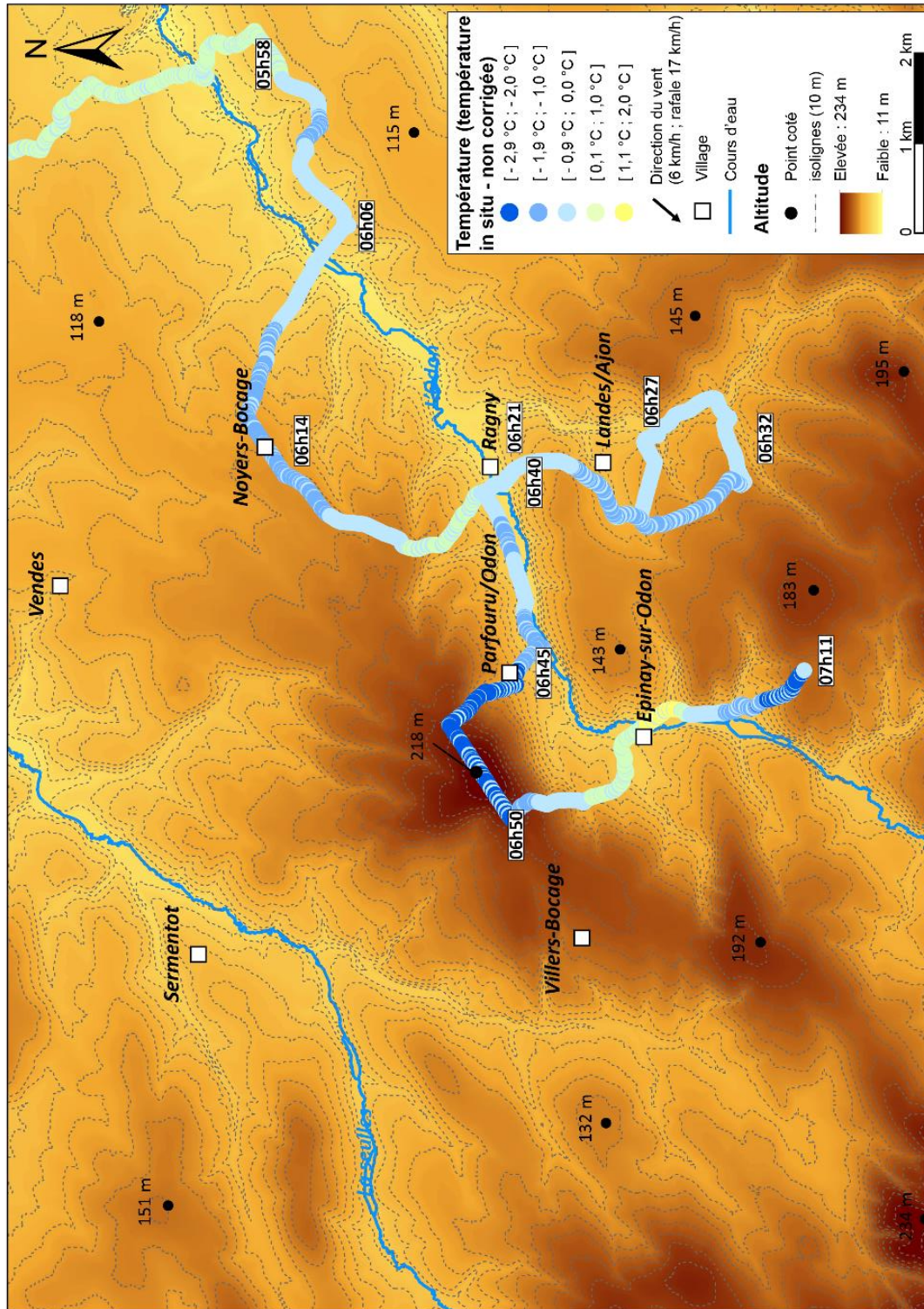
