



HAL
open science

Approches géographiques et agroclimatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de la Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 : analyse comparative des résultats tirés des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques

François Beauvais

► **To cite this version:**

François Beauvais. Approches géographiques et agroclimatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de la Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 : analyse comparative des résultats tirés des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques. *Climatologie*, 2023, 19 (3), 13 p. 10.1051/climat/202219003 . hal-04248736

HAL Id: hal-04248736

<https://hal.science/hal-04248736>

Submitted on 21 May 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Article de synthèse publié dans le cadre de l'obtention du Prix Gérard Beltrando 2022 attribué par l'AIC et récompensant la meilleure thèse de climatologie

Approches géographiques et agroclimatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalière de la Plaine de Caen (Normandie) aux horizons 2050 et 2100 : analyse comparative des résultats tirés des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques

François Beauvais

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, LETG, 14000 Caen, France

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, ESO, 14000 Caen, France

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France

Résumé – En Normandie, chaque année, 3,6 Mt de tonnes de blé tendre (*Triticum aestivum*) sont récoltées, ce qui correspond à 10 % des productions françaises. La région occupe donc une place importante dans le grenier à blé français. Face au changement climatique, la filière céréalière pose la question de son adaptation. Cet article propose de projeter les conditions climatiques pour le blé aux horizons 2050 et 2100 à partir des données extraites du modèle ALADIN-Climat pour deux scénarios RCP du GIEC en Plaine de Caen, région agricole caractéristique de la céréaliculture régionale. L'étude propose de comparer la performance des diagnostics fondés sur les indicateurs agroclimatiques (IAG) et phénoclimatiques (IPH), tout en discutant des approches spatiales et systémiques nécessaires pour étudier la vulnérabilité des agrosystèmes au changement climatique.

Mots-clés : agriculture, changement climatique, indicateurs, prospective, agroclimatologie, Normandie.

Abstract – **Geographical and agroclimatological approaches to the consequences of climate change on the cereal agrosystem in the Agricultural Plain of Caen (Normandy) for 2050 and 2100: comparative analysis of results from agroclimatic and phenoclimatic indicators.** In Normandy, each year, 3.6 Mt of soft wheat (*Triticum aestivum*) are harvested, which corresponds to 10% of French production. This region occupies an important place in the French wheat granary. Faced with climate change, the cereal industry is faced with the question of how to adapt. This article proposes to project the climatic conditions for wheat in 2050 and 2100 using data extracted from the ALADIN-Climate model for two IPCC RCP scenarios in the Plaine of Caen, an agricultural region characteristic of regional cereal growing. The study proposes to compare the performance of diagnostics based on agroclimatic (IAG) and phenoclimatic (IPH) indicators, while discussing the spatial and systemic approaches needed to study the vulnerability of agrosystems to climate change.

Keywords: agriculture, climate change, indicators, prospective, agroclimatology, Normandy.

* Auteur de correspondance : francois.beauvais@unicaen.fr

Introduction

A l'échelle mondiale, la température moyenne de l'air a augmenté de +1,1°C depuis la fin du XIX^{ème} siècle (IPCC, 2021). Sans réduction immédiate des

émissions de gaz à effet de serre, l'accord de Paris sur le climat relatif à la COP21 de 2015 serait hors de portée. Directement dépendante des conditions atmosphériques, l'agriculture est au cœur des enjeux relatifs au changement climatique. C'est

notamment le cas pour la culture du blé tendre, production végétale étudiée dans le cadre de ce travail. Il s'agit d'une céréale majeure pour la sécurité alimentaire mondiale puisqu'elle est la première source d'alimentation humaine devant le riz et le maïs (Le Stum *et al.*, 2017). Pourtant, une stagnation des rendements est observée sur 36 % des surfaces mondiales qui lui sont consacrées, principalement en Europe, en Inde et en Chine (Ray *et al.*, 2012). En France, ce plafonnement des rendements, observé depuis le milieu des années 1990 serait lié à une augmentation du déficit hydrique pendant la montaison et des jours de chaleur au cours du remplissage des grains (Gate *et al.*, 2010 ; Brisson *et al.*, 2010). Le pays fait partie des leaders des productions de blé dans le monde puisqu'il se classe 5^{ème} producteur mondial (37 Mt). Si la moitié des récoltes est destinée à la demande intérieure (alimentation du bétail, panification, amidonnerie, biocarburant, biscuiteries et pâtisseries, etc.), le reste est exporté (17 Mt) et place le pays au 4^{ème} rang des exportateurs. De ce fait, les productions de blé jouent un rôle important dans le

maintien du positionnement de la France au sein des relations internationales. La céréaliculture pèse également dans l'économie agricole du pays puisqu'elle génère une valeur ajoutée hors subvention de 10 milliards d'€/an, soit 14 % de toutes les productions agricoles confondues hors services (données INSEE).

La Normandie participe à hauteur de 10 % des récoltes nationales et de la valeur ajoutée associée. Cette production occupe 24 % de la surface agricole régionale. La céréaliculture occupe donc une place importante en Normandie, d'autant plus qu'elle concentre 26 000 emplois de la production à la seconde transformation. Le rendement moyen du blé est de 77 q/ha, soit 6 q/ha de plus que la moyenne nationale, tout en sachant qu'il peut être supérieur à 100 q/ha dans les plaines agricoles dotées de sols fertiles. L'étude présentée dans cet article s'intéresse plus particulièrement à la Plaine de Caen, espace représentatif de la céréaliculture française et normande.

