



HAL
open science

**Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ?
Etude d'impact prospective à partir du modèle
ALADIN-Climat**

François Beauvais, Olivier Cantat, Philippe Madeline, Patrick Le Gouée,
Sophie Brunel-Muguet, Mohand Medjkane

► **To cite this version:**

François Beauvais, Olivier Cantat, Philippe Madeline, Patrick Le Gouée, Sophie Brunel-Muguet, et al.. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? Etude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie*, 2019, 16, pp.129-160. 10.4267/climatologie.1414 . hal-02447380

HAL Id: hal-02447380

<https://normandie-univ.hal.science/hal-02447380>

Submitted on 29 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

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

François BEAUVAIS ^{1,2}, Olivier CANTAT ¹, Philippe MADELINE ²,
Patrick LE GOUÉE ¹, Sophie BRUNEL-MUGUET ³, Mohand MEDJKANE ^{1,4}

¹ Normandie Univ., UNICAEN, CNRS, LETG
14000 Caen, France
francois.beauvais@unicaen.fr

² Normandie Univ., UNICAEN, CNRS, ESO
14000 Caen, France

³ Normandie Univ., UNICAEN, INRA, EVA
14000 Caen, France

⁴ Normandie Univ., UNICAEN, CNRS, IDEES
14000 Caen, France

Résumé

En Normandie, la culture du blé qui occupe 24 % de la SAU régionale tient une place importante parmi les productions végétales. Le changement climatique peut-il avoir des conséquences sur le cycle de cette céréale et perturber les pratiques et les espaces concernés ? Cet article projette la phénologie et les performances culturales de l'agrosystème céréalière régional d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Il s'appuie sur une modélisation bioclimatique qui mobilise les données CNRM-2014 du CNRS et de Météo-France sorties du modèle régional ALADIN-Climat pour trois scénarios RCP du GIEC. Dans le cas de dates de semis inchangées aux horizons 2050 et 2100 et d'un changement climatique prononcé, l'élévation des températures engendrerait un raccourcissement du cycle et donc une anticipation calendaire de la phénologie. Ce qui éviterait un chevauchement de la fin du cycle avec la période estivale à laquelle sont associés des événements de sécheresse et de vagues de chaleur dont la fréquence pourrait augmenter dans les prochaines décennies. En conséquence, l'échaudage thermique et le déficit hydrique seraient moindres que ce que l'on pouvait envisager. Toutefois, cette précocité pourrait perturber des stades plus précoces de développement du blé tendre : basses températures à la méiose et déficit de rayonnement au début de la montaison. De plus, la douceur accrue des hivers pourrait engendrer une diminution du nombre de jours de vernalisation, phase nécessaire pour la floraison des variétés d'hiver. Cette étude démontre l'intérêt des modèles bioclimatiques pour envisager les modifications possibles de la phénologie des cultures attendus d'ici la fin du siècle.

Mots-clés : changement climatique, modélisation, bioclimatologie, blé tendre, Normandie.

Abstract

***What will be the consequences of the climate change on soft wheat in Normandy in 2050-2100?
Prospective impact study based on ALADIN-Climate model***

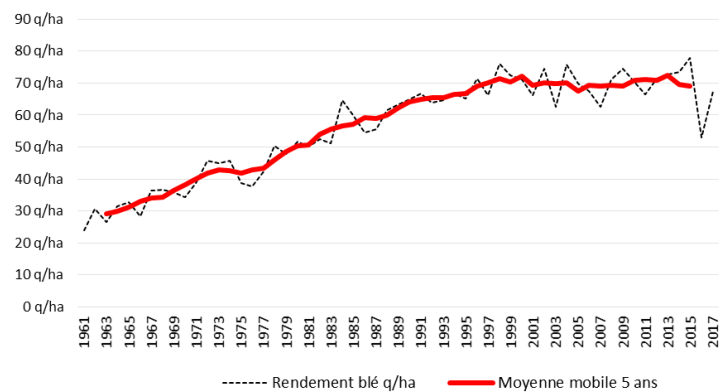
*In Normandy, climate change is expected to drastically impact the crop cycle of soft wheat (*Triticum aestivum*) which ranks in the main cultivated crops in this area (with 24% of the Utilised Agricultural Land). This study proposes to project cereal phenology and performances by the end of the 21st century based on the CNRM-2014 data extracted from ALADIN-Climat (regional model) for three RCPs. In the context of pronounced climate change, along with unchanged sowing dates by 2050 and 2100, the increase in temperatures would lead to shorten the crop cycle, and hence to a date shift in the plant phenology. Consequently, there would be a shorter overlap between the end of the crop cycle and the summer period and, usually characterized by heat waves and water stress events which are expected to occur more often. Thus high temperature triggered scalding would not be observed as much as expected and the cumulated water limitation would be also lower. However, because of this precocity, emerging consequences might be expected regarding deleterious effects of lower temperatures during meiosis, and decrease of solar radiation at the onset of stem elongation. Mild winters would also reduce the days of vernalization, limiting cold requirements during tillering. This study demonstrates the use of bioclimatic models to unravel the crop phenology modifications, expected to occur by the end of the century, under the main environmental climatic drivers.*

Keywords: climate change, modeling, bioclimatology, soft wheat, Normandy.

Introduction

Le changement climatique est à l'origine de transformations environnementales et sociétales qui devraient s'amplifier (IPCC, 2014). Les productions agricoles n'échappent pas au débat portant sur les changements globaux, avec en toile de fond les menaces pesant sur la sécurité alimentaire mondiale générée par l'augmentation de la demande liée à la poursuite de la croissance démographique (HLPE, 2012). Le blé (*triticum aestivum*), domestiqué depuis le néolithique, a accompagné le développement de nos sociétés méditerranéennes et occidentales (Abis, 2015). Cette plante, la plus répandue dans le monde, est la première source d'alimentation humaine de la planète (Le Stum *et al.*, 2017). La France est le cinquième pays producteur mondial derrière la Chine, l'Inde, la Russie et les Etats-Unis. Mais cette production est vulnérable. La stagnation des rendements observée en France depuis les années 1990 (figure 1), qui concerne 70 à 80 % des surfaces de blé, en atteste (Ray *et al.*, 2012 ; Schauburger *et al.*, 2018). D'après les agronomes, la cause est principalement climatique, compte-tenu d'une hausse de l'échaudage thermique¹ pendant le remplissage des grains et des sécheresses² au cours de la montaison (Gate, 2009 ; Brisson *et al.*, 2010 ; Gate *et al.*, 2010). Ces aléas, dont l'augmentation est attendue dans les prochaines décennies (Gate, 2008 ; Brisson *et al.*, 2010 ; Gouache *et al.*, 2012), sans négliger d'autres menaces d'origine atmosphérique³, vont peser sur la production.

Figure 1. Evolution du rendement du blé tendre en France de 1961 à 2017 (données FAOSTAT). Evolution of soft wheat yield in France from 1961 to 2017 (FAOSTAT data).



Derrière l'image d'un territoire voué à l'élevage, la Normandie apporte une contribution non négligeable au grenier à blé français (Frémont, 2015). Mais la situation est-elle menacée par le changement climatique à venir ? Dans l'hypothèse forte de printemps et d'été plus chauds et plus secs, l'évolution du climat régional au cours du 21^{ème} siècle pourrait constituer une menace pour l'équilibre des systèmes d'exploitation céréalières normands, comme le montrent des travaux récents sur l'évolution du contexte climatique (Cantat *et al.*, 2014 ; Büllher et Caillebotte, 2014 ; Cantat *et al.*, 2019) et bio-pédoclimatique (Cantat *et al.*, 2009 ; Cantat *et al.*, 2010 ; Le Gouée *et al.*, 2010a ; Le Gouée *et al.*, 2010b ; Lamy *et al.*, 2012 ; Beauvais, 2016). En revanche, les conséquences associées sur la culture du blé tendre n'ont jusqu'à présent pas fait l'objet d'une étude approfondie.

Cette étude cherche à accompagner la profession agricole tournée vers les cultures céréalières, en vue de connaissances régionales et locales nouvelles pour des stratégies

¹ L'échaudage thermique correspond à des températures supérieures ou égales à 25°C pouvant engendrer un avortement de fleurs (entre les stades méiose et la floraison) ou bien limiter le poids des grains (remplissage des grains entre le stade floraison et la maturité) conduisant à une diminution du PMG (Poids de Mille Grains).

² Il s'agit ici de sécheresses pédologiques.

³ L'année 2016 le démontre puisque les récoltes ont enregistré une chute historique des rendements causée par une fin d'automne et un début d'hiver doux, suivi d'un printemps humide (Ben-Ari *et al.*, 2018).

d'adaptations aux changements climatiques. Le travail repose sur la conception d'un modèle bioclimatique alimenté par des projections à fine résolution spatiale simulant le climat du futur selon différents niveaux de forçages radiatifs liés à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (IPCC, 2014).

1. Présentation de l'étude

1.1. Le blé : une céréale majeure de l'agrosystème normand

Quatrième région productrice de France avec 3,6 millions de tonnes par an, la production normande de blé tendre équivaut, d'après les données Agreste, à un peu plus de 10 % de la production nationale pendant la période 2000-2016. Les rendements de 77 q/ha/an sont environ 8 % supérieurs à la moyenne nationale (71 q/ha/an). Cette céréale occupe donc une place importante, d'autant plus qu'à l'échelle régionale elle représente 24 % des surfaces agricoles et 52 % de celles consacrées aux cultures de vente (Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, 2019). En 2015, le blé tendre représentait à lui seul 12 % du chiffre d'affaire des productions agricoles normandes, toutes branches confondues (Agreste, 2017). Les débouchés économiques concernent principalement l'exportation (Frémont, 2015 ; Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, 2019) *via* les ports de Rouen et de Caen, à destination du Maghreb et de la Chine. Le port seino-normand constitue d'ailleurs le principal exutoire des blés français destinés à l'exportation (50 % de la production nationale), ce qui lui vaut la place de leader au sein de l'Europe de l'Ouest. Enfin, dans une moindre mesure, une partie des productions est destinée à la fabrication d'aliments pour le bétail et à la meunerie (transformation du grain en farine). Par ailleurs, de la production à la transformation en passant par la collecte, la filière céréalière normande occupe 27 000 emplois (*Passion céréales*, cf. site internet⁴). L'impact du changement climatique sur les productions céréalières et, plus largement, sur l'économie agricole normande est donc une préoccupation largement partagée par la profession agricole et les décideurs politiques et économiques.

Pour contribuer au débat, cet article propose deux études de cas représentatives des grandes plaines céréalières normandes (Marie *et al.*, 2014) : le secteur de Caen, à l'ouest, et celui d'Evreux, à l'est. Le blé y occupe respectivement 45 et 55 % de la surface agricole utile (figure 2). Ces deux terrains d'étude se justifient par un climat présentant des nuances suffisantes pour jouer sur les conditions de développement de la plante.

1.2. Données et évolutions climatiques

1.2.1. Le climat normand observé

Le climat normand est favorable à la culture du blé. La proximité de la Manche permet d'atténuer les fortes gelées hivernales et les canicules estivales (Pédelaborde, 1958 ; Trzpit, 1970 ; Planchon, 1997 ; Vigneau, 1997) préjudiciables au bon développement de la plante, tout en bénéficiant de précipitations régulières. Ceci n'exclut pas, certaines années, le risque de déficit hydrique dès le printemps, comme dans tout le nord-ouest de la France (Dubreuil, 1994). C'est ce qui explique le recours possible à l'irrigation pour les sols les plus minces disposant de moins de réserve hydrique après la recharge hivernale (Trzpit, 1978 et 1998).

L'analyse des données mesurées par le réseau de Météo-France souligne toutefois des nuances climatiques plus ou moins marquées à l'échelle subrégionale, en fonction de l'éloignement des côtes, de l'exposition aux flux océaniques et des contrastes topographiques

⁴ <https://www.passioncereales.fr/>

entre les plateaux et les collines du bocage (Trzpit, 1970 ; Escourrou, 1978 ; Cantat et Brunet, 2001 ; Cantat, 2015a).