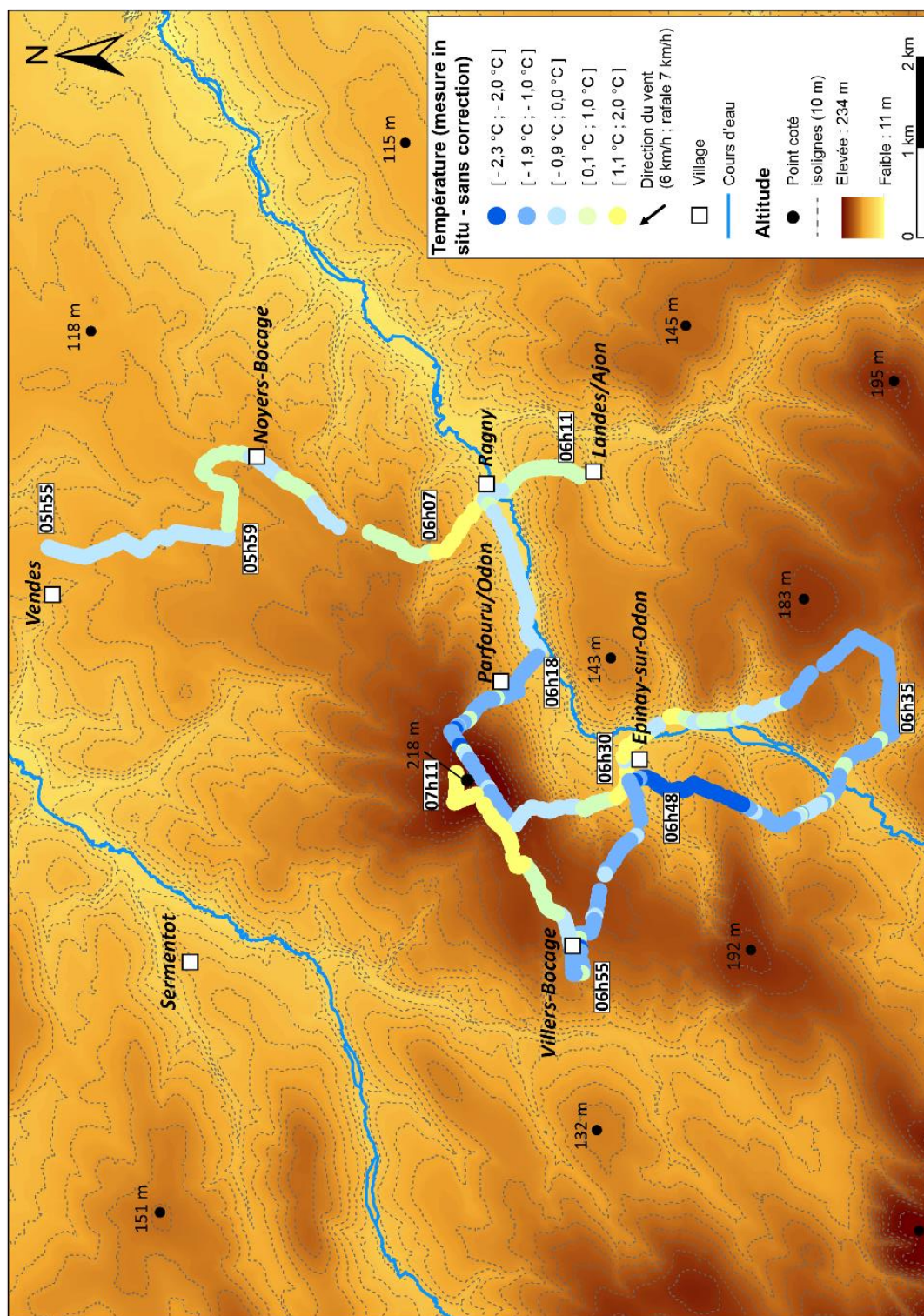