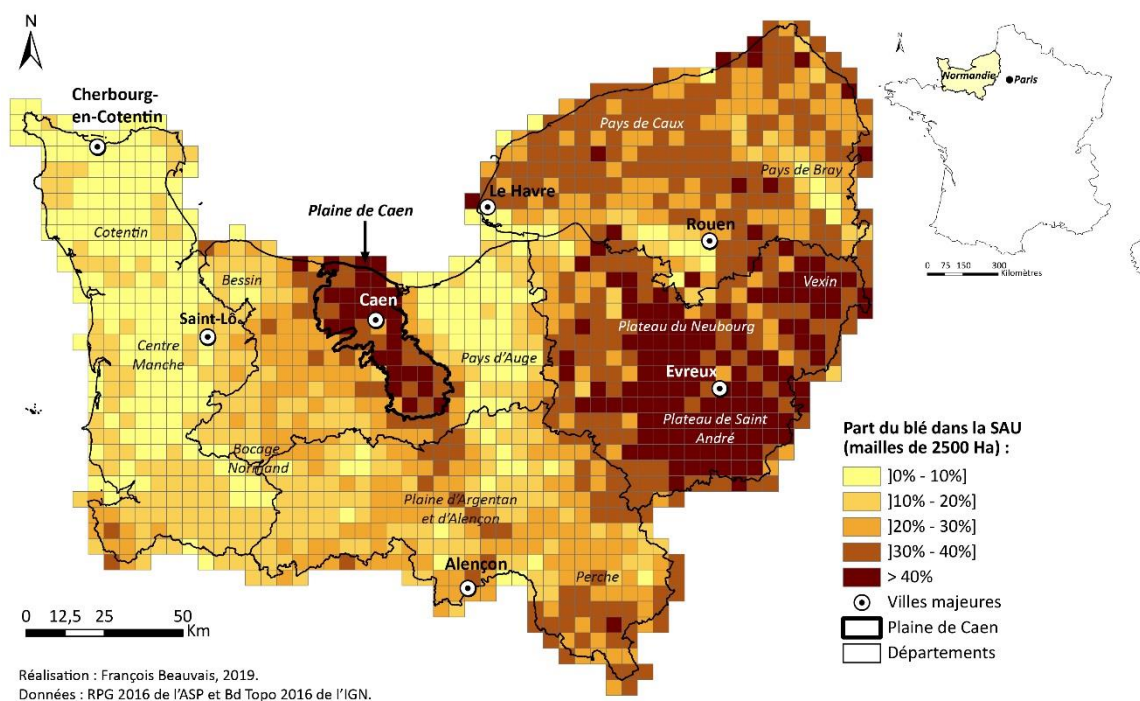


Figure 1 : Localisation de la Plaine de Caen et densités de blé tendre en Normandie. *Location of the Agricultural Plain of Caen and soft wheat densities in Normandy.*

A l'instar de toutes les régions du globe, le changement climatique est notable en Plaine de Caen (Cantat *et al.*, 2020 ; Beauvais, 2021 ; Cantat

et al., 2021). La température moyenne de l'air a augmenté de +1,1°C entre les Normales climatiques 1951-1980 et 1991-2020 (passage de 10,4 à

11,5°C). Les jours de chaleurs ont augmenté de près de deux semaines (de 12,5 à 24 jours) tandis que les gelées diminuent d'autant (de 41 à 29 jours). Ces tendances sont amenées à se poursuivre puisque d'ici 2100, la température moyenne pourrait encore augmenter de +0,5 à +3,3°C respectivement avec et sans réduction des émissions de GES à l'échelle mondiale. Concernant le cumul pluviométrique annuel (740 mm), il n'y a pas de tendance significative, mais la Normandie étant soumise à une variabilité interannuelle importante, elle subit comme le reste de la France des sécheresses édaphiques plus marquées ces dernières années en raison des températures plus élevées entraînant une demande évapotranspiratoire plus forte.

Dans ce contexte, les systèmes d'exploitation céréaliers pourraient être fragilisés. Des travaux ont simulé l'évolution du contexte biopédoclimatique en Normandie (Cantat *et al.*, 2009 ; Le Gouée *et al.*, 2010), mais aucune étude d'impact n'a été menée spécifiquement pour une production agricole. Ce travail s'inscrit donc en réponse à un besoin de recherche et a pour objectif de déterminer quelles pourraient être les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre en Normandie. C'est également l'occasion de comparer la performance des indicateurs agroclimatiques (IAG) et phénoclimatiques (IPH) pour les études d'impacts prospectives en agroclimatologie, tout en proposant ensuite une lecture multiscalaire et géosystémique des agrosystèmes.

1. Données et méthodes

1.1. Les données climatiques pour projeter la culture du blé tendre en Plaine de Caen

Les données de référence pour le climat futur sont celles des réanalyses SAFRAN (Quintana-Segui *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010). C'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. Le point de grille retenu est celui situé à l'ouest de l'agglomération Caennaise, au cœur de la plaine agricole.

Les données climatiques mobilisées pour la

période future sont celles de la simulation CNRM-2014 au pas de temps quotidien du modèle climatique régional ALADIN-Climat (Spiridonov *et al.*, 2005). Les traitements sont réalisés pour la période de référence (1976-2005), comparée ensuite aux périodes proche 2021-2050 et lointaine 2071-2100. Les projections retenues sont issues des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC afin d'exprimer les changements du bilan radiatif au sommet de la troposphère (Van Vuuren *et al.*, 2011). Le premier scénario correspond à une stagnation du forçage radiatif après 2050. Le second illustrerait quant à lui le climat sans mise en place de politiques climatiques visant à réduire ces émissions de GES. Notons qu'un biais froid du modèle est constaté en Plaine de Caen (Beauvais *et al.*, 2019), avec notamment une sous-estimation des températures post-rupture 1987 observable en comparant le scénario historique au modèle SAFRAN (observation) pour le même point de grille. La température minimale est sous-estimée de 0,5°C et la maximale de 0,4°C. Le scénario historique est donc corrigé en considérant le biais moyen mensuel des températures minimales et maximales (Dubreuil *et al.*, 2019) sur la période 1976-1987 puis 1988-2005. Les données des scénarios RCP sont quant à elles rajustées uniquement selon le biais post-rupture.

1.2. Méthodes d'analyses agroclimatiques et phénoclimatiques

Deux grandes approches méthodologiques ont été retenues et confrontées dans le cadre de ce travail. Elles reposent toutes deux sur des indicateurs dérivés de variables climatiques dont le dépassement de seuils ou l'évolution renvoient à des potentielles pertes de productions agricoles. Pour cet article, notre analyse se concentre sur six principaux indicateurs IAG et IPH dont les évolutions sont significatives (tableau 1).

L'approche agroclimatique mobilise ces indicateurs sur les grandes périodes du calendrier agricole relatives à la culture étudiée. Les dates qui les délimitent sont considérées comme invariantes. Par exemple, les températures supérieures ou égales à 25°C affectent la formation et le remplissage des grains (échaudage thermique) qui s'effectuent entre les stades méiose pollinique et maturité

physiologique. Cette phase se réalise généralement à la fin du printemps et au début de l'été, c'est pourquoi cet indicateur agroclimatique est considéré entre le 1^{er} mai et le 31 juillet. Mais dans la réalité, ces stades ne se réalisent pas chaque année aux mêmes dates. Lorsque les températures sont

supérieures aux normales saisonnières, la végétation est en avance. A contrario, si les températures sont plus faibles, alors un retard est constaté. Les périodes de sensibilité à un aléa ne sont donc pas toujours identiques chaque année.