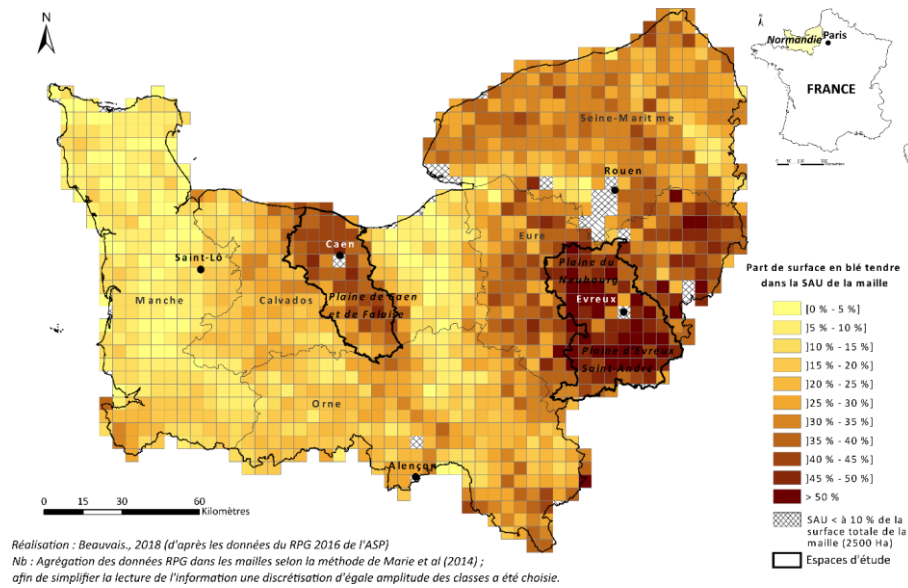


Figure 2. Localisation des Plaines agricoles de Caen-Falaise et du Neubourg-Saint-André et part de la surface en blé tendre dans la surface agricole utile de Normandie selon un maillage de 2500 ha (données du registre parcellaire graphique 2016 de l'Agence de service et de paiement). *Localisation of study areas and share of soft wheat area in utilised agricultural land (RPG 2016 data of ASP).*

Ainsi, la Plaine⁵ de Caen-Falaise est sous l'influence d'un climat océanique légèrement altéré, tandis que la Plaine du Neubourg et celle de Saint-André subissent des effets de continentalité et d'abri plus marqués (Joly *et al.*, 2010 ; Cantat et Beauvais, 2019). L'influence des facteurs géographiques sur le climat se matérialisent sur la Normale 1981-2010 (figure 3) par des conditions globalement beaucoup moins arrosées à l'échelle de l'année à Evreux (605 mm contre 740 mm à Caen), surtout sensibles en automne et en hiver, et des caractères thermiques saisonniers plus contrastés notamment par un hiver plus froid (52 jours de gel⁶ contre 32 à Caen) et un été plus chaud (33 jours de chaleur⁷ contre 23 à Caen).

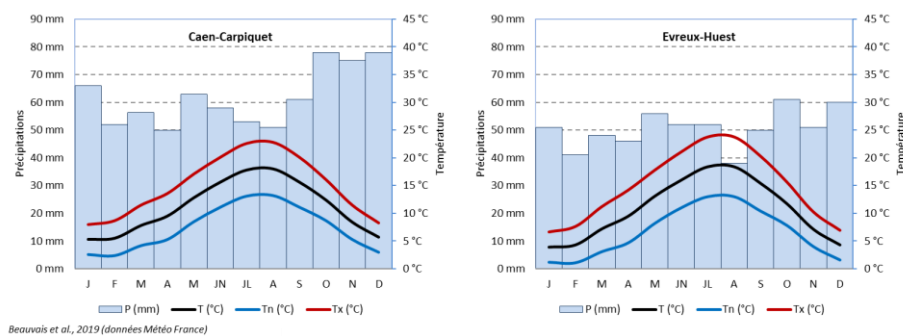


Figure 3. Diagramme ombrothermique pour les sites de Caen et d'Evreux sur la normale climatique 1981-2010 (données Météo-France). *Ombrothermal diagrams for Caen and Evreux over the climate normal period 1981-2010 (Météo-France data).*

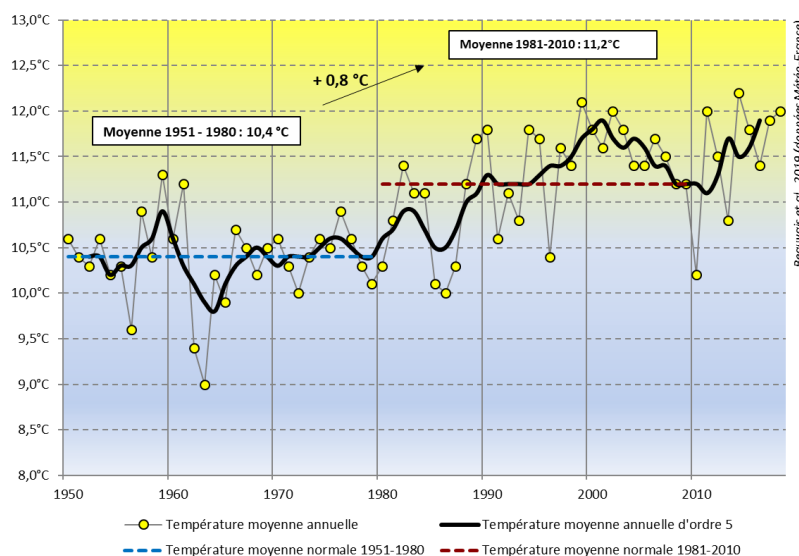
⁵ « Plaine » (avec un « p » majuscule et/ou écrit en italique) est pris au sens agricole du terme et non dans sa définition topographique (il s'agit ici en fait de deux plateaux légèrement incisés).

⁶ Considéré ici pour une valeur de température minimale quotidienne inférieure ou égale à 0°C.

⁷ Considéré ici pour une valeur de température maximale quotidienne supérieure ou égale à 25°C (ce qui correspond en agroclimatologie à une journée d'échaudage ; cf. note 1).

Ce climat change... Ainsi, la température moyenne annuelle en Normandie a augmenté de l'ordre de $+0,8^{\circ}\text{C}$ entre les normales climatiques 1951-1980 et 1981-2010, d'après les données de la station de Caen-Carpiquet⁸ (figure 4).

Figure 4. Evolution de la température moyenne annuelle à Caen-Carpiquet de 1950 à 2018 (données Météo-France). Evolution of the average annual temperature at Caen-Carpiquet from 1950 to 2018 (Météo-France data).



Sur la même période, à Caen, le nombre de gelées a diminué de 11 jours par an (de 41 à 30) tandis que le nombre de jours de chaleur a progressé de 10 jours par an (de 12 à 22). La hausse de la température se poursuit actuellement puisque la moyenne des huit dernières années (2011-2018) est de $11,7^{\circ}\text{C}$, soit $1,3^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la Normale 1951-1980 ($10,4^{\circ}\text{C}$) et $0,5^{\circ}\text{C}$ au-dessus de celle établie sur 1981-2010 ($11,2^{\circ}\text{C}$). Le réchauffement se manifeste plus concrètement dès la fin des années 1980, avec une rupture estimée en 1987 à partir du test de Pettit (Pettit, 1979) (figure 5), élément également constaté dans d'autres régions françaises (Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Briche *et al.*, 2010 ; Madelin *et al.*, 2010).

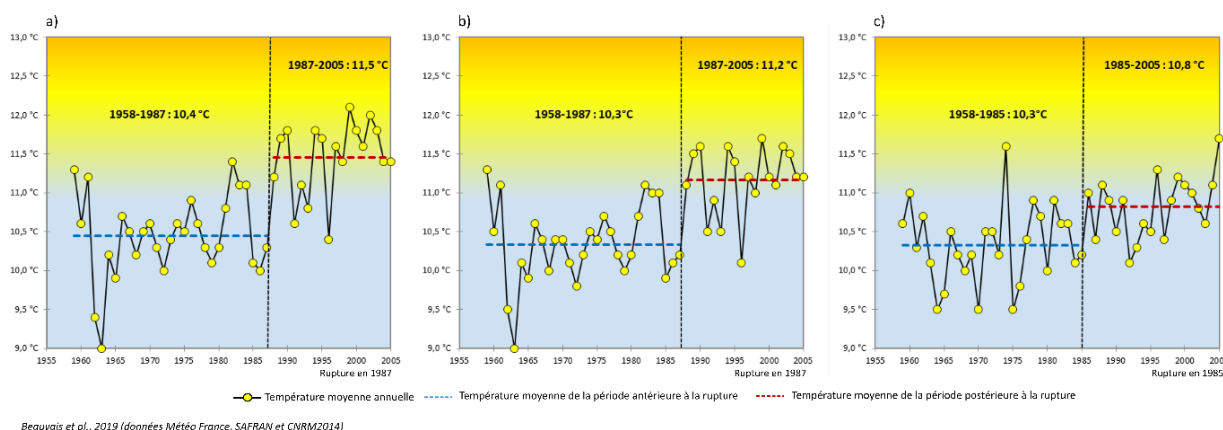


Figure 5. Evolution de la température moyenne annuelle à Caen de 1950 à 2005 et identification de l'année de rupture selon le test de Pettit avec coefficient alpha = 0 : a) données Météo-France mesurées ; b) point de grille analyse SAFRAN ; c) point de grille simulation CNRM-2014. Evolution of the annual average temperature in Caen and identification of the year of rupture according to the Pettit test with alpha coefficient = 0: a) measured Météo-France data; b) SAFRAN analysis grid point; c) CNRM-2014 grid point.

⁸ L'ouverture de la station d'Evreux-Huest en 1968 ne permet pas de calculer l'évolution entre les deux Normales. Toutefois, la comparaison avec d'autres stations régionales et extrarégionales (dans un contexte climatique proche et disposant d'une profondeur temporelle suffisante) confirme l'ordre de grandeur mis en évidence à Caen-Carpiquet : environ $+0,7^{\circ}\text{C}$ à Alençon dans l'Orne et Dinard en Ille-et-Vilaine ; $+0,8^{\circ}\text{C}$ à Nantes en Loire-Atlantique et Dieppe en Seine-Maritime, par exemple.

Pour les précipitations totales annuelles, bien que la Normale soit en augmentation (de 709 à 740 mm), aucune tendance significative n'est statistiquement démontrée du fait de la très forte variabilité interannuelle (figure 6). A noter que ces variations de la pluviométrie, habituelles sous climat océanique tempéré, semblent moins prononcées depuis le début du 21^{ème} 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 2001-2018), ce qui serait favorable aux cultures grâce à la réduction des années très peu arrosées. La dernière année inférieure à 600 mm remonte à 1996.

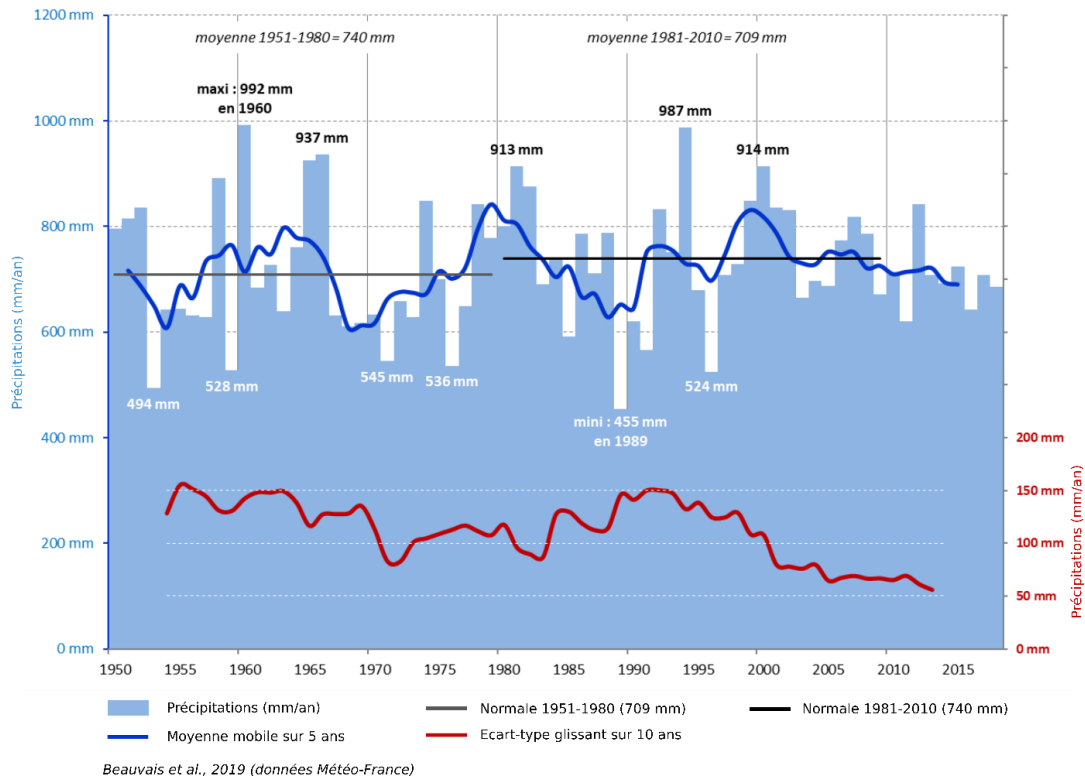


Figure 6. Evolution des précipitations totales annuelles à Caen-Carpiquet de 1950 à 2018 et image de la variabilité interannuelle via l'écart-type (données Météo-France). Evolution of total yearly rainfall at Caen-Carpiquet from 1950 to 2018 and representation of interannual variability using standard deviation.