Figure 256 : Evolution de la température mesurée en itinérance dans la vallée de l'Odon le 19 avril 2021



Réalisation : François Beauvais, 2021 (données météo relevées sur le terrain à l'aide d'un véhicule sur l'antenne d'un data logger accroché sur l'antenne d'un véhicule le 19/04/21 ; MNT IGN 25 m).

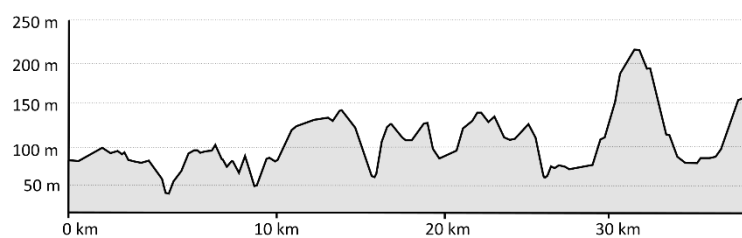
Annexes 13. Evolution de la température mesurée corrigée et de l'altitude sur les transects des 15 et 19 avril 2021

Figure 257 : Evolution de la température et de l'altitude relatives au transect du 15 avril 2021 dans la vallée de l'Odon

A. Evolution de la température



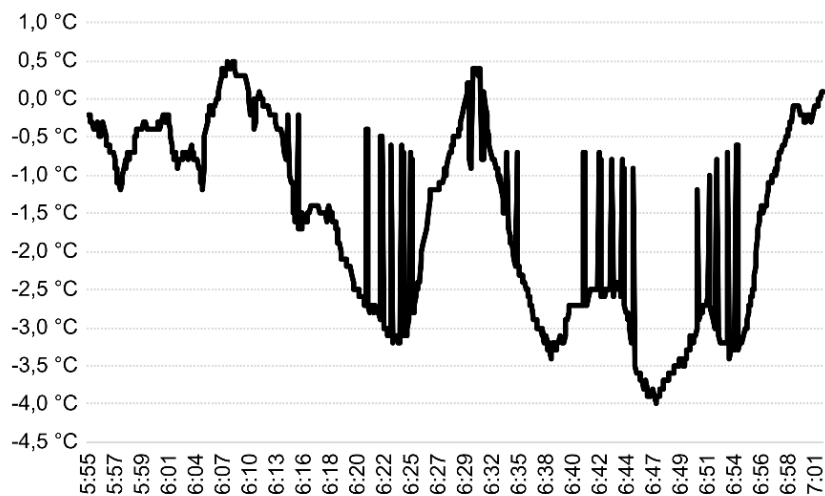
B. Evolution de l'altitude



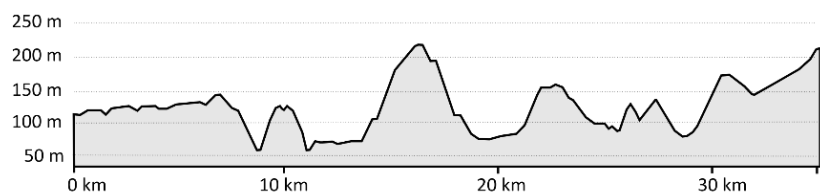
Réalisation : François Beauvais., 2021 (acquisition de données sur le terrain à l'aide d'un logger température avec abris Barani le 15 avril 2021 de 5h48 à 7h11 (UTC + 2 h).

Figure 258 : Evolution de la température et de l'altitude relatives au transect du 19 avril 2021 dans la vallée de l'Odon

A. Evolution de la température



B. Evolution de l'altitude



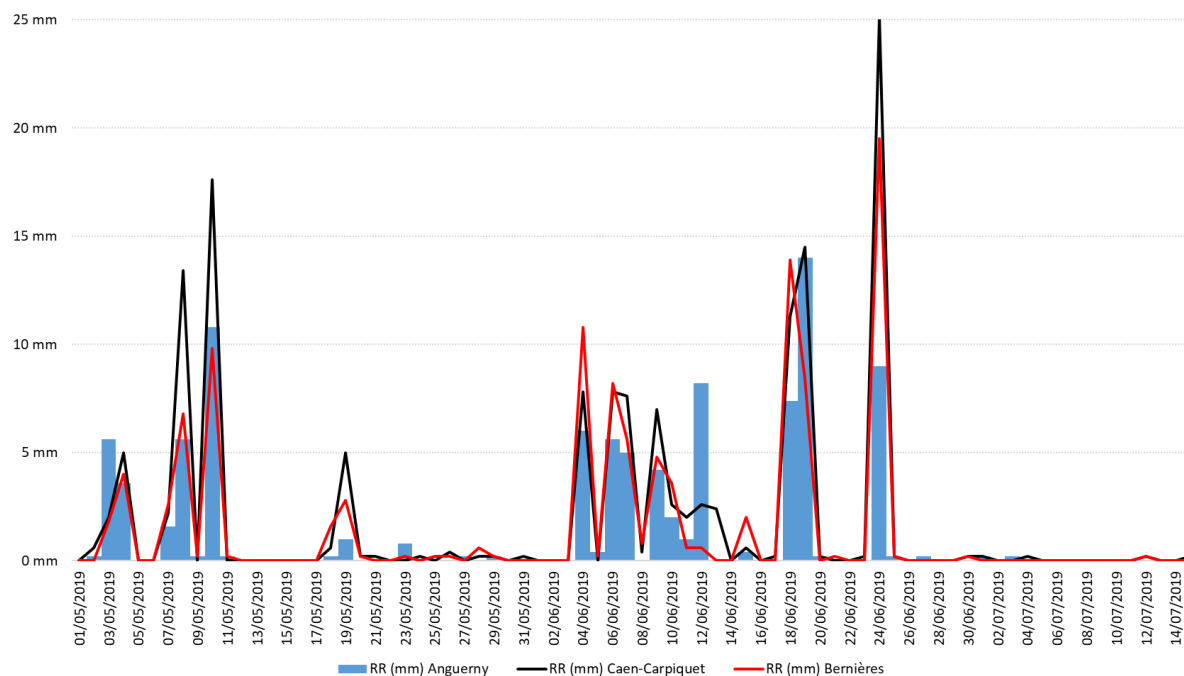
Réalisation : François Beauvais., 2021 (acquisition de données sur le terrain à l'aide d'un logger température avec abris Barani le 19 avril 2021 de 5h55 à 7h01 (UTC + 2 h).