Indicateurs	Périodes de sensibilité étudiées	Conséquences	Bornes de calculs des IAG		Bornes de calculs des IPH	
			Date de début de calcul	Date de fin de calcul	Date de début de calcul	Date de fin de calcul
Nombre de jours d'échaudage thermique (tx ≥ 25 °C)	Formation et remplissage des grains	Déficit de fécondation, impact sur le remplissage des grains, photosynthèse affectée (Gate, 1995 ; Thakur <i>et al.</i> , 2010)	1 ^{er} mai	31 juillet	apparition du stade méiose	apparition de la maturité
Déficit hydrique (mm)	Montaison et remplissage des grains	Réduction de l'activité photosynthétique et de l'assimilation du CO2 (Gate, 1995)	1 ^{er} avril	31 juillet	apparition du stade épi 1 cm	apparition de la maturité
Nombre de jours avec Tn ≤ 4 °C	Période proche méiose	Déficit de fécondation (Gate, 1995 ; Thakur <i>et al.</i> , 2010)	1 ^{er} mai	31 mai	± 6 jours entourant le stade	
Rayonnement solaire cumulé (cal/cm ²)	Montaison et remplissage des grains	Impact sur la croissance	1 ^{er} avril	31 juillet	apparition du stade épi 1 cm	apparition de la maturité
Nombre de jours disponibles pour la vernalisation (tm ≥ 3 et ≤ 10 °C)	Levée et tallage	Déficit de floraison et retard/absence de montaison (Gate, 1995 ; Mossad <i>et al.</i> , 1995)	1 ^{er} décembre	31 mars	apparition du stade levée	apparition du stade épi 1 cm

Avec Tn = température minimale ; Tx = température maximale ; Tm = température moyenne

Tableau 1 : Liste des indicateurs étudiés pour le blé tendre d'hiver. *List of studied indicators for soft winter wheat.*

L'approche phénoclimatique propose de tenir compte de cette variabilité interannuelle des stades phénologiques dans le calendrier pour s'approcher au plus près des conditions vécues par la plante. Les indicateurs sont appelés phénoclimatiques (Gate, 2008) ou écoclimatiques (Caubel *et al.*, 2015). Ils sont calculés de façon dynamique entre les dates d'apparition des stades phénologiques, soit les phénophases spécifiques (Holzkämper *et al.*, 2011). La phénologie est simulée à partir des degrés jours cumulés depuis la date de semis (le 15 novembre pour notre étude) afin de déterminer les dates des stades phénologiques (Bonhomme, 2000). Cette somme de température pour le blé s'effectue en base

0°C, écrêtée à 28°C (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. Ces besoins en chaleur ont été déterminés au champ pour une variété de précocité intermédiaire. Ils sont conformes aux gammes de valeurs présentées dans les travaux de Gate (1995) et de l'Institut du végétal Arvalis (2017). Nous avons par ailleurs considéré un critère photopériodique de 11 h pour le déclenchement de la montaison.

Le bilan hydrique pour déterminer le déficit en eau pour le végétal intègre une décroissance

logarithmique selon la méthode de Thornthwaite et Mather (1955) afin d'intégrer la difficulté progressive de la plante à mobiliser l'eau de la réserve utile à mesure que celle-ci se vide. Il est calculé au pas de temps mensuel pour l'approche agroclimatique. Dans le cadre de l'approche phénoclimatique, ce bilan est effectué au pas de temps journalier. L'évapotranspiration maximale de la culture est déterminée par le jeu de coefficients culturaux, différents selon les périodes phénologiques (Allen *et al.*, 2018), multipliés à l'évapotranspiration. Celle-ci est calculée avec la formule de Turc (1961) puisque les variables nécessaires au calcul de la formule de Penman, plus précise, ne sont pas toutes disponibles avec la simulation CNRM-2014. Deux réservoirs utiles maximaux (RUM) ont été déterminés à partir du protocole RMQS2 de l'INRAE (Jolivet *et al.*, 2018) pour deux parcelles agricoles représentatives du contraste pédologique présent au sein de la plaine de Caen. Le secteur nord doté de sols épais, limoneux et sans charge en éléments grossiers dispose d'un RUM de 219 mm sur le profil d'enracinement théorique du blé tendre tandis qu'il n'est que de 34 mm pour le secteur sud présentant une couverture pédologique mince et caillouteuse.

Par ailleurs, l'analyse est complétée à partir de mesures en itinérance dans la plaine agricole (marche à pied). Un data logger de température de type Wisemann Klein WK 057 est ici fixé dans un abri hémisphérique Barani standard (pour une meilleure ventilation naturelle) et maintenu à une hauteur d'environ 1,5 m.

2. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé pour les prochaines décennies ?

Afin d'identifier les conséquences du changement climatique sur la culture du blé tendre en Plaine de Caen, présentons d'abord l'analyse agroclimatique, suivie de l'analyse phénoclimatique.

2.1. Augmentation des jours de chaleur et du déficit hydrique via les IAG

En moyenne, chaque année, 8 jours d'échauffement thermique sont recensés entre le 1^{er} mai et le 31 juillet en Plaine de Caen sur la période de référence

1976-2005. A l'horizon proche, une augmentation de l'ordre de 2 jours serait constatée avec les deux scénarios. D'ici la fin du siècle, la hausse serait limitée à 3 jours avec le scénario RCP4.5 tandis qu'elle pourrait être de 22 jours avec le scénario RCP8.5. Mais ce qui retient surtout l'attention, c'est qu'à long terme, sans politique climatique, le premier quartile relatif au scénario pessimiste correspondrait au maximum de la période de référence. La formation et le remplissage des grains pourraient alors être sérieusement pénalisés.

Le manque d'eau pour le végétal devrait augmenter significativement en raison de printemps et d'été plus secs alors même que l'évapotranspiration serait plus importante. Le déficit hydrique cumulé entre le 1^{er} avril et le 31 juillet, correspondant aux phases de la montaison et du remplissage des grains, est en moyenne de 40 et de 110 mm respectivement pour les sols épais et mince sur la période 1976-2005. D'ici 2050, ce déficit s'élèverait à 60 et 140 mm avec le scénario RCP4.5 tandis que la situation est presque inchangée avec le scénario RCP8.5. A l'horizon 2100, le manque d'eau pourrait atteindre 90 et 180 mm dans le cas du scénario RCP4.5. Avec le RCP8.5, le déficit hydrique serait de 110 mm pour les sols épais et de 220 mm pour les sols squelettiques. L'augmentation est telle que 1 année sur 4 subirait un déficit hydrique supérieur à celui de la grande sécheresse de 1976. Le manque d'eau calculé pour le nord de la plaine deviendrait équivalent à celui actuellement observé au sud.

Concernant l'occurrence de basses températures pendant la méiose (moins de 4°C), une année sur trois est concernée par au moins une occurrence pendant le mois de mai. Le risque reste relativement faible pour le blé puisque des impacts surviennent seulement s'il y a concomitance entre les jours entourant le stade phénologique et les basses températures. A court terme, le risque reste minime (3 années sur 30) et pourrait même disparaître à long terme avec le scénario RCP8.5. Du côté du rayonnement solaire global disponible pour le blé entre le 1^{er} avril et le 31 mai, la situation reste globalement inchangée.