1.2.2. Le climat normand futur modélisé

Les données de référence pour le climat futur sont celles des réanalyses SAFRAN dont la grille est de 8 km de côté (Quintana-Segui *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010)⁹. Les données quotidiennes sont collectées sur la période 1976-2005 afin de pouvoir être comparables à celles de la simulation CNRM-2014 sur le même point de grille¹⁰ (figure 7) et la même période. 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 (figure 8). Ces données sorties du modèle régional à aire limitée ALADIN-Climat (Spiridonov *et al.*, 2005) sont disponibles pour tout le territoire français sur le portail internet *DRIAS Les futurs du climat*¹¹ (Ouzeau *et al.*, 2014)¹². Les projections utilisées sont issues des scénarios

⁹ 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 (<http://www.umr-cnrm.fr/>).

¹⁰ L'altitude du point de grille est de 55 m pour celui de Caen et de 140 m pour celui d'Evreux.

¹¹ <http://www.drias-climat.fr/>

¹² Les conditions aux limites latérales d'ALADIN-Climat sont issues d'une première descente d'échelle dynamique entre le modèle global couplé CNRM-CM5 (Voltaire *et al.*, 2011) et le modèle ARPEGE-Climat

RCP 2.6, 4.5 et 8.5 du GIEC¹³ (Van Vuuren *et al.*, 2011), à des horizons proche (2021-2050) et lointain (2071-2100).

Figure 7. Points sélectionnés sur la grille SAFRAN 8 x 8 km et topographie de la Normandie à partir de la BD Alti 75 m de l'Institut national de l'information géographique et forestière. *Selected points on the 8x8km SAFRAN grid and Normandy topography from BD Alti 75m of the National Institute for Geographical Information and Forestry.*

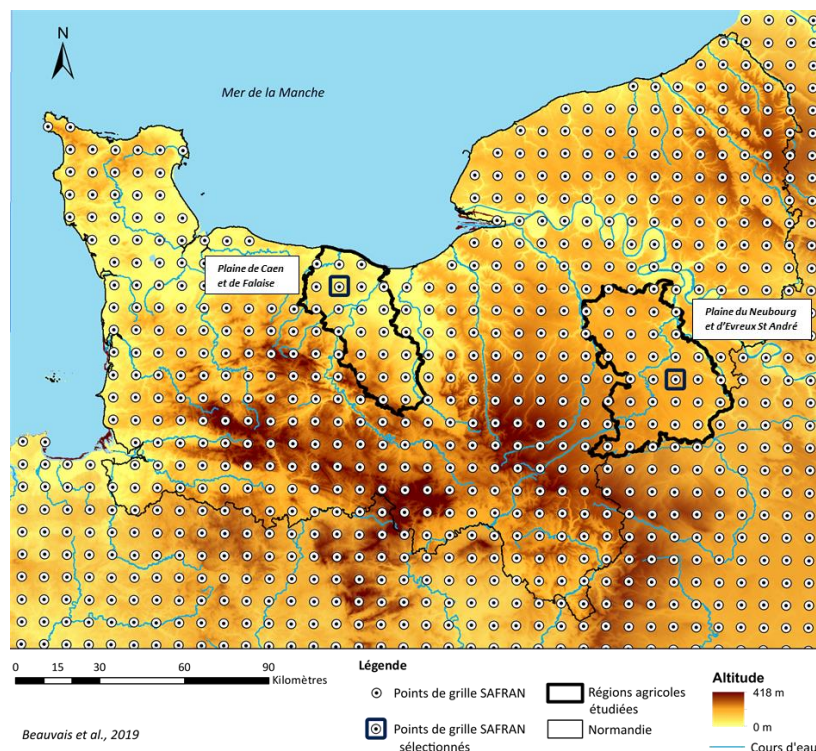
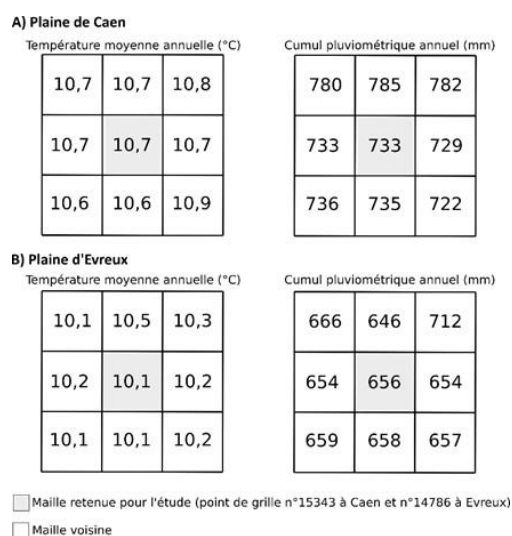


Figure 8. Comparaison de la température moyenne annuelle et du cumul pluviométrique annuel du point de grille SAFRAN (période 1976-2005 du scénario historique des données CNRM-2014) retenu avec les huit points voisins pour les sites de : a) Caen ; b) Evreux. *Comparison of annual average temperature and total yearly rainfall of the SAFRAN grid point (1976-2005 period for historical scenario of the CNRM-2014 data) selected with the eight neighbouring points for the sites of: a) Caen; b) Evreux.*



(Déqué *et al.*, 1994). Les mailles élémentaires des simulations CNRM-2014 sont respectivement de 12 km et les variables sont interpolées avec la grille SAFRAN dont la résolution est de 8 km. Elles sont ensuite corrigées à partir d'une réanalyse SAFRAN en tenant compte des observations (1000 pour la température et 3500 pour les précipitations) d'après la méthode de correction quantiles-quantiles (Déqué, 2007).

¹³ Le GIEC a produit 4 scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) en fonction du forçage radiatif induit par les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique à l'horizon 2100.

Les 2 scénarios les plus contrastés correspondent :

- au scénario « bas » (ou « optimiste ») RCP 2.6, c'est-à-dire à un forçage anthropique de +2,6 W/m² par rapport à la période pré industrielle. Il est donc synonyme d'une réduction des GES (3,1 W/m² en 2018) mais la température continuerait toutefois à augmenter du fait de l'inertie du système ;
- au scénario « élevé » (ou « pessimiste ») RCP 8.5 (+8,5 W/m²), synonyme d'une absence de politique climatique internationale (trajectoire actuelle).

Dans l'optique d'une absence de politique climatique (scénario RCP 8.5), une hausse conséquente des températures pourrait avoir lieu (+ 3,4°C à Caen et +4°C à Evreux) d'ici 2100, par rapport à la période de référence 1976-2005. En revanche, si des efforts importants pour diminuer les gaz à effet de serre (GES) sont consentis (scénario RCP 2.6), l'augmentation des températures serait moins forte (+ 1°C environ) et plafonnerait dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle (figure 9).

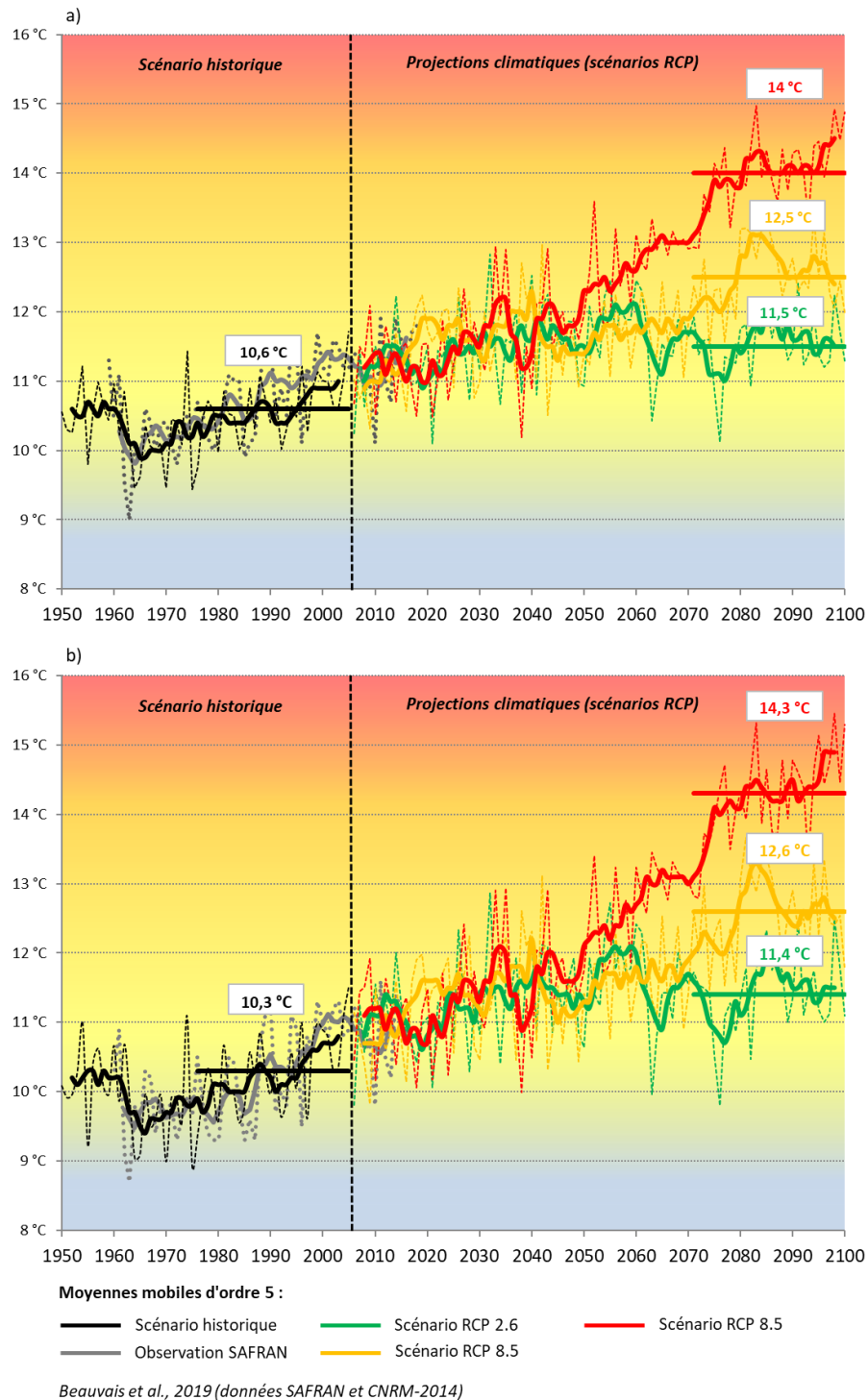
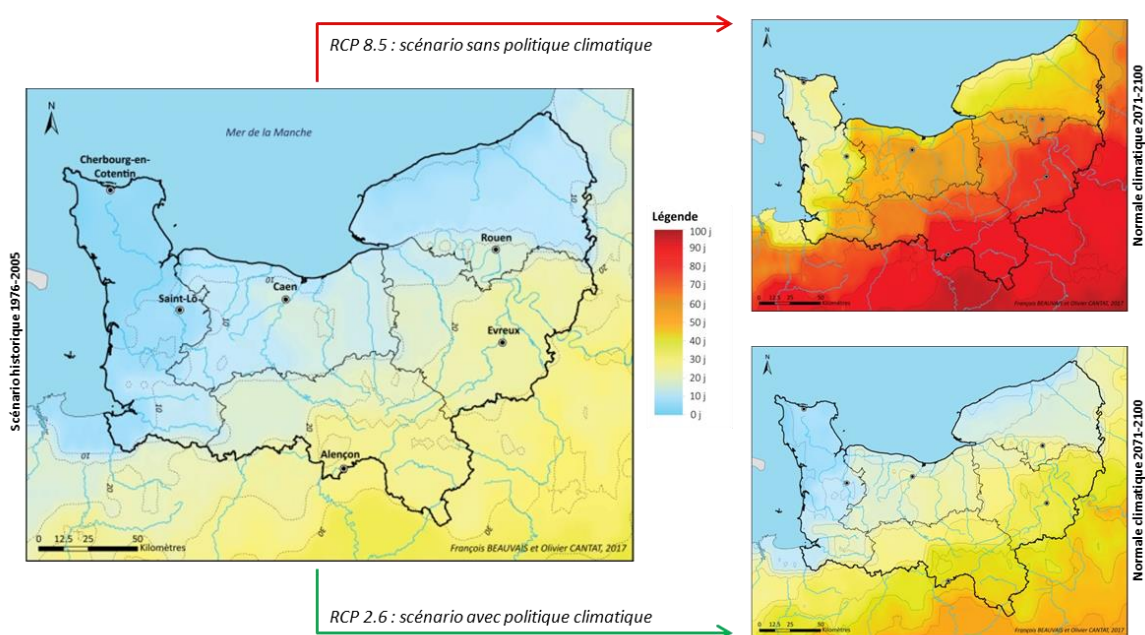


Figure 9. Evolution de la température moyenne annuelle de 1950 à 2100 à partir des données CNRM-2014 pour un scénario historique (période passée) et trois scénarios RCP (période future) pour : a) Caen ; b) Evreux. *Evolution of the average annual temperature from 1950 to 2018 based on CNRM-2014 data for a historical scenario (past period) and three RCP scenarios (future period) for: a) Caen; b) Evreux.*

Le réchauffement serait plus important à l'intérieur des terres. Avec le scénario RCP 8.5, la température moyenne annuelle d'Evreux (passant de 10,3 à 14,3°C) deviendrait alors supérieure à celle de Caen (passant de 10,6 à 14°C). C'est surtout après 2050 que les évolutions climatiques diffèrent entre les scénarios. Le nombre annuel de jours de chaleur passerait ainsi de 14 à 57 jours dans le Calvados et de 23 à 78 jours dans l'Eure (figure 10). Sur les seuls mois de juin et de juillet, correspondant à la période actuelle de remplissage des grains du blé, ces jours de chaleur augmenteraient de 6 à 21 jours dans le premier département et de 9 à 32 jours dans le second.