Figure 259 : Haie composée d'arbres de hauts jets sur les hauteurs de Parfouru-sur-Odon



Annexe 15. Comparaison des précipitations relevées à Anguerny avec celles des stations Météo-France de Caen-Carpiquet et de Bernières-sur-Mer entre le 1^{er} mai et le 14 juillet 2019

Figure 260 : Précipitations relevées aux stations Météo-France de Caen-Carpiquet et de Bernières-sur-Mer comparées à celles de la station expérimentale d'Anguerny



Réalisation : François Beauvais., 2019 (données du pluviomètre d'Anguerny et des stations Météo-France de Caen-Carpiquet et de Bernières-sur-Mer)

Annexes 16. Présentation des sols et calculs des RUM pour les 7 plaines agricoles représentatives de céréaliculture française

Tableau 64 : Présentation des sols retenus pour les 7 sites étudiés

Plaine agricole	Département	Commune de prélèvement	Identifiant site RMQS	Date de prélèvement	Type de sol	Occupation du sol	Référentiel Régional Pédologique correspondant
Sansterre	80	Warloy-Baillon	Id 81	16/03/2004	BRUNISOL luvique limoneux, limono-argileux, battant	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Suc et al., 2017
Plaine de Caen	14	Anguerny	-	02/04/2019	BRUNISOL pachique luvique	Grandes cultures	Le Gouée., 2016
	14	Fierville-Bray	-	29/06/2020	CALCOSOL leptique	Grandes cultures	Le Gouée., 2016
Petite Beauce	28	Logron	Id 682	16/04/2008	LUVISOL limoneux, battant, hydromorphe issu de limon sur argile à silex cultivé	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Girot., 2009
Dijonnais	21	Collonges-les-Premières	Id 1013	17/04/2007	BRUNISOL limonoargileux alluvial décarbonaté	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Chretien et Meunier., 1998
	21	Savolles	Id 968	18/10/2007	BRUNISOL acide sur dépôt argilo-limoneux de recouvrement de craie blanche altérée du Crétacé	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Chretien et Meunier., 1998
Niortais	79	Epannes	Id 1283	29/07/2003	CALCOSOL leptique limono-argileux à argileux issu de calcaire tendre	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Cam., 2007
Grande Limagne	63	Lezoux	Id 1426	11/05/2004	COLLUVIOSOL calcaire épais remanié issu des colluvions calcaires et marnes de l'Oligocène cultivé	Système de rotations sans prairie sans intercultures	-
Pays Auchois	32	Prechac	Id 2010	25/10/2006	CALCISOL issu de molasse calcaire du Tertiaire à forte hydromorphie fossile.	Système de rotations sans prairie	Party et al., 2016