Entre le 1^{er} décembre et le 31 mars de la période 1976-2005, près de 80 jours de basses températures sont en moyenne disponibles pour la vernalisation

du blé. Au cours des 30 prochaines années, ce cumul reste inchangé. L'augmentation des températures n'est pas suffisante pour dépasser la borne supérieure limitante à la vernalisation. Néanmoins, la variabilité interannuelle est plus prononcée avec le scénario RCP8.5, avec la présence de quelques années cumulant moins de 60 jours. A long terme,

le nombre de jours disponibles pour la vernalisation serait de 66 et 59 jours avec les scénarios RCP4.5 et 8.5. Dans le cas du scénario RCP4.5, une année sur quatre serait défavorable à la vernalisation des céréales. Pour le scénario RCP8.5, il s'agirait d'une année sur deux.

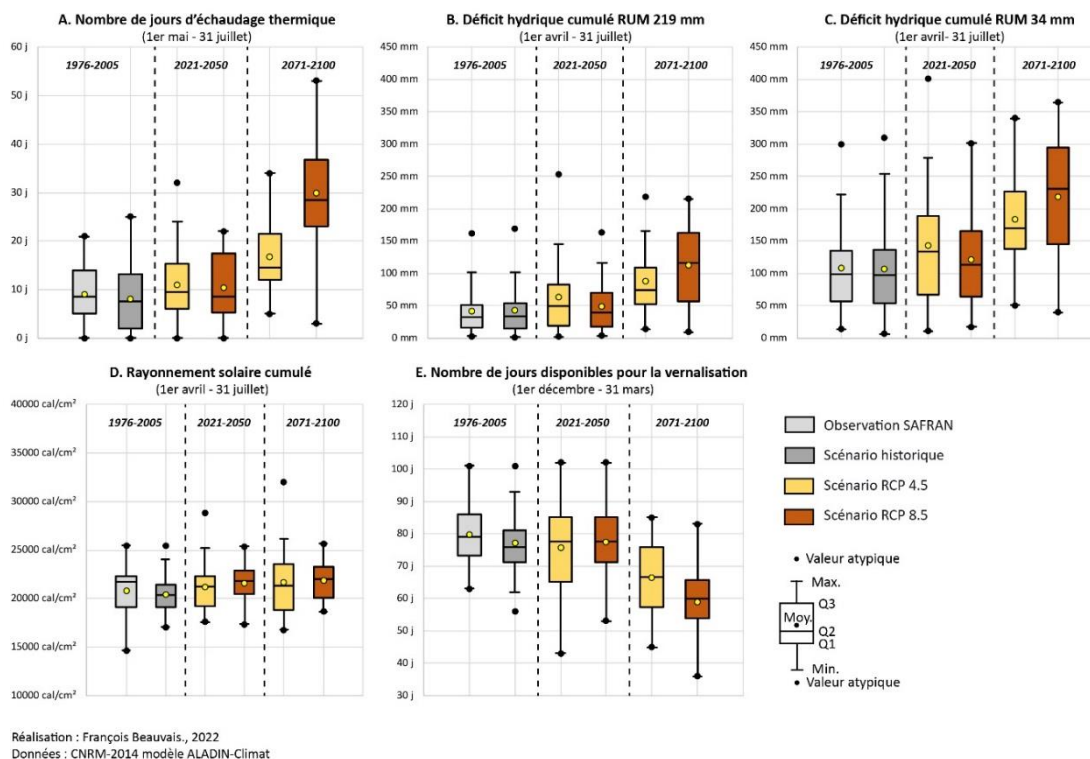


Figure 2. Evolutions et variabilité des IAG aux horizons 2021-2050 et 2071-2100 (scénarios RCP4.5 et 8.5) par rapport à la période de référence 1976-2005. *The evolution and variability of IAG's in the periods 2021-2050 and 2071-2100 (RCP4.5 and 8.5 scenarios) compared to the 1976-2005 reference period.*

2.2. Modification de la durée des périodes phénologiques et de l'exposition aux aléas via les IPH

L'augmentation de la température accélère le cycle du blé tendre. La céréale arrive à maturité physiologique autour de la fin juillet sur la période 1976-2005. A l'horizon 2050, elle pourrait se dérouler mi-juillet pour les deux scénarios. D'ici la fin du siècle, la réduction de la durée du cycle serait de l'ordre de trois semaines pour le scénario RCP4.5, soit des moissons début juillet. En revanche, elles auraient lieu dès la fin du mois de juin avec le scénario RCP8.5, ce qui correspondrait à une avancée de la date de maturité de 5 semaines par rapport à la période de référence.

En tenant compte de la variabilité interannuelle

des dates d'apparition des stades phénologiques, 6 jours d'échauffage thermique sont réellement rencontrés par le blé sur la période de référence. Il n'y a pas d'évolutions significatives pour l'horizon 2050. C'est également le cas en dernière partie du siècle avec le scénario RCP4.5. Néanmoins, une hausse de 3 jours est remarquée avec le scénario RCP8.5. Cette augmentation reste malgré tout contenue grâce à l'évitement de la période estivale.

Le manque d'eau cumulé pour le blé au cours de la montaison et du remplissage des grains est de 50 et 130 mm respectivement pour les sols épais et minces de la plaine agricole sur la période 1976-2005. A court terme, le déficit reste globalement inchangé. A la fin du siècle, avec le scénario RCP4.5, le manque d'eau serait de 40 et 110 mm, soit une légère diminution. Dans le cas de la

réalisation du scénario RCP8.5, la réduction est beaucoup plus marquée puisque le déficit serait seulement de 30 et 90 mm. Alors que le climat devrait être plus sec, le blé ne serait pas plus exposé au déficit hydrique puisque la fin du cycle ne se chevaucherait plus avec le cœur de l'été météorologique. Cette réduction du déficit hydrique cumulé pourrait compenser la légère augmentation du nombre de jours d'échauffage thermique et par conséquent limiter les pertes de rendement.

En revanche, les stades qui se réalisent actuellement au cours du printemps seraient avancés en sortie d'hiver, moment de l'année durant lequel la durée du jour est plus courte. La montaison dispose sur le passé récent de plus de 20 000 cal/cm² de rayonnement solaire. A court terme, une réduction de -8 % est constatée avec les deux scénarios. A long terme, elle est réduite à -4 % avec le scénario RCP4.5 mais elle serait de -27 % avec le scénario RCP8.5 (et même -40 % pour la première partie de la montaison entre les stades épi 1 cm et 2 nœuds). Près d'une année sur deux aurait un cumul de rayonnement solaire inférieur à l'année la plus défavorable sur la période de référence, engendrant

de ce fait des conséquences sur la croissance de la céréale.