Réalisation : François BEAUVAIS, Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, 2017. Dans le cadre du Profil Environnemental de la DREAL Normandie (données « Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL », simulations CNRM-2014)

Figure 10. Comparaison du nombre de jours de chaleur annuel ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) sur la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100. *Comparison of the number of yearly heat days ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) over reference period 1976-2005 with IPCC prospective scenarios RCP 2.6 and 8.5 for 2100.*

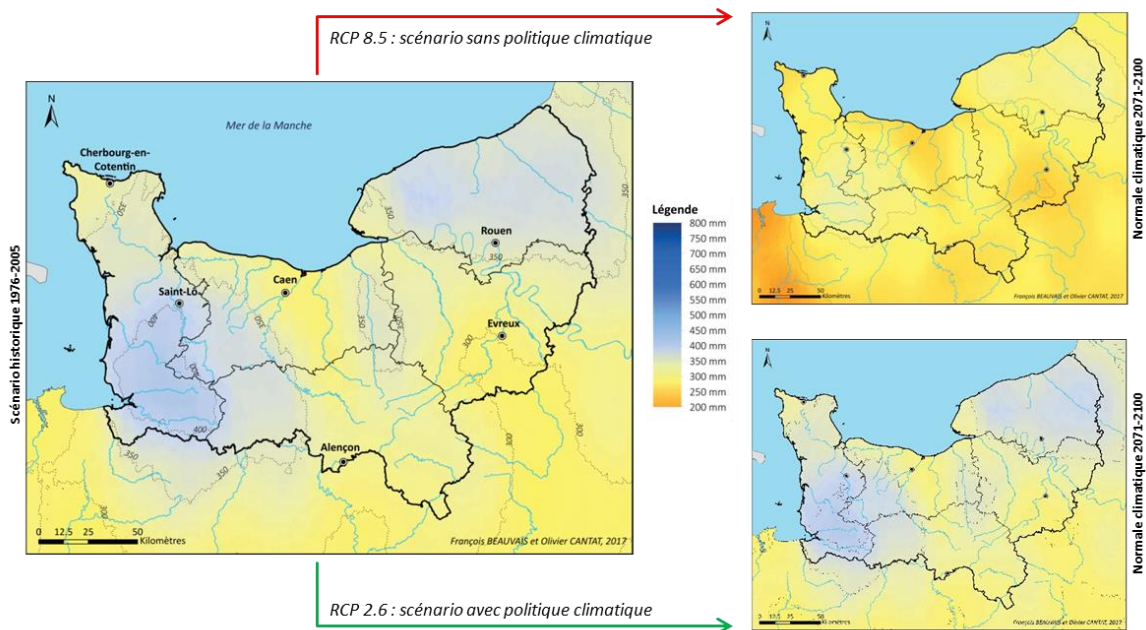
Dans le même temps, le cumul pluviométrique annuel diminuerait de 13 % dans le secteur de Caen et de 10 % dans celui d'Evreux, et cela de façon plus prononcée sur la période végétative (avec respectivement -19 et -17 % ; figure 11). La baisse serait moins marquée au printemps (-12 et -5 %) qu'en été (-30 %), alors même que les deux régions agricoles étudiées se trouvent déjà dans les zones les moins arrosées de la région.

Ainsi, le constat actuel relatif aux rendements agricoles et aux projections climatiques donnent des perspectives inquiétantes pour la culture du blé tendre au 21^{ème} siècle en Normandie. Toutefois, l'élévation de la température engendrant une plus grande précocité des stades phénologiques, il convient d'intégrer ce paramètre végétal afin de savoir s'il permet de contrer l'accentuation des jours de chaleur et du déficit hydrique de l'été.

1.3. Méthode d'analyse phénoclimatique

La phénologie est ici simulée à partir du concept de degré-jour. 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 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.



Réalisation : François BEAUVAIS, Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen GEOPHEN, UMR 6554 CNRS, 2017. Dans le cadre du Profil Environnemental de la DREAL Normandie (données « Drias, données Météo-France, CERFACS, IPSL », simulations CNRM-2014)

Figure 11. Comparaison du cumul de précipitations entre avril et septembre « saison végétal » de la période de référence 1976-2005 avec les scénarios prospectifs du GIEC RCP 2.6 et RCP 8.5 à l'horizon 2100. *Comparison of total rainfall between April and September « growing season » over reference period 1976-2005 with IPCC prospective scenarios RCP 2.6 and 8.5 for 2100.*

Les sommes de températures retenues sont celles exposées par Philippe Gate (2005), en prenant les valeurs les plus hautes correspondant avec ce qui peut être observé au champ pour une variété tardive de blé (figure 12). Elles sont également proches de celles exposées par l'*Agriculture and Horticulture Development Board* (AHDB) en Angleterre (2008). En lien avec les préconisations Arvalis¹⁴ et une enquête réalisée en 2016 (Beauvais, 2016), les simulations sont produites pour un semis le 15 octobre dans le Calvados et le 1^{er} octobre dans l'Eure.

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 (Agroparistech, 2003 ; Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, *comm. pers.*¹⁵). Des indicateurs phéno-climatiques sont associés à ces différentes phases de développement végétal et leur occurrence fait appel à de possibles impacts sur la production agricole. L'étude de l'effet du climat sur la culture en tenant compte de la phénologie (Holzkämper *et al.*, 2013) et de sa variabilité interannuelle est plus précise que

¹⁴ 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/>). Cet établissement publie chaque année des préconisations régionales (synthèse des essais, dates de semis, caractéristiques des variétés, lutte contre les maladies et ravageurs). Sur le site internet, un outil d'aide à la décision est disponible pour le choix des variétés selon le lieu, la date de semis et le type de sol (<https://choix-des-varietes.arvalis-infos.fr/bletendre/>).

¹⁵ Les premiers résultats (sans prise en compte de la photopériode) ont été présentés au Groupe Normand Agriculture et Changement Climatique (septembre 2018). Un conseiller agricole a attiré notre attention sur l'intérêt de prendre en compte le fait que le blé ne peut entamer sa montaison avant la sortie de l'hiver (météorologique).

lorsque les indicateurs agroclimatiques sont utilisés pour des dates invariantes (Caubel *et al.*, 2015). Le réchauffement climatique provoquant une avancée de la phénologie des végétaux et en constituant un bio-indicateur (Rezaei *et al.*, 2018), cette méthode apparaît appropriée. Plusieurs travaux récents l'ont déjà utilisée pour le blé ou le maïs : Lecomte, 2005 ; Gate *et al.*, 2008 ; Prost, 2008 ; Mkhabela *et al.*, 2010 ; Gouache *et al.*, 2012 ; Holzkämper *et al.*, 2011, 2013, 2015 ; Caubel *et al.*, 2015 ; Urruty, 2017.

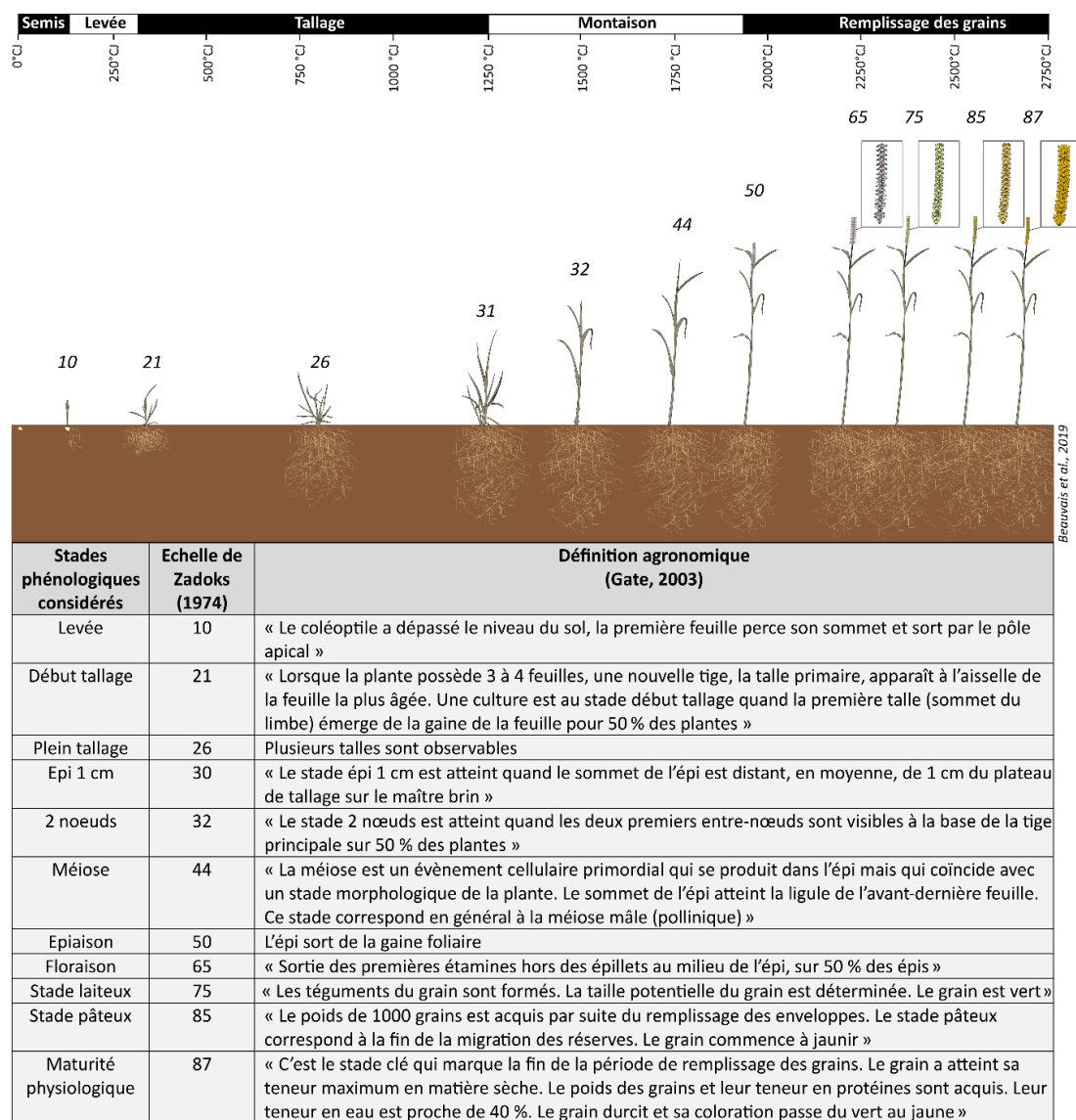


Figure 12. Le cycle du blé tendre : les stades phénologiques étudiés et leur définition. *Soft wheat cycle: growth stages studied and their definition.*

Plusieurs indicateurs sont retenus (tableau 1). Les conséquences associées à leur évolution ou au dépassement de seuils peuvent engendrer des pertes de production parfois importantes au cours du cycle. Le manque d'eau pour le végétal est estimé à partir d'un bilan hydrique journalier à 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. La demande climatique est celle du blé tendre (ETM, évapotranspiration maximale) déterminée par le jeu de coefficients cultureux (Doorenbos et Pruitt, 1975 ; de 0,1 à la levée à 1,15 à la floraison et 0,5 à la maturité physiologique, d'après Arvalis, 2014), multipliés par l'évapotranspiration potentielle, variant selon les périodes phénologiques, comme exposé par Allen *et al.* (1998). Lorsque l'eau disponible est inférieure

à l'ETM, alors un déficit hydrique est présent. L'évapotranspiration potentielle est calculée avec la formule de Turc (1961) car tous les paramètres climatiques nécessaires au calcul de la formule de Penman (Montheith, 1965), plus précise, ne sont pas disponibles en sortie de la simulation CNRM-2014.