Tableau 65 : Caractéristiques des sols retenues pour la détermination du RUM

Id RMQS1	Horizon	Texture	mm eau / cm sol	Profondeur (cm)	% EG	RUM horizon (mm)	RUM blé (mm)
Id 81	H1	LM/LMS	1,67	0-35	1	58	203
	H2	LA	1,95	35-70	0	68	
	H3	LA	1,95	70-120	0	98	
Anguerny	H1	LMS	1,6	0-30	0	48	204
	H2	LA	1,95	30-70	0	78	
	H3	LA	1,95	70-110	0	78	
Fierville-Bray	H1	A - LSA	1,7	0-10	52,2	8	23
	H2	LSA	1,65	10-20	55,1	7	
	H3	LSA - LAS	1,7	20-30	55,7	8	
Id 682	H1	LM	1,75	0-31	1	54	204
	H2	LA	1,95	31-55	0	47	
	H3	AL	1,95	55-93	0	74	
	H4	AL	1,8	93-115	5	38	
Id 1013	H1	LAS	1,75	0-10	1	17	194
	H2	LAS	1,75	10-30	1	35	
	H3	LAS	1,75	30-40	1	17	
	H4	AL	1,8	40-60	0	36	
	H5	AL	1,8	60-115	0	99	
	H6	AS/LSA	1,675	115-125	90	2	
Id 968	H1	AL	1,8	0-22	1	39	130
	H2	AL	1,8	22-35	0	23	
	H3	AL	1,8	35-60	0	45	
	H4	AL	1,8	60-85	50	23	
Id 1297	H1	AL	1,8	0-20	15	31	97
	H2	AL	1,8	20-30	10	16	
	H3	LAS/LA	1,85	30-60	10	50	
Id 1426	H1	ALO	1,65	0-23	5	36	173
	H2	ALO	1,65	23-48	5	39	
	H3	ALO	1,65	48-80	10	48	
	H4	ALO	1,65	80-90	0	17	
	H5	A	1,75	90-180	0	158	
Id 2010	H1	ALO	1,65	0-43	2	70	181
	H2	ALO	1,65	43-87	1	72	
	H3	LAS	1,75	87-100	2	22	
	H4	AL	1,8	100-115	0	27	

Tableau 66 : Photographies des profils de sol des plaines agricoles étudiées

**A. Id 0081 à Warloy-Baillon
(Santerre, dep. 80)**



**B. Anguerny
(Plaine de Caen, dep. 14)**



C. Fierville-Bray (Plaine de Caen, dep. 14)



**D. Id 1013 à Collonges-les-Premières
(Dijonnais, dep. 21)**



**E. Id 968 à Savolles
(Dijonnais, dep. 21)**



F. Id 1283 à Epannes (Nivernais, dep. 79)



**G. Id 1283 à Lezoux
(Grande Limagne, dep. 63)**



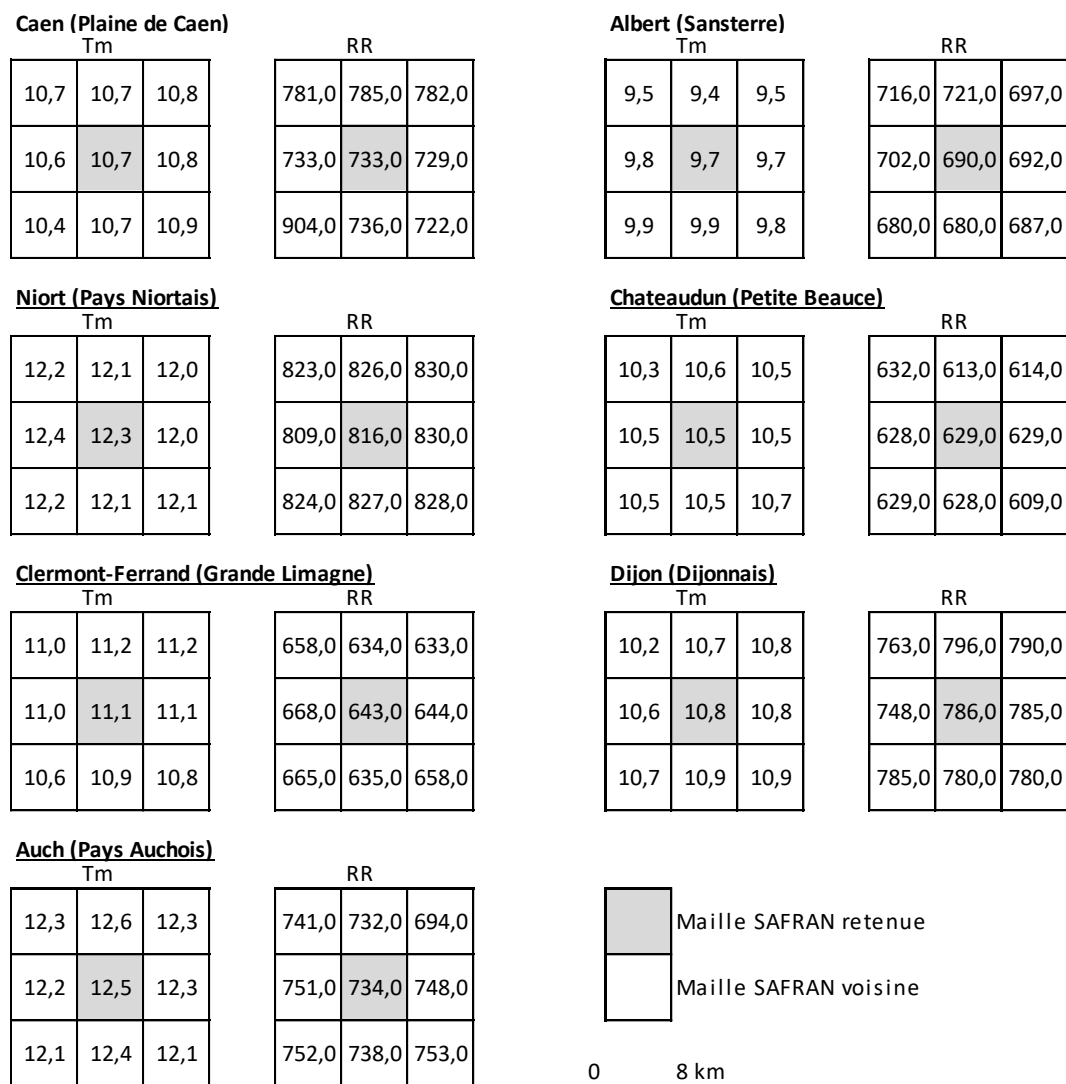
**H. Id 2010 à Prehac
(Pays Auchois, dep. 32)**