Selon le même principe, le blé pourrait être davantage exposé aux basses températures pendant sa méiose pollinique. En période de référence, 3 années sur 30 connaissent au moins une journée de basses températures sur la période proche méiose. A l'horizon 2050, entre 5 et 6 années seraient concernées avec les scénarios RCP4.6 et 8.5. Pour le second scénario, près d'une année sur trois serait concernée par le risque. L'exposition de la plante à ces basses températures pourrait donc être beaucoup plus prononcée pour une variété insensible à la durée du jour pour enclencher sa montaison.

Sur la période 1976-2005, le blé dispose de plus de 80 jours de vernalisation entre la levée et la fin du tallage. D'ici 2050, ce cumul serait d'un peu plus de 70 jours avec les deux scénarios. A l'horizon 2100, il serait respectivement de 58 et 48 jours avec les scénarios RCP8.5. Une année sur deux, la céréale aurait moins de 50 jours de vernalisation, ce qui pourrait remettre en cause les variétés les plus hivernales.

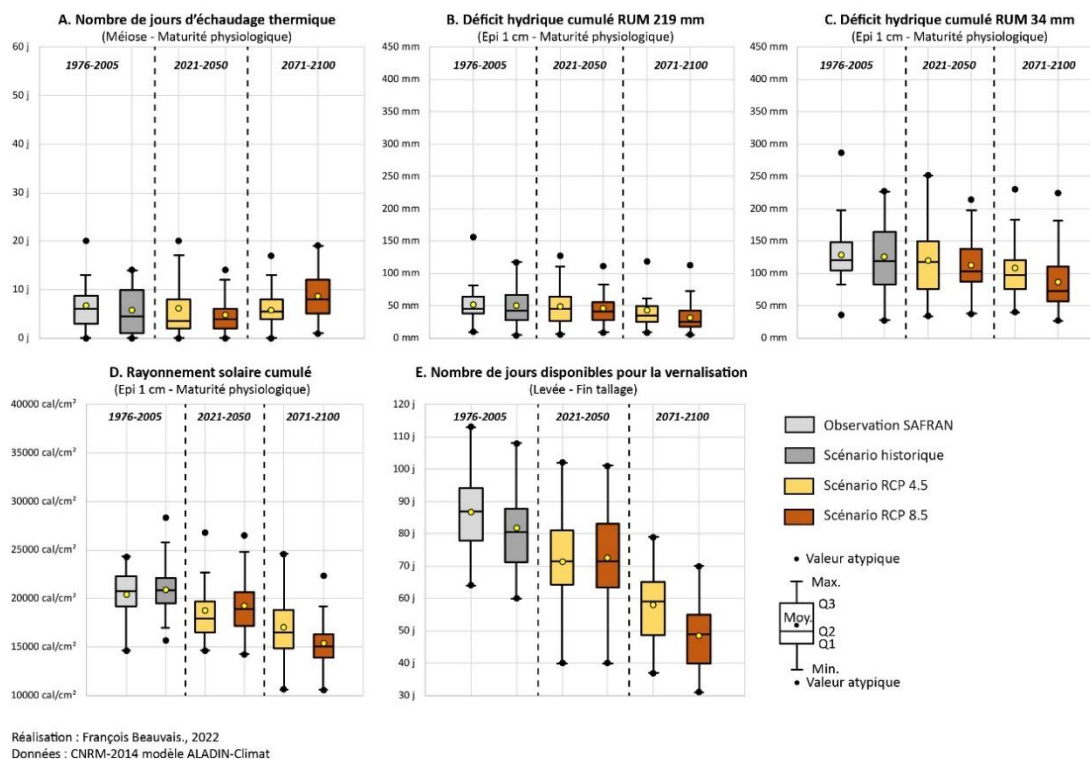


Figure 3. Evolutions et variabilité des IPH aux horizons 2021-2050 et 2071-2100 (scénarios RCP4.5 et 8.5) par rapport à la période de référence 1976-2005. *The evolution and variability of IPH's in the periods 2021-2050 and 2071-2100 (RCP4.5 and 8.5 scenarios) compared to the 1976-2005 reference period.*

Les approches agroclimatiques et phénoclimatiques retenues présentent des résultats opposés à l'exception de la réduction du nombre de jours de vernalisation. La première montre une hausse du déficit hydrique et des jours de chaleur pour le blé tendre tandis que la seconde tempère ce constat mais expose la vulnérabilité du blé au déficit de rayonnement solaire et aux basses températures sur la période proche de la méiose.

3. La lecture multiscale de l'agrosystème pour étudier sa résilience au changement climatique

3.1. L'apport de réflexions à échelles fines pour l'étude bioclimatique des agrosystèmes céréaliers

A l'échelle régionale, la Plaine de Caen est considérée comme une entité climatique homogène. Pourtant, une diversité spatiale des conditions climatiques est constatée au sein de cette entité agricole, principalement en raison de l'éloignement à la mer, de la topographie et de l'occupation du sol.

A mesure que l'on s'éloigne de la mer, les hivers sont classiquement plus rudes et les étés plus chauds. Sur la bordure littorale, la station météorologique de Bernières-sur-Mer enregistre en moyenne 19 jours de gelée sur la période 2002-

2020. A Caen-Carpiquet et Saint-Sylvain, sites localisés à des distances de 15 et 27 km de la mer, 30 jours de gel sont recensés. La différence d'occurrence annuelle de jours de chaleur est un peu plus marquée avec respectivement de 9, 25 et 32 jours. Ces différences de température expliquent une précocité plus importante des plants de blé en bordure littorale à la sortie de l'hiver. Pour une variété semée à la même date, l'anticipation de la montaison par rapport à l'intérieur des terres est d'environ 8 jours. Cependant, dans ce cas, les moissons ont tout de même lieu en même temps. En effet, les températures à Caen et à Saint-Sylvain sont un peu plus élevées au cours de la période printanière et estivale, permettant aux blés de rattraper leur retard par rapport à ceux de la bordure littorale.

Pour illustrer ces écarts de température entre les sites, prenons l'exemple de la situation échaudante du 25 juin 2020 pour ces 3 stations météorologiques (figure 4). A Bernières-sur-Mer, le seuil de 25°C est franchi dès la fin de matinée. Néanmoins, la température décline très rapidement pour stagner autour de 23°C avec la levée d'une brise de mer rafraichissant le nord de la Plaine agricole. A Caen, la température atteint 30°C. L'effet de la brise de mer se fait ressentir quelques heures plus tard, c'est pourquoi la température n'ira pas au-delà de ce seuil.