Variabiles	Indicateurs étudiés	Période phénologique, échelle de Zadock <i>et al.</i> , 1974	Conséquences	Sources
Gelées et basses températures	Tn -5	Levée (0-09)	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 <i>et al.</i> , 2010
Fortes températures	Tx 25	Méiose à maturité (39-92)	Avortement de fleurs (méiose - floraison) Impact sur le remplissage des grains (dés épiaison) Photosynthèse affectée	Gate, 1995 Gate, 1995 Acevedo <i>et al.</i> , 2002
	Tx 30	Méiose J-6 à J+6 (39); Floraison J-3 à J-1 (65)	Déficit de fécondation	Saini et Aspinall, 1982 ; Tashiro et Wardlaw, 1990
Manque d'eau	Déficit hydrique	Totalité du cycle (0-92)	Réduction de l'activité synthétique et de l'assimilation du CO2 (fermeture des stomates) Impact sur le remplissage des grains	Gate, 1995 Gate, 1995
Déficit de rayonnement	RG200	Méiose J-6 à J+6 (39)	Déficit de fécondation	Gate, 1995
	RG	Montaison : épi 1 cm - floraison (30-65)	Impact sur la croissance	Gate, 1995
Déficit de vernalisation	Déficit de T [3°C-10°C]	Tallage (21-30)	Déficit de floraison La montaison ne débute pas si le besoin en vernalisation n'est pas obtenu	Gate, 1995 Mossad <i>et al.</i> , 1995
Durée du cycle	Nombre de jours	Totalité du cycle	Réduction de la durée d'accumulation de biomasse	Fisher et Maurer, 1976 ; Holzkamper <i>et al.</i> , 2015

Tableau 1. Synthèse d'indicateurs phénoclimatiques étudiés (avec Tn : température minimale °C ; Tx : température maximale °C ; T : température moyenne ; RG : rayonnement solaire global cal/cm² ; sources incluses dans le tableau). *Synthesis of studied phenoclimatic indicators (with Tn: minimal temperature °C; Tx: maximal temperature; T: average temperature; RG: solar radiation cal/cm²; sources included in table).*

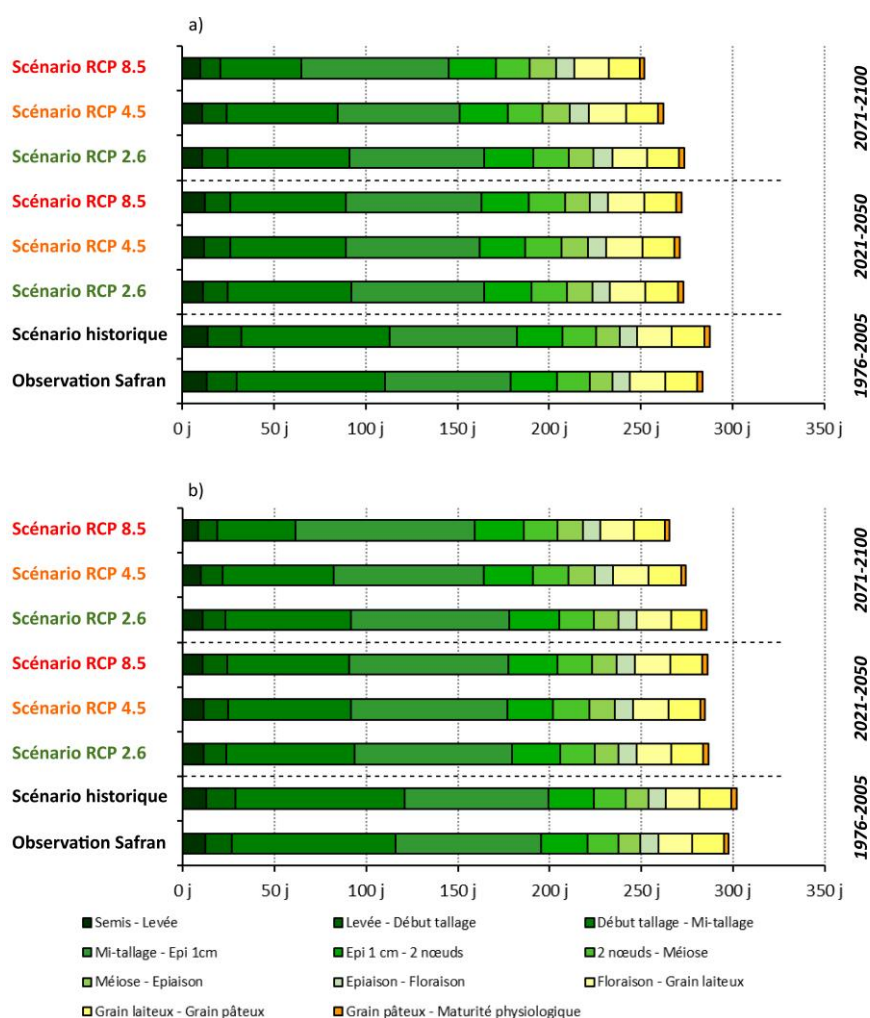
La capacité de rétention en eau du sol est une variable essentielle pour le bilan hydrique (Cantat *et al.*, 2009). Pour l'estimer, des types de sols représentatifs de la couverture pédologique rencontrée dans les deux plaines agricoles considérées ont été généralisés à partir

des travaux de Delahaye et Le Gouée (2008) et de l'expertise du conservatoire d'Espace Naturels Normandie Seine¹⁶. En appliquant les règles de pédotransfert (Bouma, 1989) par classe texturale (Jamagne *et al.*, 1977, d'après le service cartographie des sols de l'Aisne), et en tenant compte de la profondeur d'exploration racinaire du blé (maximum de 110 cm pour un sol limoneux non limité par son épaisseur ; d'après Gate, 1995), les RUM (Réservoir Utilisable Maximal) sont de 203 mm au nord de Caen et d'Evreux, 44 mm au Sud de Caen et 114 mm au Sud d'Evreux.

2. Résultats

2.1. Avancée des stades phénologiques et réduction de la durée des cycles

Le premier constat est une nette anticipation des stades phénologiques, liée à l'élévation de la température (figure 13).



Beauvais *et al.*, 2019 (d'après les données CNRM-2014 et SAFRAN).

Nb : Simulation des stades phénologiques à partir du concept de degré-jours et prise en compte d'une photo période de 11 heures pour l'apparition de la montaison ; semis le 15/10 à Caen (a) et le 01/10 à Evreux (b).

Figure 13. Evolution de la durée des périodes phénologiques du blé de 1950 à 2100 à partir des données CNRM-2014 pour un scénario historique (période passée) et trois scénarios RCP (période future) pour : a) Caen ; b) Evreux. *Evolution of soft wheat growth stages duration in Caen from 1950 to 2100 based on CNRM-2014 data for a historical scenario (past period) and three RCP (future period).*

¹⁶ Communication personnelle d'Aurélien Noraz, pédologue, chargé de missions au CEN Haute-Normandie, en charge du Référentiel Régional Pédologique de Basse et Haute Normandie.

A l'horizon 2050, le cycle de la culture serait raccourci d'environ deux semaines pour les trois scénarios RCP. La maturité physiologique serait atteinte, non plus vers le 28 juillet mais autour de la mi-juillet sur les deux sites. Mais c'est à la fin du 21^{ème} siècle que les changements seraient les plus prononcés. Ainsi, à l'horizon 2100, pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5, l'avance serait de l'ordre de 4 et 5 semaines pour arriver à maturité physiologique (date atteinte respectivement le 1^{er} juillet et le 23 juin pour Caen et Evreux). La montaison débiterait un mois plus tôt (au début du mois de mars alors que sur la Normale de référence elle commence au début du mois d'avril). Cette précocité est d'ailleurs observée ces dernières années avec un stade épi 1 cm dès la fin du mois de mars, voire mi-mars comme en 2016. La floraison, se déroulerait en seconde quinzaine du mois de mai. La réduction de la durée du cycle concernerait essentiellement les périodes de levée et de tallage. Les périodes suivantes (montaison et remplissage des grains) arrivant plus tôt dans l'année, le blé ne recevrait pas plus de chaleur qu'en période de référence, leur durée reste alors équivalente.

Ainsi, la modification de la durée des cycles végétatifs justifie l'emploi des indicateurs phénoclimatiques. Compte tenu de l'avancée de la phénologie dans le calendrier, l'exposition aux impacts climatiques pourrait en être modifiée.

2.2. Déficit hydrique et échaudage thermique

L'anticipation des stades phénologiques permettrait d'éviter les deux impacts les plus redoutés pour le blé, à savoir la sécheresse et l'échaudage thermique, alors même que le climat deviendrait plus chaud et plus sec au printemps et en été (figure 14).

2.2.1. Le déficit hydrique cumulé

En période de référence, le déficit hydrique cumulé au cours du cycle est estimé à environ 60 mm pour les sols épais au nord de Caen et d'Evreux (figure 14A et C), 90 mm pour les sols d'épaisseur moyenne (sud d'Evreux) et 125 mm pour les sols minces en plaine sud de Caen (figure 14B). A court 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. A la fin du siècle, le constat est le même pour les RCP 4.5 et 8.5 puisque les déficits seraient voisins de 50 mm pour les sols épais, 75 mm pour les sols moyens et 110 mm pour les sols minces. 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, excepté pour le RCP 8.5 en période proche et lointaine où elle serait moins prononcée.

2.2.2. Les situations échaudantes

A Evreux, dans le cadre d'un climat normand légèrement continentalisé, les situations échaudantes entre la méiose et la maturité physiologique sont actuellement un peu plus nombreuses qu'à Caen¹⁷ (8 jours contre 5) (figures 14F et E). En futur proche, avec l'avancée des stades phénologiques, ces situations à risques verraient leur nombre diminuer de 1,5 jour à 2,1 jours dans l'Eure pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5, et d'un peu moins de 1 jour dans le

¹⁷ La différence entre les deux sites serait plus prononcée dans le cas d'une même date de semis puisque le cycle du blé est plus long à Evreux compte-tenu des hivers plus rudes.

Calvados. Pour le scénario RCP 4.5 à l'horizon 2100, à Evreux, l'échaudage resterait équivalent à la période 2021-2050, alors qu'à Caen, leur cumul reviendrait à hauteur de la période de référence, comme pour le RCP 2.6. En revanche, si la température augmente fortement mais que la précocité des stades phénologiques est limitée par la photopériode à l'entame de la montaison, cette combinaison ne permettrait plus d'éviter la hausse de l'échaudage (+ 2,2 jours à Caen et + 1,8 jour à Evreux).