Auteurs des profils : ROLLE.C le 16 mars 2004 (A) ; LE GOUÉE.P., BEAUVAIS.F., SALLET.A., CANTAT O., le 02 avril 2019 (B) ; LE GOUÉE P., BEAUVAIS. F., le 29 juin 2020 (C) ; CURMI.P., le 17 avril 2007 (D) ; TROUCHE.G., le 18 octobre 2007 (E) ; PELOQUIN.T., le 29 juillet 2003 (F) ; BOULONNE.L., le 11 mai 2004 (G) ; GUIRESSE.M., TOISIER.A., BUR.T., le 25 octobre 2010 (H).

Annexe 17. Choix du point de grille SAFRAN pour les 7 plaines agricoles représentatives de la céréaliculture française

Figure 261 : Comparaison de la température moyenne annuelle et du cumul pluviométrique annuel du point de grille SAFRAN (période 1976-2005 du scénario historique des données CNRM-2014) retenu avec les huit points voisins pour les 7 sites céréaliers



Données : CNRM-2014 du modèle ALADIN-Climat d'une résolution de 8x8 km.

Avec : "Tm" température moyenne annuelle et "RR" le cumul pluviométrique annuel.

Annexe 18. Détermination d'un biais froid du modèle ALADIN-Climat et correction des températures minimales et maximales pour les 7 plaines agricoles représentatives de la céréaliculture française

Tableau 67 : Comparaison des données de température minimales et maximales du scénario historique CNRM-2014 avec celles observées du modèle SAFRAN sur la période 1960-2005 (Avec : Anr = année de rupture (test de Pettit) ; prr = période pré-rupture ; por = période

Températures minimales									
Site	Anr-Safran	Tn-prr (°C)	Tn-por (°C)	Anr-CNRM-2014	tn-prr (°C)	Tn-por (°C)		Biais prr (°C)	Biais por (°C)
Albert	1987	6.3	7.3	1985	5.9	6.3		-0.4	-1.0
Caen	198	7.6	8.2	1985	7.3	7.7		-0.3	-0.5
Châteaudun	1987	6.7	7.4	1985	3.7	7.4		-3.0	0.0
Dijon	-	7.0	7.0	1985	6.5	7.1		-0.5	0.1
Niort	1988	8.3	8.7	1985	8.3	8.8		0.0	0.1
Clermont-Ferrand	1987	6.8	7.6	1985	6.4	7.0		-0.4	-0.6
Auch	1988	8.3	8.7	1985	7.9	8.5		-0.4	-0.2

Températures maximales									
Site	Anr-Safran	Tx-prr (°C)	Tx-por (°C)	Anr-CNRM-2014	tx-prr (°C)	Tx-por (°C)		Biais prr (°C)	Biais por (°C)
Albert	1987	12.8	14.1	1985	12.7	13.4		-0.1	-0.7
Caen	198	13.4	14.6	1985	13.4	14.0		0.0	-0.6
Châteaudun	1987	13.8	15.0	1985	13.7	14.6		-0.1	-0.4
Dijon	1987	14.1	14.9	1985	14.0	14.9		-0.1	0.0
Niort	1981	15.8	17.2	1985	15.4	16.2		-0.4	-1.0
Clermont-Ferrand	1987	14.8	15.9	1985	14.9	15.8		0.1	-0.1
Auch	1981	15.9	17.3	1985	16.2	16.9		0.3	-0.4