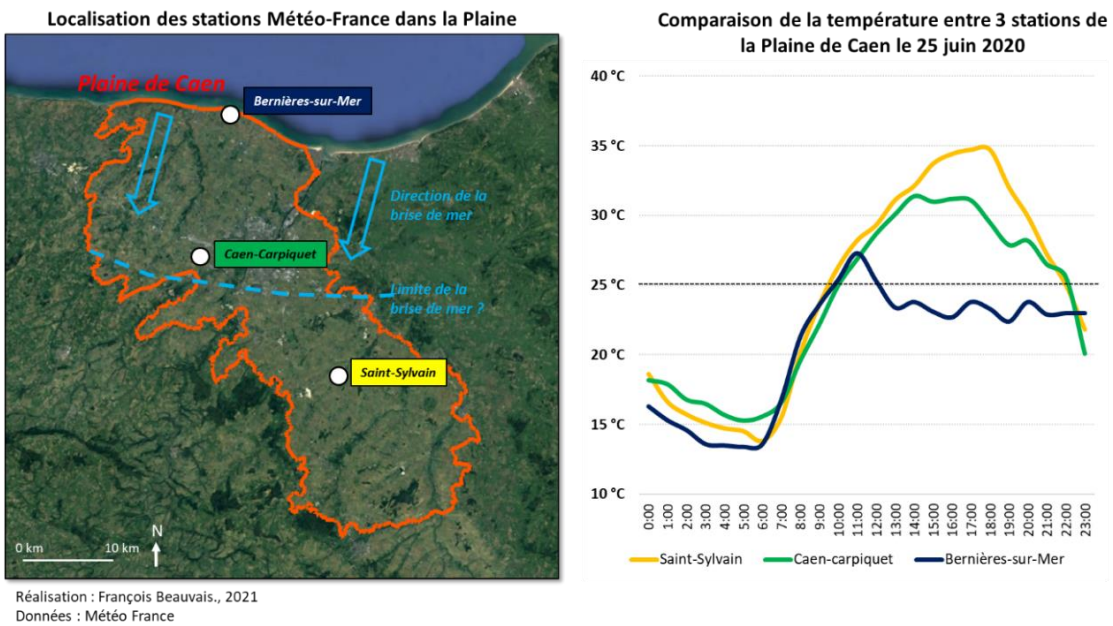


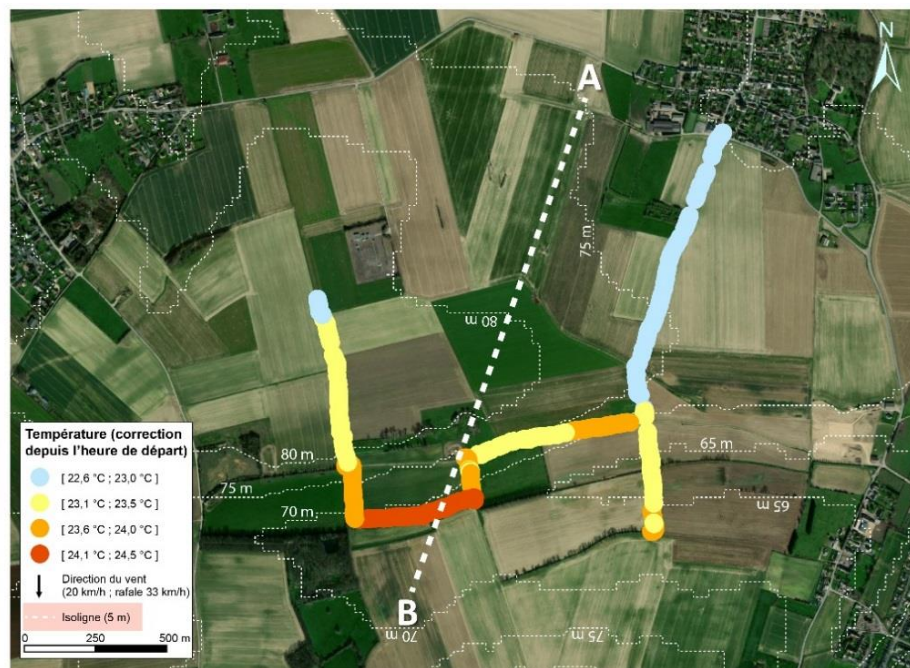
Figure 4. Comparaison de la température mesurée pour trois stations de la Plaine de Caen le 25 juin 2020. *Comparison of the temperature measured for three stations in the agricultural plain of Caen on June 25th 2020.*

A Saint-Sylvain, site non affecté par ce phénomène de brise, la température atteint jusqu'à 35°C. Pour ces deux dernières stations, la situation est échaudante jusqu'à 22 h. La position géographique explique ici une intensité et une durée différente de l'exposition à l'aléa, avec potentiellement des pertes de production inégales. Ces différences de températures ne s'expriment pas avec la résolution de 8 x 8 km de la maille SAFRAN simplifiant l'environnement de la Plaine de Caen, ce qui plaide en la faveur de nouvelles descentes d'échelles, de l'analyse des données mesurées à l'aide des stations météo ainsi qu'à l'instrumentation des terrains d'étude (voir thèse pour plus de précisions). Aussi, les données journalières extraites des modèles climatiques ne permettent pas une analyse infra-journalière pour calculer le temps d'exposition de la plante à l'aléa. Ces différences de températures peuvent également être constatées à des échelles encore plus fines (Quenol, 2002 ; Madelin, 2004 ; Bonnardot *et al.*, 2012 ; Le Roux, 2017). C'est par exemple le cas

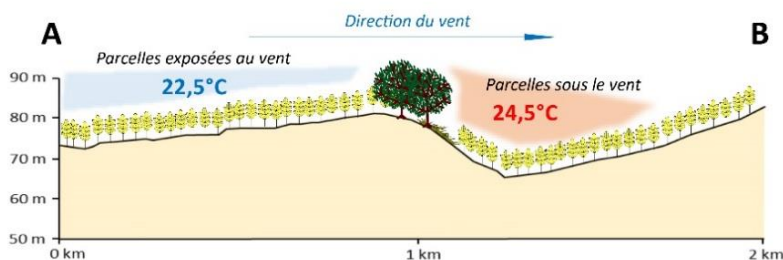
le 27 juin 2018, au nord-ouest de la Plaine de Caen. Les relevés en itinérance par temps ensoleillé mettent en évidence une température comprise entre 22,6 et 23°C sur le plateau exposé au vent frais de secteur nord. Dans le fond de vallée, sous le vent, elle s'élève jusqu'à 24,5°C. Ainsi, un petit versant d'une dizaine de mètres de dénivelée seulement, surmonté d'une haie, procure un abri suffisant pour engendrer une différence de température de près de 2°C en quelques hectomètres.

Parfois, le seuil d'un indicateur agroclimatique peut potentiellement être dépassé dans une parcelle et non dans une autre. Des contrastes liés aux inversions thermiques peuvent également être observés l'hiver par type de temps anticyclonique clair et calme (Cantat *et al.*, 2019). Les cultures en fonds de vallées sont alors plus vulnérables aux gelées. Des relevés menés au cours de la thèse (Beauvais, 2021) montrent aussi que l'occupation du sol (haies, talus de route, etc.) a des effets sur l'écoulement et la stagnation de l'air froid.