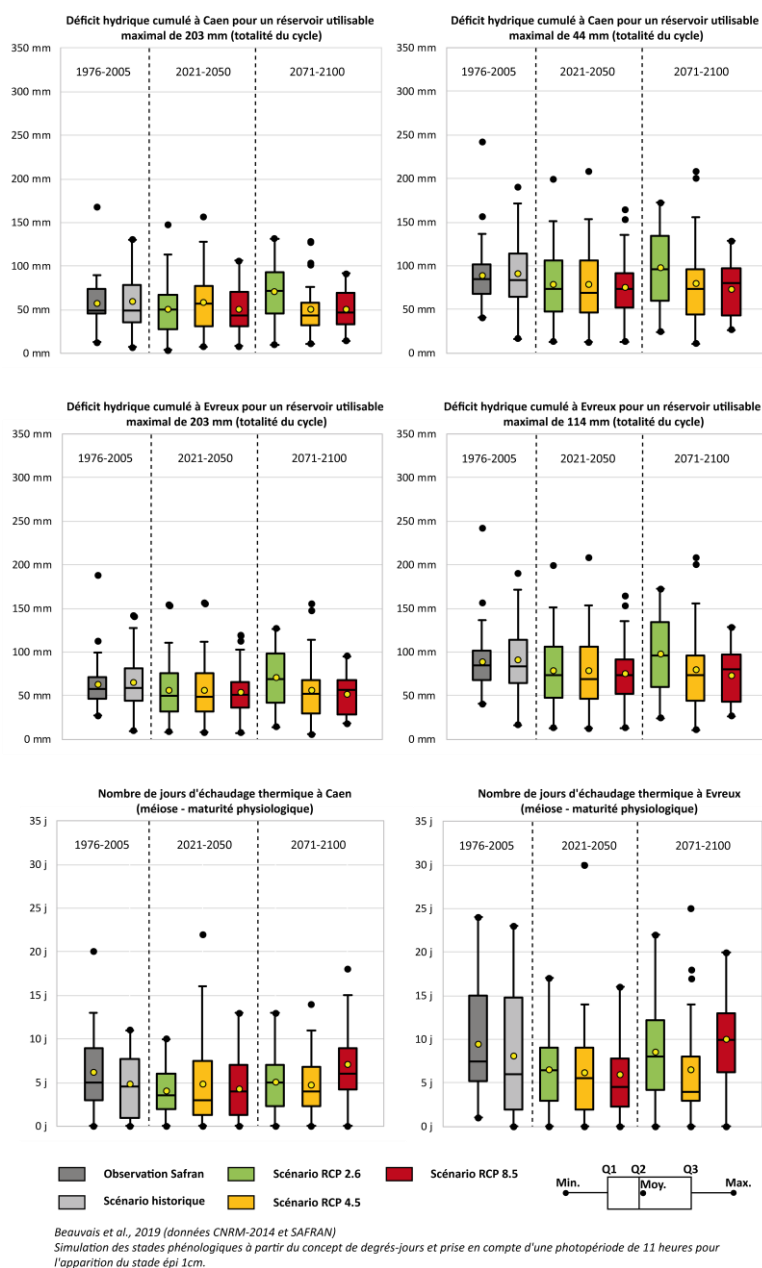


Figure 14. Evolution du déficit hydrique et de l'échaudage thermique du blé à Caen et Evreux de 1950 à 2100 à partir des données CNRM-2014 pour un scénario historique (période passée) et trois scénarios RCP (période future). *Evolution of the water deficit and thermal scalding of wheat in Caen and Evreux from 1950 to 2100 based on CNRM-2014 data for a historical scenario (past period) and three RCP scenarios (future period).*

Ajoutons à ces éléments que la variabilité interannuelle est particulièrement importante à prendre en compte. Si le cycle se termine habituellement avant les chaleurs de l'été, la concomitance d'années à cycle retardé par une température inférieure à la normale au long du cycle et l'apparition d'une vague de chaleur précoce est possible. Elle pourrait augmenter dans le Calvados avec les scénarios RCP 4.5 en 2021-2050 et RCP 8.5 en 2071-2100.

Outre l'échaudage, le blé est sensible aux excès thermiques (température supérieure ou égale à 30°C) à la méiose et la floraison. Cet aléa n'est pas recensé en période de référence et il en serait de même à l'avenir à partir des simulations et des points de grille retenus pour cette étude.

2.3. Une diminution des gelées

Les risques de gel à -20°C durant le tallage, à -5°C lors de la levée, à -4°C au début de la montaison et à 0°C pendant la floraison ne sont pas présents en Plaine de Caen et en Plaine d'Evreux. En revanche, la température peut ponctuellement descendre à -10°C l'hiver, ce qui peut affecter les blés non endurcis¹⁸. Sur la période actuelle, le risque est estimé à 7 années sur 30 en Plaine de Caen (maximum de 3 jours) et à 12 sur 30 (maximum de 6 jours à deux reprises) en Plaine d'Evreux. A l'horizon 2050, l'occurrence diminuerait autour de 2 à 3 années sur 30 à Caen et de 5 à 7 années sur 30 à Evreux. A l'horizon 2100, pour le scénario RCP 2.6, le nombre d'années concernées serait proche du bilan effectué pour le futur proche. Dans le cas du scénario RCP 4.5, le risque est faible (1 année à Caen et 3 sur 30 à Evreux) tandis qu'il serait inexistant en Plaine de Caen avec le scénario RCP 8.5 et présent une seule année sur 30 en Plaine d'Evreux.

Sans surprise, l'élévation de la température hivernale engendrerait une diminution des gelées hivernales et donc du risque de nécrose foliaire 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.

2.4. Exposition aux basses températures durant la méiose pollinique

Sur la période de référence 1976-2005, à Caen 5 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 3 jours dans l'année). A Evreux, l'occurrence est de 6 années sur 30 (maximum de 4 jours dans l'année). Cette exposition aux basses températures durant la méiose se renforcerait légèrement dans le futur proche dans le Calvados, avec entre 6 et 8 années sur 30 dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5, alors qu'avec le scénario RCP 2.6 la situation resterait inchangée. Dans l'Eure, la vulnérabilité augmenterait plus fortement, avec entre 10 et 11 années sur 30. A la fin du 21^{ème} siècle, la vulnérabilité augmenterait encore un peu sur Caen (entre 7 et 9 années sur 30), comme à Evreux (entre 11 et 12 années sur 30).

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.

2.5. Déficit de rayonnement solaire en début de montaison¹⁹

L'avancée des stades phénologiques pourrait également engendrer une diminution du rayonnement solaire cumulé²⁰ lors des périodes phénologiques épi 1 cm – 2 nœuds et 2 nœuds

¹⁸ Pour qu'un blé soit endurci, celui-ci doit enregistrer une période d'environ quatre semaines avec des températures inférieures à 10-15°C et plus elles se rapprochent de 0°C, plus l'endurcissement est conséquent (Arvalis, cf. site internet).

¹⁹ En 2016, les faibles rendements s'expliquent aussi par un manque de rayonnement au printemps, démontrant la dépendance de la plante à cette variable climatique. Toutefois, ce déficit ne concernait pas le début de la montaison. Si le stade épi 1 cm est arrivé précocement (mi-mars), le stade 2 nœuds est quant à lui arrivé plus tard puisque la durée de la période était supérieure à la normale, laissant ainsi au blé le temps de cumuler un rayonnement suffisant. Le déficit était concentré autour de la floraison.

²⁰ Les conséquences sont les mêmes qu'avec les basses températures durant la méiose pollinique.

– méiose de la montaison (tableau 2), alors même que le rayonnement solaire annuel augmenterait avec le changement climatique.

Lieux	Période climatique	Epi 1 cm - 2 nœuds	2 nœuds - Méiose	Méiose - Epiaison	Epiaison - Floraison	Floraison - Grain laiteux
Caen	1976-2005 Observation SAFRAN	8112	6454	5200	3982	7956
	1976-2005 Scénario historique	8257	6887	5276	4259	8226
	2021-2050 Scénario RCP 2.6	6995	6625	5430	4275	9506
	2021-2050 Scénario RCP 4.5	6331	6437	5863	4831	9191
	2021-2050 Scénario RCP 8.5	6665	6941	5581	4301	8659
	2071-2100 Scénario RCP 2.6	7017	7085	5894	4761	9933
	2071-2100 Scénario RCP 4.5	5594	5569	5851	4409	9319
	2071-2100 Scénario RCP 8.5	4967	5229	5141	4058	8307
Evreux	1976-2005 Observation SAFRAN	8452	6513	5087	4269	8044
	1976-2005 Scénario historique	8840	6858	5275	4279	8364
	2021-2050 Scénario RCP 2.6	7778	6807	5281	4470	9353
	2021-2050 Scénario RCP 4.5	6859	6948	5653	4871	8757
	2021-2050 Scénario RCP 8.5	7284	7229	5421	4422	8481
	2071-2100 Scénario RCP 2.6	7440	7443	5890	4945	9813
	2071-2100 Scénario RCP 4.5	6259	5974	5846	4143	9110
	2071-2100 Scénario RCP 8.5	5559	5731	5133	4041	8189

Tableau 2. Evolution du rayonnement (cal/cm^2) cumulé entre le stade épi 1 cm et le grain laiteux du blé à Caen et Evreux de 1976 à 2100, à partir des données CNRM-2014 pour un scénario historique (période passée) et trois scénarios RCP (période future). *Evolution of cumulative solar radiation (cal/cm^2) for wheat between stem elongation and development of fruit (early milk) in Caen and Evreux from 1976 to 2100, based on CNRM-2014 data for a historical scenario (past period) and three RCP scenarios (future period).*

A mesure que la température hivernale s'élève, le stade épi 1 cm arrive plus tôt, en sortie d'hiver pour les scénarios les plus chauds, moment de l'année durant lequel le rayonnement n'est pas aussi élevé qu'au printemps (jours plus courts et soleil plus bas²¹).

En conséquence, à très brève échéance (2021-2050), le rayonnement cumulé pourrait diminuer pour la période épi 1 cm – 2 nœuds et cette baisse concernerait les trois scénarios. A titre d'exemple, il passerait en Plaine de Caen de 8257 cal/cm^2 à 6995 cal/cm^2 avec le scénario RCP 2.6 ; à 6331 cal/cm^2 avec le scénario RCP 4.5, et à 6665 cal/cm^2 avec le scénario RCP 8.5. Le même constat est effectué pour Evreux (8840 cal/cm^2 vs respectivement 7778, 6859 et 7284 cal/cm^2). Pour la période phénologique 2 nœuds – méiose, un « rattrapage » s'opère avec un rayonnement cumulé qui resterait proche de la période de référence (entre 6500 et 7000 cal/cm^2 environ) pour les deux sites, voire en très légère augmentation pour le scénario RCP 8.5 à Evreux (+5 %).

A long terme (2071-2100), le manque de rayonnement concernerait les périodes épi 1 cm – 2 nœuds et 2 nœuds – méiose (tableau 2). Il serait très prononcé dans le cas des scénarios RCP 4.5 et 8.5. A Caen, ce déficit serait respectivement de 32 % (5594 cal/cm^2) et 40 % (4967 cal/cm^2), et à Evreux de 29 % (6259 cal/cm^2) et 37 % (5559 cal/cm^2). Au final, le début

²¹ A la latitude de la Normandie, la durée astronomique du jour et la hauteur du soleil à midi sont : 1^{er} février (9,0 h de jour et 16,9° d'élévation solaire au-dessus de l'horizon) ; 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°).

de la montaison arriverait donc trop tôt dans l'année pour profiter de la hausse globale du rayonnement solaire²².

La situation est plus complexe pour les périodes phénologiques méiose-épiaison, épiaison-floraison et floraison-grain laiteux. Pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5, on observerait sur la durée un rattrapage du déficit d'énergie solaire, celle-ci devenant même supérieur à l'actuelle (tableau 2). Pour le scénario RCP 8.5, l'avancement des stades phénologiques serait en revanche trop important pour permettre un gain de rayonnement entre la méiose et la floraison.

Enfin, rappelons que le rayonnement solaire est également important sur la période proche de la méiose (voir tableau 1). Sur la période actuelle, presque toutes les années connaissent au moins une journée avec un cumul inférieur à 200 cal/cm². Cette situation peut atteindre 5 à 6 occurrences dans les deux sites durant les années les plus défavorables. En moyenne, on dénombre 2,4 jours à Caen et 2 jours à Evreux.

A l'horizon 2050 comme à l'horizon 2100, malgré l'avancement du cycle végétal, il n'y aurait pas d'augmentation du nombre de jours où le cumul de rayonnement est sous ce seuil. Par ailleurs, la concomitance entre basse température et faible rayonnement – qui augmente le risque de stérilité – n'interviendrait pas dans le Calvados et pourrait se produire très occasionnellement dans l'Eure : une occurrence pour le RCP 2.6 sur le court et le long terme, et une avec le RCP 8.5 à long terme. Le risque de rencontrer la combinaison froid/déficit de rayonnement solaire, serait faible dans le futur. Ceci peut s'expliquer par le fait que les basses températures à cette saison correspondent souvent à des types de temps clairs et calmes et que ces conditions favorables au refroidissement nocturne permettent au contraire en journée une bonne progression de la température (forte amplitude diurne).

2.6. Déficit de vernalisation²³

Les variétés d'hiver ont besoin d'environ 60 jours de vernalisation (Arvalis, site internet). Actuellement, le nombre moyen de jours disponibles durant le tallage est de l'ordre de 100 jours à Caen comme à Evreux d'après les données SAFRAN, et un peu moins dans la simulation CNRM-2014 correspondant à cette même période (figure 15).

A l'horizon 2050, ce total diminuerait d'une dizaine de jours, pour être voisin de 90 unités par an pour les deux sites, quels que soient les scénarios RCP. Pour la fin du 21^{ème} siècle, on n'observerait pas d'évolution significative avec le scénario « optimiste » RCP 2.6 (autour de 90 jours par an) mais en revanche, un décrochage important pour le scénario « pessimiste » RCP 8.5 (autour de 60 jours à Caen et de 70 jours à Evreux). Le scénario RCP 4.5 propose une situation intermédiaire (autour de 75 jours à Caen et de 85 jours à Evreux).

Au-delà des valeurs moyennes, la capacité des plantes à fleurir puis produire des graines dépendant de la vernalisation de l'hiver précédant chaque saison végétative, il convient de s'intéresser année après année aux séries simulées sur chacune des normales actuelles et à venir pour évaluer le risque lié à une absence de froid durable.