Tableau 68 : Comparaison de la durée du cycle du blé simulé avec les données CNRM-2014 sans et avec correction par rapport aux simulations réalisées avec les données du modèles SAFRAN sur la période de référence 1976-2005 (Avec : dr = durée du cycle ; sc = sans co

Site	dr-Safran (j)	sans correction			avec correction		
		dr-sc-cnrm2014 (j)	biais-sc (j)	biais-sc (%)	dr-ac-cnrm2014 (j)	biais-ac (j)	biais-ac (%)
Albert	273	281	8	2,9	273	0	0
Caen	273	280	7	2,6	273	0	0
Châteaudun	264	270	6	2,3	264	6	0
Dijon	261	263	2	0,8	261	0	0
Niort	261	267	6	2,3	262	1	0,4
Clermont-Ferrand	262	265	3	1,1	261	-1	-0,4
Auch	254	259	5	2	257	3	1,2

Annexe 19. Différences de dates d'apparition des stades phénologiques dans la Plaine agricole

Les stades phénologiques du blé tendre d'hiver ne se réalisent pas tous aux mêmes dates. Des différences, parfois de plusieurs jours, peuvent être constatées en raison de variétés de précocités différentes et de dates de semis différentes. Pour illustrer ce constat, les figures ci-dessous présentent des observations de la phénologie, réalisées en 2020 dans la Plaine agricole de Saint-Manvieu-Norrey le 9 mai, le 17 mai et le 11 juin.

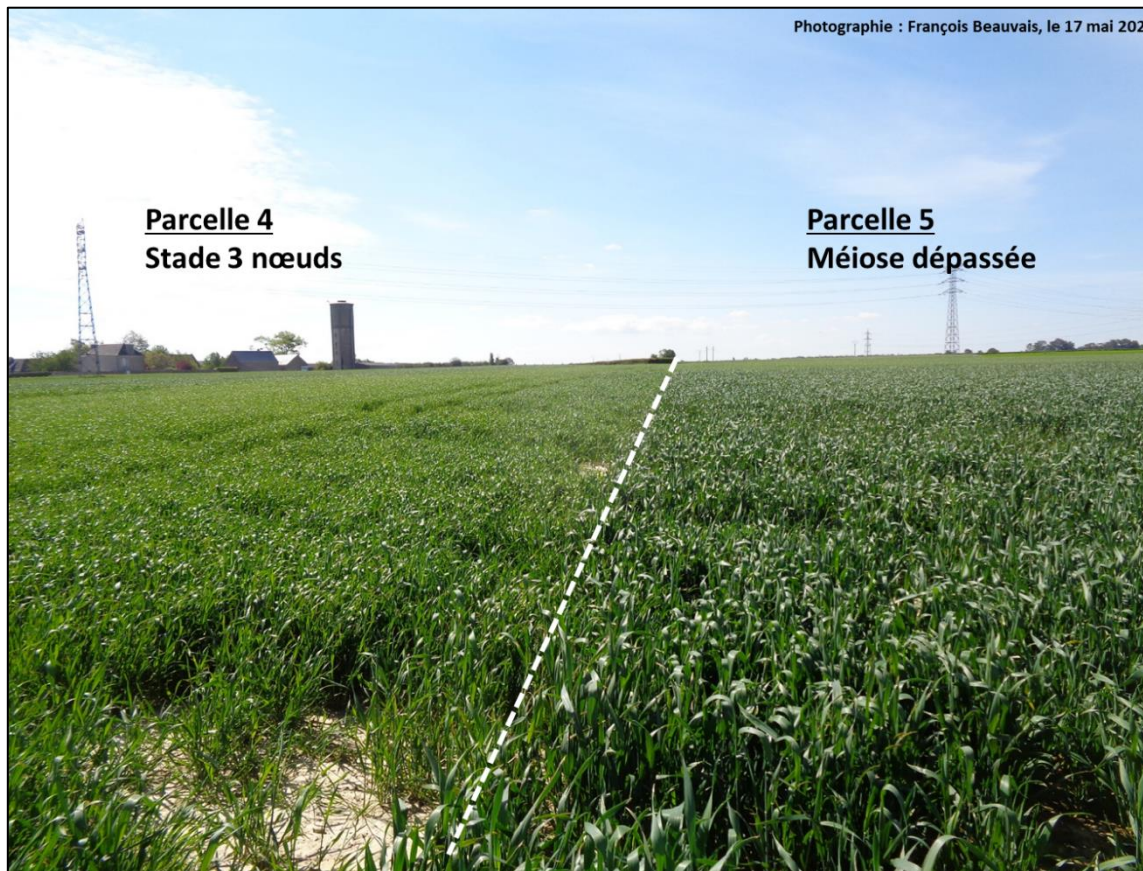
Figure 262 : Localisation des parcelles observées