Figure 5. Température mesurée en itinérance à Saint-Manvieu-Norrey au nord-ouest de la Plaine de Caen le 27 juin 2018. *Temperature measured while roaming in Saint-Manvieu-Norrey northwest of the Caen Agricultural Plain on June 27th 2018.*



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).



Ces expérimentations devront être approfondies afin d'apporter des connaissances pour le conseil agricole et le choix des assolements pour la filière agricole selon les configurations propres à chaque parcelle, surtout si de nouvelles productions sont envisagées dans les prochaines décennies.

3.2. Re-contextualiser la situation de l'agrosystème normand dans l'agrosystème national

Il apparaît également pertinent de dézoomer à l'échelle de l'agrosystème céréalier national pour voir si la céréaliculture normande peut rester une place forte du grenier à blé français et déterminer si toutes les plaines agricoles françaises sont vulnérables de la même façon au changement climatique. La méthode phénoclimatique a donc été dupliquée pour 6 autres sites caractéristiques de la céréaliculture française : Albert, Châteaudun, Dijon, Niort, Clermont-Ferrand et Auch. D'ici 2100, les principales tendances constatées en Plaine de Caen se retrouvent pour ces autres espaces agricoles (Beauvais *et al.*, 2022b). L'analyse comparative démontre que la situation de la Plaine de Caen serait moins défavorable que les autres sites car moins exposée à l'échaudage thermique. Le blé à Albert et à Châteaudun serait ainsi en moyenne exposé à 10 jours d'échaudage dans le cas du scénario RCP8.5 (contre 7 jours à Caen). Niort, Dijon et Clermont-Ferrand en comptabiliseraient un peu moins de 15, tandis qu'Auch en recenserait 17. Néanmoins, pour tirer profit de cet avantage, la céréaliculture caennaise devra rester vigilante au déficit de jours de vernalisation tandis que les sites plus continentaux du pays seraient moins impactés en raison de leur hiver plus froid permettant davantage de jours avec une température moyenne comprise entre 3 et 10°C (plage de températures pour initier le passage de l'état végétatif à reproducteur du blé).

3.3. S'intéresser à l'ensemble de l'agrosystème pour étudier sa résilience

La viabilité des agrosystèmes céréaliers repose également sur d'autres productions qui garantissent les rotations culturales et participent dans le même temps à une diversification des débouchés agricoles. C'est par exemple le cas du lin fibre de printemps qui constitue une tête d'assolement. Cette

culture est emblématique du savoir-faire agricole des plaines du nord-ouest de la France. Avec 300 000 tonnes produites chaque année, la Normandie concentre 50 % de la production mondiale. Principalement exploitée pour ses fibres à destination de l'industrie textile, cette culture est également vulnérable au changement climatique (Beauvais *et al.*, 2022a). Semé à la fin du mois de mars et arrachée au début du mois de juillet, cette culture déroule son cycle sur 120 jours. Dans le cas du scénario RCP8.5, la durée du cycle serait réduite d'environ 3 semaines d'ici 2100. Le déficit hydrique du mois de juin pourrait alors être évité. Cependant, les jours de chaleur au printemps seraient plus nombreux. Ils pourraient engendrer des fibres plus courtes et creuses, inexploitable par l'industrie textile. Pour maintenir les débouchés et les rotations culturales, le lin d'hiver et le chanvre peuvent constituer des alternatives. Cet exemple du lin montre que ces études d'impact doivent être produites sur toutes les cultures de l'agrosystème mais également pour de nouvelles productions qui pourront être envisagées dans les prochaines décennies.

Afin de répondre dans le même temps aux objectifs de réduction des émissions de GES (atténuation), ces nouvelles cultures devront répondre à des débouchés locaux, tout en s'inspirant de l'agroécologie pour repenser en globalité l'agrosystème de demain plus respectueux de l'environnement. Cet objectif plaide pour les approches géosystémiques au sein desquelles les filières agricoles et alimentaires sont considérées au cœur de l'agrosystème. En effet, si cette recherche s'intéresse aux processus physiques à l'interface atmosphère-sol-plante, les résultats ne peuvent être dissociés des interactions avec les sociétés humaines. Les choix et les actions associés agissent sur le système, tant par les différentes pressions pouvant causer des déséquilibres ou des rééquilibrages post-crisis, qui d'ailleurs s'expriment dans le cadre de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique.

Conclusion

Tout bien considéré, cette étude exprime la complexité des conséquences du changement climatique pour l'agriculture et discute des

méthodes permettant de l'aborder. L'analyse des évolutions associées aux indicateurs agroclimatiques (IAG) laisse supposer que le blé pourrait être exposé à une hausse prononcée du déficit hydrique et des jours d'échaudage thermique. Mais c'est sans compter sur l'avancée des stades phénologiques dans le calendrier, permettant l'évitement en grande partie des sécheresses et des chaleurs estivales mis en lumière par l'approche phénoclimatique fondée sur les indicateurs phénoclimatiques (IPH). En conséquence, le déficit hydrique cumulé par le blé ne serait pas en hausse et l'exposition à l'échaudage thermique serait contenue, ce qui limiterait l'impact sur le remplissage. Les IPH exposent également que la partie du cycle se déroulant actuellement au printemps serait avancée vers des jours plus courts en sortie d'hiver et soumise à de plus basses températures, avec des conséquences sur la croissance et la fertilité du blé. Les deux sources d'indicateurs présentent une réduction très nette du nombre de jours de vernalisation dès l'horizon proche.

Les résultats tirés des IAG et des IPH sont différents. Les IPH tenant compte de la modification de la durée des périodes phénologiques mettent en évidence une modification de l'exposition du blé tendre aux aléas. Précisons d'ailleurs que les résultats issus de l'analyse de ces indicateurs sont conformes aux tendances présentées par Gate (2008) et Gouache *et al.* (2012) en France ainsi que Semenov *et al.* (2009) et Trnka *et al.* (2014) en Europe. Par la comparaison directe des deux méthodes, cette étude démontre et confirme que les IPH sont plus précis et permettent, de s'approcher au plus près des conditions vécues par la plante. Néanmoins, les IAG restent malgré tout pertinents pour connaître de prime abord les grandes évolutions climatiques sur les principales périodes du calendrier agricole. Ce constat est important puisque les filières agricoles envisagent l'adaptation au changement climatique à partir de diagnostics reposant très souvent sur des IAG.