²² Pour le scénario RCP 2.6, les résultats sont moins tranchés sur le futur lointain : à Caen, on observerait une perte de -15 % sur le premier stade mais une augmentation de +3 % pour le second. On retrouve les mêmes ordres de grandeur pour Evreux avec respectivement -16 % et +8 %.

²³ La vernalisation correspond à une « transformation physiologique, due à une assez longue période de basses températures, nécessaire aux plantes bisannuelles et annuelles d'hiver pour qu'elles se développent complètement. » <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vernalisation/81593>

A noter que le processus de vernalisation « requiert des températures optimales comprises entre 3 et 10°C (températures moyennes journalières). En dehors de cette fourchette, il est ralenti, voire stoppé, si les températures descendent en-dessous de -4°C ou excèdent 17°C. » (Arvalis, site internet).

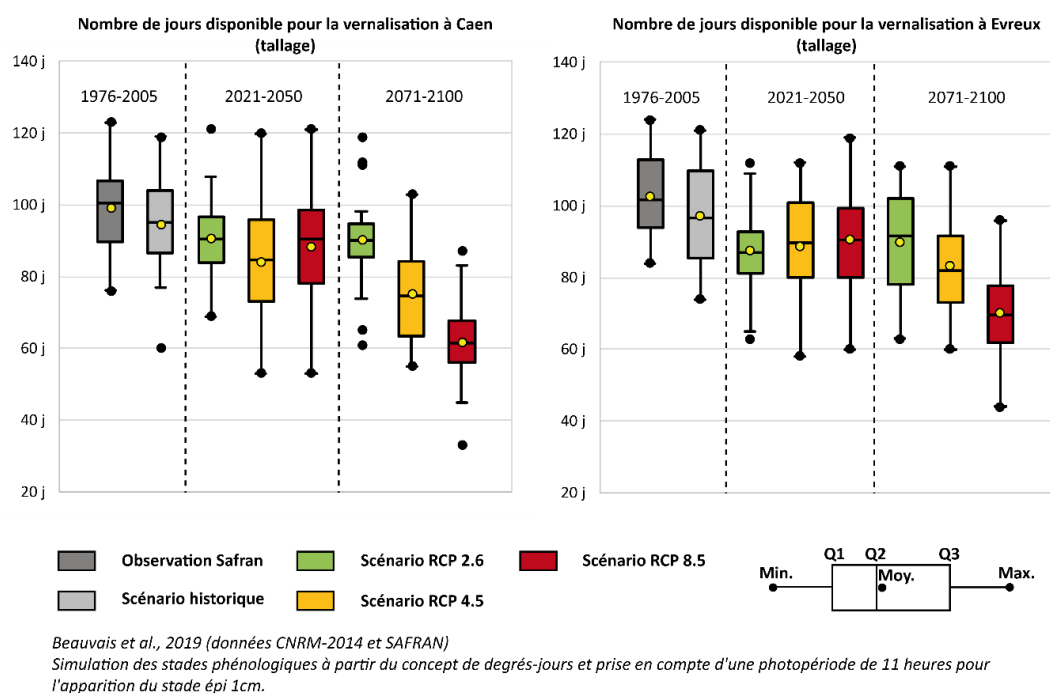


Figure 15. Evolution du nombre de jours de vernalisation du blé tendre en Normandie au XXIème siècle (point de grille de Caen, à gauche ; point de grille d'Evreux, à droite). *Evolution of the number of vernalization days of soft wheat in Normandy in the 21st century (Caen grid point on the left, Evreux grid point on the right).*

Pour une variété de blé identique à l'actuelle, des valeurs proches du besoin en froid minimum (60 jours) constitueraient un risque potentiel fort 1 année sur 10 dans l'Eure et plus encore dans le Calvados dont le climat est moins soumis aux basses températures. Dans le cadre du réchauffement le plus marqué (environ $+4^{\circ}\text{C}$), le RCP 8.5 apparaît logiquement le plus défavorable. Dans le Calvados, 13 années sur 30 auraient un total inférieur à 60 jours. Du fait de sa continentalité qui favorise davantage le froid en hiver, l'Eure serait moins affectée (2 années sur 30).

Ainsi, en Plaine de Caen, le changement climatique pourrait engendrer une situation moyenne à la fin du 21^{ème} siècle équivalente aux moins bonnes années vernalisantes que l'on connaît actuellement, remettant en cause le développement du blé. En Plaine d'Evreux, l'évolution est identique mais le niveau de froid plus élevé préserverait davantage la capacité du blé à vernaliser.

3. Discussion et perspectives

3.1. Mesures expérimentales de terrain pour conforter la méthode

Afin de tenir compte de la réalité *in situ*, une parcelle en Plaine de Caen a fait l'objet d'une instrumentation sur le cycle 2018-2019, avec un suivi phénologique, pédologique et climatique simultané.

Les sommes de températures analysées dans cet article sont celles relevées dans la bibliographie et correspondent à une variété tardive. Or, elles peuvent varier selon la région, la date de semis et la variété. Par conséquent afin d'obtenir une donnée écophysologique concrète et propre au terrain d'étude, les différents stades de la culture ont été relevés au champ. Les degrés jours correspondant permettent ensuite de projeter cette parcelle dans le futur.

Par ailleurs, 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 (cf. références dans l'introduction), il apparaît nécessaire d'en estimer les limites. C'est pourquoi une fosse pédologique a été ouverte selon le protocole RMQS2 (Cousin *et al.*, 2015 ; Jolivet *et al.*, 2018). Les relevés de teneurs en eau (sondages à l'aide d'une tarière à gouge) entre la fin du stade 2 nœuds et la fin du stade grain pâteux permettent de retrouver une valeur de réserve utile comparée à celle obtenue à la même date avec le bilan hydrique. Ensuite, une réflexion sera opérée pour intégrer le principe d'un bilan hydrique en plusieurs réservoirs (Jacquart et Choïnel, 1995) qui pourrait être 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.

Aussi, d'après une enquête de terrain réalisée en 2016 (Beauvais, 2016), plusieurs exploitants en Plaine de Caen constatent des différences de l'évolution de la phénologie selon la proximité ou non du littoral puisque la partie septentrionale est davantage sous l'influence de la Manche. D'ailleurs, la température de l'air, élément principal agissant sur le développement de la plante, peut varier en quelques hectomètres²⁴. Ce constat pourrait être plus tranché là où la dénivellation est plus importante avec des creux topographiques plus exposés au froid l'hiver lors des types de temps clairs et calme et à l'accumulation de chaleur l'été à l'abri du vent (Cantat, 2015b).

La variabilité spatiale du climat engendrée par les facteurs locaux (topographie, occupation du sol, position géographique, ...) pourrait être intégrée aux projections climatiques en corrigeant les données sorties des modèles par l'intermédiaire d'une nouvelle descente d'échelle et/ou en les corrigeant avec les observations de terrain. L'échelle d'analyse s'effectuerait alors entre le topoclimat du plateau et les microclimats des petites vallées où la rupture de pente est marquée. Il conviendra alors à l'avenir de développer le suivi de parcelles en différents points géographiques afin de comparer l'effet du climat local sur la phénologie ou encore des différences pédologiques. En effet, si les sols présentent des contrastes entre le nord et le sud de Caen (Delahaye et Le Gouée, 2008 ; Sarda *et al.*, 2013), ces-derniers peuvent s'exprimer au sein même de la parcelle et constituer un facteur limitant au rendement où la couverture pédologique est la plus mince.

3.2. La correction des données issues des modèles climatiques

Un biais froid est constaté dans les données CNRM-2014 en période de référence. Ce constat est également fait par Dubreuil *et al.* (2018 et 2019) pour la Bretagne. Il correspond à une sous-estimation de la température post-rupture de 1987 (figure 5). Ainsi l'écart entre la donnée CNRM-2014 avec la station de Caen-Carpique est de $-0,7^{\circ}\text{C}$, constat qui, dans une moindre mesure, est également fait avec les données SAFRAN ($-0,3^{\circ}\text{C}$). En conséquence, la simulation de la durée du cycle est surestimée de 4 jours par rapport à celle effectuée à partir des données SAFRAN et de 7 à 8 jours vis-à-vis des données des stations Caen-Carpique et Evreux-Huest. Il serait donc pertinent de réajuster ces données, notamment pour l'étude de la sensibilité d'un stade phénologique qui s'effectue sur une courte période, comme c'est le cas pour les basses températures durant les jours qui entourent la méiose. De plus, la rectification de ces données permettrait de les comparer avec des années « vraies » évocatrices de pertes de production pour la filière agricole, plutôt qu'au maximum du scénario historique modélisé. C'est le cas par exemple de l'année 1976 où une profonde sécheresse associée à une vague de chaleur durable (282 mm de déficit hydrique en sol mince et 20 jours d'échaudage thermique dénombrés à

²⁴ Observations personnelles issues de campagnes de mesures expérimentales (non publiées).

Caen) a provoqué des dégâts importants sur les cultures. Une méthode de correction est envisagée : déterminer l'écart entre l'observation et le scénario historique en fonction de différents types de temps sur chaque saison de l'année, ou bien s'attacher à la différence constatée pour chaque mois de l'année comme Dubreuil *et al.*, (2019). Ces différentes propositions seront prochainement testées et comparées (travaux en cours).

Les modèles climatiques sont enclins à des incertitudes (Guillemot, 2009 ; Crétat *et al.*, 2011 ; Dobler *et al.*, 2012 ; Richard *et al.*, 2012 ; Hingray et Saïd, 2014). Il serait intéressant de dupliquer l'étude pour des données provenant d'autres modélisations afin de se prémunir des incertitudes épistémiques. Ce travail pourrait aussi s'appuyer sur les données IPSL-2014 ou encore EUROCORDEX afin de produire des simulations régionales (Vautard *et al.*, 2013 ; Jacob *et al.*, 2014 ; Kotlarski *et al.*, 2014) forcés par les modèles globaux du projet CMIP5 (Ouzeau *et al.*, 2014). Néanmoins, tous les indicateurs climatiques ne pourront être étudiés puisque le rayonnement, utile au calcul de l'évapotranspiration n'est pas disponible sur ces simulations.

3.3. Le recours au modèle de culture : intégrer la physiologie du végétal et estimer un potentiel de rendement

D'après certains exploitants agricoles (*comm. pers.*, 2016 et 2019), le stade épi 1 cm ne serait pas systématiquement limité par la durée du jour. D'ailleurs, d'après les résultats de Philippe Gate (2009), le stade épi 1 cm est simulé entre le 10 et le 22 février selon les régions françaises, soit bien avant la sortie de l'hiver et un allongement suffisant de la durée du jour. Dans ce cas, pour la Normandie, les évolutions sont les mêmes qu'avec la photopériode mais les valeurs associées sont plus accentuées pour le scénario RCP 8.5 (Beauvais *et al.*, 2019). La maturité physiologique s'effectuerait mi-juin. Les chaleurs estivales et les sécheresses seraient d'autant plus évitées que le déficit hydrique cumulé diminuerait fortement, tout comme l'échaudage en diminution à Evreux et en stagnation à Caen. En contrepartie, le rayonnement cumulé en début de montaison chuterait davantage puisqu'elle débiterait en cours d'hiver et le nombre de jours de vernalisation diminuerait un peu plus étant donné que la durée du tallage serait plus courte. Ainsi, les valeurs associées aux indicateurs phénoclimatiques peuvent différer selon qu'on intègre ou non certains éléments qui régissent la physiologie du végétal.

L'étude présentée ici permettant d'estimer les nouveaux potentiels climatiques pour la plante devra par conséquent 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 afin d'estimer un potentiel de rendement. Des études telles que celles du projet CLIMATOR (Brisson et Levrault., 2010) montrent que malgré des évolutions climatiques peu favorables, notamment en conditions de sécheresse, les rendements, en France, ne seraient pas impactés grâce à l'effet valorisant du CO₂ (Amthor, 2001 ; Bancal et Gate, 2010 in Brisson *et al.*, 2010 ; McGrath et Lobell, 2011 ; Makowski *et al.*, 2015 ; Fitzgerald *et al.*, 2016). De plus, les dates d'apparition des différents stades phénologiques déterminées à partir d'une somme de température (qui définit généralement la croissance potentielle) associée dans notre étude à un critère de photopériode (*i.e.* apparition du stade épi 1 cm à partir de 11 h de jour) pourraient être précisées par la prise en compte d'une somme vernalo-photo-thermique (Weir *et al.*, 1984). Ceci afin d'intégrer les effets combinés de la vernalisation, de la durée du jour et de la température. Selon le même principe, les aléas climatiques, comme par exemple le stress hydrique, qui agissent également sur la durée du cycle (Gate, 1995), seraient pris en compte. Cependant, il convient de rappeler que les résultats produits avec les modèles de cultures ne sont pas sans incertitudes puisqu'ils sont fonction des formalismes utilisés. C'est pourquoi des mesures expérimentales en matière de phénologie – venant compléter celles précédemment évoquées (cf. 3.2.) – pourraient être

envisagées au champ ou en serre, de façon à mieux tenir compte des stress envisagés sur la plante, étudier sa résilience ou constater les pertes (limiter le rayonnement en début de montaison par exemple).