Tableau 69 : Stades observés le 9 mai, 17 mai et 11 juin dans les 7 parcelles à Saint-Manvieu-Norrey

n° de parcelle	09/05/2020	17/05/2020	11/06/2020
1	Proche méiose	Méiose passée	Grain laiteux
2	Méiose passée	Proche épiaison	Grain laiteux
3	Proché méiose	Proche épiaison	Grain laiteux
4	2 nœuds	3 nœuds	Floraison passée
5	Proche méiose	Proche épiaison	Fin laiteux
6	Méiose passée	Début épiaison	Fin laiteux
7	Proche méiose	Proche épiaison	Fin laiteux

Figure 263 : Comparaison du stade phénologique observé pour la parcelle 4 en comparaison au stade de la parcelle 5 à Saint-Manvieu-Norrey



Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver

En Normandie, la culture du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) occupe 24 % de la SAU régionale et tient une place importante parmi les productions végétales. Chaque année 3,6 Mt sont moissonnées, soit 10 % du total national. Mais une stagnation des rendements est observée depuis le milieu des années 1990, signe que la céréaliculture normande subit déjà le changement climatique.

Ce travail de thèse de doctorat en géographie et en agro-climatologie s'intéresse aux conséquences des évolutions climatiques sur la culture du blé tendre en Normandie et interroge les enjeux et les perspectives de l'agrosystème céréalier. Pour répondre à ce questionnement, la recherche retient la Plaine de Caen comme espace d'étude représentatif de la céréaliculture régionale. Les données météorologiques des stations Météo-France et du modèle SAFRAN sont mobilisées, ainsi que les projections climatiques extraites du modèle régional ALADIN-Climat pour trois scénarios RCP. Les traitements de données sont effectués sur la période historique (1961-2020) et future (2021-2050 et 2071-2100). La méthode repose sur des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques. Des relevés de terrain en pédologie sont effectués pour prendre en compte les capacités très variables de rétention en eau des sols de l'espace d'étude. Une enquête de terrain est également menée auprès des exploitants et techniciens agricoles. Enfin, des mesures de terrain exploratoires mettent en lumière la diversité à échelle fine des conditions météorologiques dans la plaine.

Les résultats exposent la complexité des changements climatiques et illustrent la nécessité des études d'impact prospectives en climatologie selon une approche systémique, spatiale, temporelle et pluridisciplinaire pour envisager rationnellement l'adaptation des agrosystèmes au changement climatique.

Mots-clés : Changement climatique, agrosystème, Normandie, Plaine de Caen, blé tendre, géographie, agro-climatologie, prospective.

Geographical and agro-climatological approaches to the consequences of climate change on the Normandy cereal agrosystem: observation and prospective impact study applied to soft winter wheat

In Normandy, the cultivation of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) occupies 24% of the regional UAA and holds an important place among the vegetable productions. Each year 3.6 Mt are harvested, i.e. 10% of the national total. But a stagnation in yields has been observed since the mid-1990s, a sign that Normandy cereal growing is already suffering from climate change.

This doctoral thesis in geography and agro-climatology focuses on the consequences of climate change on soft wheat cultivation in Normandy and questions the issues and prospects of the cereal agrosystem. To answer this question, the research chose the Caen Plain as a representative study area for regional cereal growing. Meteorological data from Météo-France stations and the SAFRAN model are used, as well as climate projections extracted from the regional ALADIN-Climat model for 3 RCP scenarios. The data processing is carried out for the historical (1961-2020) and future (2021-2050 and 2071-2100) periods. The method is based on agroclimatic and phenoclimatic indicators. Soil surveys are conducted to estimate the water retention capacity of the soils in the study area. A field survey is also conducted with farmers and agricultural technicians. Finally, exploratory field measurements highlight the diversity of weather conditions in the plain.

The results show the complexity of climate change and illustrate the need for prospective impact studies in climatology according to a systemic, spatial, temporal and multidisciplinary approach to rationally consider the adaptation of agrosystems to climate change.

Keywords: Climate change, agrosystem, Normandy, Plain of Caen, soft wheat, agro-climatology, geography, prospective.

François Beauvais (2021).

Discipline : Géographie.

Spécialités : Agro-climatologie et géographie agricole.