A l'issue de ce travail, nous recommandons par conséquent de recourir au double emploi des IAG et IPH dans les études d'impacts en agroclimatologie. Cependant, pour approfondir l'analyse, il convient de ne pas négliger les approches spatiales. Dès lors que l'on change d'échelle, les réalités vécues sur le

terrain sont parfois différentes. Les relevés à échelle fine montrent par exemple la diversité des températures au sein de la plaine agricole. Mais la recherche doit également intégrer des échelles supérieures puisque les agrosystèmes régionaux sont directement connectés avec l'agrosystème national et international. Ce point est essentiel pour imaginer la place future de la Plaine de Caen dans la céréaliculture française. Dans l'optique d'une augmentation de la population mondiale à près de 10 milliards d'individus à l'horizon 2050 et dans l'hypothèse d'un système économique et agroalimentaire inchangé, nous pouvons supposer que la demande en blé tendre devrait rester conséquente et peut-être même croître. Si la filière agricole réussit son adaptation, ce constat pourrait garantir la rentabilité de la céréaliculture normande et française pour les décennies à venir.

Remerciements : Au travers cet article de synthèse, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Olivier Cantat et Philippe Madeline (Université de Caen) pour leur encadrement, ainsi que les collègues des UMR CNRS LETG et ESO, laboratoires au sein desquels ce travail a été réalisé. Merci également à Patrick Le Gouée (Université de Caen) et à Sophie Brunel-Muguet (UMR EVA INRAE Caen) pour les nombreux échanges tout au long de la thèse, respectivement sur les sols et la phénologie. Merci à Hervé Gaillard de l'unité INFOSOL de l'INRAE Orléans pour sa collaboration en pédologie. Enfin, je tiens à remercier la région Normandie pour le financement de la thèse ainsi que l'Association Internationale de Climatologie pour l'attribution du Prix Gérard Beltrando 2022.

Références

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. *FAO Irrigation and drainage paper N°56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56, 97, 300 p.
- ARVALIS – Institut du végétal, 2017. *Blé tendre*. Guide de culture, 168 p.
- ARVALIS – Institut du végétal, 2003. *Stades du blé*. Institut technique des céréales et des fourrages – ARVALIS, Editions ARVALIS, 68 p.
- Beauvais F., Cantat O., Madeline P., Le Gouée P., Brunel-Muguet S., Medjkane M., 2019. 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*, 16, 129-160.

- Beauvais F., 2021. *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*. Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, 532 p.
- Beauvais F., Cantat O., Le Gouée P., Brunel-Muguet S., Madeline P., Gaillard H., Bataille M.P., Sallent A., Preux T., Medjkane M., 2022a. Consequences of climate change on flax fiber in Normandy by 2100: prospective bioclimatic simulation based on data from the ALADIN-Climate and WRF regional models. *Theoretical and Applied Climatology*, 148, 415-426.
- Beauvais F., Cantat O., Le Gouée P., Madeline P., Brunel-Muguet S., Boulonne L., Gaillard H., Jolivet C., Bataille M-P., Medjkane M., 2022b. Changement climatique et culture du blé tendre d'hiver en France aux horizons 2070 et 2100 : étude phénoclimatique et géographique à partir des données issues du modèle ALADIN-Climate. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 1034.
- Bonnardot V., Carey V-A., Madelin M., Cautenet S., Coetzee Z., Quenol H., 2012. Spatial of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosh wine district, South Africa. *Journal International des sciences de la vigne et du vin*, 46, 1, 1-13.
- Bonhomme R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13, 1, 1-10.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charment G., Oury F.-X., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field crops research*, 119, 1, 201-212.
- Cantat O., Beauvais F., Hericher S., 2020. *Le climat en Normandie : présentation et évolutions*. In: Le climat en Normandie, Profil environnemental de Normandie, DREAL de Normandie.
- Cantat O., Laignel B., Nouarceur Z., Costa S., 2021. *Changement climatique et aléas météorologiques*. Rapport pour le GIEC Normand, 45 p.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaïd 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 Cortazar-Atauri I. G., Launay M., De Noblet-Ducoudre 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*, 207, 94-106.
- 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)*. In: XXXII^{ème} Colloque International de l'AIC : Le changement climatique, la variabilité et les risques climatiques, 32, 83-88.
- Durand R., 1969. Signification et portée des sommes de températures. *Bulletin Technique d'Information-Ministère de l'Agriculture*, 238, 185-190.
- Gate P., 1995. *Écophysiologie du blé. De la plante à la culture*. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 429 p.
- 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*, 15, 5, 332-336.
- Gate P., Brisson N., Gouache D., 2010. Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d'abord une origine climatique. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 96, 3, 17-23.
- 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*, 39, 62-70.
- Holzschläger A., Calanca P., Fuhrer J., 2011. Analyzing climate effects on agriculture in time and space. *Procedia Environmental Sciences*, 3, 58-62.
- 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.
- 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., 2018. *Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)*. RMQS2 : deuxième campagne métropolitaine 2016-2027, INRA, 150 p.
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaïd A., Savouret E., 2010. *La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique (2000-2100)*. 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Risques et changement climatique, Rennes, France, 331-336.
- Le Roux., 2017. *Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Loire, 206 p.
- Le Stum H., Bonjean A., Ruch O., Bouquery J.-M., Soppelsa C., Grecourt T.-B. et al., 2017. *Le blé*. Paris, Editions France Agricole, 269 p.
- Madelin M., 2004. *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales*. Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris 7, 412 p.
- Mossad M. G., Ortiz-Ferrara G., Mahalakshmi V., Fischer R. A., 1995. Phyllochron response to vernalization and photoperiod in spring wheat. *Crop Science*, 35, 1, 168-171.
- Quenol H., 2002. *Modifications climatiques aux échelles fines générées par un ouvrage linéaire en remblai : L'exemple de l'incidence de la Ligne à Grande Vitesse du TGV Méditerranée sur le gel printanier et l'écoulement du mistral dans la basse vallée de la Durance*. Thèse de doctorat, Université Lille 1, 306 p.

- Quintana-Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Cannellas C., Franchisteguy L., Morel S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, 47, 92-107.
- 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*, 3, 1, 1-7.
- Semenov M. A., 2009. Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *Journal of the Royal Society Interface*, 6, 343-350.
- Spiridonov V., Déqué M., Somot S., 2005. ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date. *ALADIN Newsletter*, 29, 89-92.
- 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*, 67, 3, 429-443.
- Thorntwaite C. W., Mather J., 1955. *The water balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology, 104 p.
- 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*, 4, 7, 637-643.
- Turc L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- 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*, 109, 1, 5-31.
- Vidal J.-P., Martin E., Franchisteguy L., Baillon M., Soubeyroux J.-M., 2010. A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 1627-1644.

Citation de l'article : Beauvais F., 2022. Approches géographiques et agroclimatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de la Plaine de Caen aux horizons 2050 et 2100 : analyse comparative des résultats tirés des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques. *Climatologie*, 19, 3.