3.4. Etendre l'analyse agroclimatique : autres indicateurs, échelle nationale et autres cultures

Il conviendra de recourir à d'autres indicateurs phénoclimatiques. Il s'agit notamment du risque de verse (fortes pluies et vent), de germination sur pieds (fortes chaleurs suivies d'une période fraîche et humide en fin de cycle) ou d'anoxie des racines (excès d'eau) (Gate, 1995). Le déficit hydrique abordé ici sur la totalité du cycle devra également être étudié pour chaque phase phénologique. Par ailleurs, le rendement peut également être affecté par des maladies telles que la fusariose, la septoriose ou le piétin échaudage. Elles sont favorisées par les hivers doux et humides (Lucas *et al.*, 2009) et peuvent ensuite se déclencher pendant des phases précises. A titre d'exemple, le risque de fusariose est élevé lorsque le cumul pluviométrique autour de la floraison excède 40 mm (Arvalis, site internet). Enfin, une recherche bibliographique sera effectuée en vue d'intégrer des indicateurs sur la relation climat/qualité du grain.

Aussi, il faudrait étendre à l'échelle nationale le travail présenté ici pour déterminer si les éléments exposés sont spécifiques ou non à la région Normandie et pour d'autres cultures qui occupent une place majeure dans l'agrosystème normand actuel (le lin, le maïs fourrager, le colza...), ou bien en étudiant la faisabilité d'autres productions végétales sous un climat modifié.

Conclusion

L'étude dresse un diagnostic bioclimatique des conséquences possibles du changement climatique sur la culture du blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100. La méthode d'analyse s'appuie sur des indicateurs phénoclimatiques permettant de suivre le développement de la plante, méthode déjà utilisée dans plusieurs recherches.

Les résultats montrent la complexité des changements possibles sur le cycle du blé. Au regard des seules évolutions climatiques possibles, les scénarios RCP 4.5 et 8.5 apparaissent comme très défavorables, du fait des vagues de chaleur et sécheresses envisagées, mais c'est sans compter le raccourcissement de la durée du cycle végétatif. En effet, cette anticipation des stades phénologiques permettrait un évitement naturel du chevauchement de la fin du cycle avec la période estivale, contrant ainsi la forte hausse attendue de l'échaudage thermique et du déficit hydrique estival (maturité physiologique atteinte en tout début d'été)²⁵. Alors même que ces deux scénarios sont les plus inquiétants, la céréaliculture normande pourrait limiter les risques, voire tirer son épingle du jeu de ces évolutions climatiques. Toutefois, il convient de rester très prudent dans l'interprétation de ces résultats puisqu'en contrepartie, d'autres impacts moins attendus surviendraient : augmentation de l'occurrence de basses températures à la méiose et déficit de rayonnement en début de montaison, pouvant respectivement affaiblir la fécondation et la croissance du blé, ainsi qu'une réduction du temps d'accumulation de biomasse. Les hivers doux, quant à eux, provoqueraient une diminution de la pression liée aux

²⁵ Ces deux aléas limitent le rendement car ils affectent la fertilité du blé, le remplissage des grains, la valorisation du CO₂ atmosphérique et la photosynthèse. Le déficit hydrique sur la totalité du cycle diminue dans le cas des deux scénarios grâce à l'anticipation des stades. L'échaudage thermique quant à lui reste équivalent à la période de référence pour le scénario RCP 4.5 et augmente seulement de deux jours avec le RCP 8.5.

gelées mais engendreraient une baisse importante du nombre de jours de vernalisation, élément impactant ensuite la floraison et, *in fine* la production de 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 3,1 en 2018), 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.

L'ensemble des évolutions présentées dans cet article sont communes aux deux sites d'étude. Les différences résident sur les valeurs associées aux différents indicateurs. Ainsi, l'Eure, en position plus continentale, reste davantage sujette aux fortes chaleurs de fin de cycle et aux basses températures à la méiose. En revanche, ses hivers plus froids lui confèrent la particularité de limiter la réduction du nombre de jours de vernalisation. Pour d'autres paramètres, comme le rayonnement solaire, les données sont équivalentes entre le Calvados et l'Eure car les facteurs géographiques de différenciation spatiale sont peu sensibles à l'échelle régionale. Si cette recherche dégage des tendances significatives pour envisager des pistes de réflexion autour de l'adaptation de la filière agricole, elle devra être poursuivie en développant les facteurs agronomiques (précocité variétale, date de semis, simulation de la phénologie) mais encore géographiques et climatiques (site d'étude, résolution du modèle, modèle climatique et scénarios utilisés).

Différentes stratégies d'adaptation sont possibles. En retardant de plusieurs semaines la date de semis, le déficit de rayonnement en début de montaison et les jours de froids à la méiose pourraient être évités. Mais avec des moissons estivales, le blé n'échapperait plus alors aux jours de chaleur et au manque d'eau, alors même que l'irrigation pourrait être contrainte (diminution de l'approvisionnement en eau des nappes phréatiques et des cours d'eau). Face à ces changements, la filière agricole peut aussi chercher de nouveaux idéotypes de blé (Donald, 1968 ; Debaecke *et al.*, 2014 ; Semenov et Stratonovitch, 2015 ; Gouache *et al.*, 2017) qui s'adapteraient à la variabilité des stress climatiques identifiés, soit par acquisition de mécanismes de tolérance, soit en modifiant la durée des phases phénologiques pour éviter les fenêtres climatiques sensibles. Ces leviers peuvent nécessiter le recours à des variétés paysannes anciennes (Goldringer *et al.*, 2012) mais également à de la sélection génétique permettant la création de variétés nouvelles.

Par ailleurs, le domaine de l'épigénétique²⁶ offre de nouvelles pistes d'amélioration des cultures aux stress environnementaux, qu'il conviendrait d'intégrer désormais dans ces programmes de sélection (Springer *et al.*, 2015 ; Begcys et Dresselhaus, 2018). Dans le cas où la recherche (épi)-génétique et le retour à la rusticité n'apporteraient pas de solutions, de nouveaux assolements pourraient être envisagés, sans quoi la viabilité des exploitations serait remise en cause. Les exploitations agricoles de grandes cultures sont d'ailleurs à ces titres plus résilientes que les systèmes où les productions sont pérennes (viticulture, arboriculture et sylviculture, par exemple).

D'ici 2100, l'avenir de l'agriculture normande dépend ainsi de nombreux facteurs. Les changements climatiques apparaissent comme un élément majeur, d'autant plus qu'ils

²⁶ « Alors que la génétique correspond à l'étude des gènes, l'épigénétique s'intéresse à une "couche" d'informations complémentaires qui définit comment ces gènes vont être utilisés par une cellule... ou ne pas l'être. En d'autres termes, l'épigénétique correspond à l'étude des changements dans l'activité des gènes, n'impliquant pas de modification de la séquence d'ADN et pouvant être transmis lors des divisions cellulaires. Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont réversibles. » (<https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/epigenetique>).

impactent directement les composantes agronomiques (résilience de la plante, maladies, ravageurs, pratiques agricoles...). Mais, dans le cadre d'une réflexion globale, il conviendra aussi de ne pas négliger les facteurs économiques (rôle des conjonctures politiques nationale et internationale, place des productions destinées à l'exportation, essor des circuits de proximité) ou même sociologiques (capacité de la filière agricole à s'adapter aux changements). En effet, c'est dès à présent que la filière agricole doit engager des pistes de réflexions pour rester compétitive.

Références bibliographiques

Abis S., 2015. Géopolitique du blé. Un produit vital pour la sécurité mondiale. Paris, 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). <http://www.fao.org/3/y4011e/y4011e06.htm>

AHDB, 2008. *The wheat growth guide*. 31 p. <https://cereals.ahdb.org.uk/media/185687/g66-wheat-growth-guide.pdf>

AGRESTE, 2017. *Mémento de la statistique agricole, Normandie*. 24 p. Consulté sur : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R2817C01.pdf>

AGROPARISTECH, 2003. *Les céréales*. Cours en ligne, département AGER, 86 p. <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/PHYTOTECHNIE/document/phytotecniedf/cerp.pdf>

Amthor J. S., 2001. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Research*, 73, 1-34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00179-4)

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 300 p. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>

ARVALIS, l'Institut du Végétal, 2014. Céréales à paille. Intervention de printemps. Choisir et décider préconisations 2014-2015. *Méditerranée*, 51 p. https://www.arvalisinfos.fr/file/galleryelement/pj/c8/13/7a/0d/gp2_mediterranee_2015_cp_def8889944409620946881.pdf

Bancal M. O., Gate P., 2010. *Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts*. In Brisson N., Levraut 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. <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Toutes-les-actualites/Livre-vert-du-projet-Climator>

Beauvais 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 sous la direction d'Olivier Cantat et Philippe Madeline, Université de Caen Normandie, 253 p.

Beauvais F., Cantat O., Madeline P., 2019. Changement climatique et céréaliculture en Normandie : quelles perspectives pour 2100 ? *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 32, 71-76. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/Thessaloniki2019_actes.pdf

- Begcy K., Dresselhaus T., 2018. Epigenetic responses to abiotic stresses during reproductive development in cereal. *Plant Reproduction*, 31, 343-355. <https://doi.org/10.1007/s00497-018-0343-4>
- Ben-Ari T., Boe 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*, 9, 1629, 10 p. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>
- 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*, 14 p. DOI: <http://doi.org/10.4000/echogeo.12146>
- Bouma J., 1989. *Land qualities in space and time*. In Bouma J., Bregt A.K (ed.), 1989: On land qualities in space and time, *International Society Soil Science Sym*. Wageningen, the Netherlands, 22-26 Aug. 1989, Pudoc, Wageningen, p 3-13.
- Bouma J., Bregt A. K (ed.), 1989. *On land qualities in space and time*. International Society Soil Science Sym, Wageningen, the Netherlands, 22-26 Aug 1989, Pudoc, Wageningen, 352 p.
- BoNHOMME R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13 (1), 1-10. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7)
- 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*, 119, 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- 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, 336 p. <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Toutes-les-actualites/Livre-vert-du-projet-Climator>
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delecolle R., 1998. 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*, 18, 311-346. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Buhler M. A., Caillebotte E., 2014. *Les impacts des activités humaines sur l'équilibre climatique*. In DREAL : *Profil Environnemental de Basse Normandie. Partie climat*, 80 p. http://webissimo.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/PartieClimat_v45_Web_200dpi_cle2c31a9.pdf
- Cantat O., Brunet L., 2001. Discontinuité géographique et particularités climatiques en Basse-Normandie. *Annales de Géographie*, 622, 579-596. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_2001_num_110_622_1703
- Cantat O., 2015a. *La diversité spatio-temporelle du climat bas-normand et ses impacts environnementaux et sociétaux*. HDR, Volume 2, Université Paris 7 Diderot, 288 p.
- Cantat O., 2015b. *Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine. Étude de climatologie physiologique et appliquée*. HDR, Volume 3, Université Paris 7 Diderot, 264 p.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A. 2009. Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelles fines et des bilans hydriques en Normandie. *Actes des journées de climatologie du CNFG de la commission Climat et Société*, 81-100. https://www6.rennes.inra.fr/climaster/content/download/3243/32894/version/1/file/CANTAT-et-al_CNFG-2009_ARTICLE.pdf

- Cantat O., Buhler M. A., Hericher S., 2014. *La diversité et la variabilité du climat bas-normand*. In DREAL : *Profil Environnemental de Basse Normandie. Partie climat*, 80 p. http://webissimo.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/PartieClimat_v45_Web_200dpi_cle2c31a9.pdf
- Cantat O., Beauvais F., Hericher S., 2019. *Le climat en Normandie : présentation et ses évolutions*. In DREAL (en cours de publication) : *Le climat en Normandie. Profil Environnemental. Partie climat*, 68 p.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., Savouret E., 2010. Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 23, 101-106. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/rennes2010_actes.pdf
- Caubel J., Garcia De Cortazar-Atauri I., Launay M., De Noblet-Ducoudre N., Huard F., Bertuzzi P., Graux A. I., 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.005>
- Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, 2019. *Panorama de l'agriculture et de l'agroalimentaire en Normandie*. Agriscopie, 74 p. <https://normandie.chambres-agriculture.fr/lagriculture-normande/agricopie-chiffres-cles/panorama-de-lagriculture-et-de-lagroalimentaire/>
- Cousin I., Gaillard H., Boulonne L., Ratie C., Jolivet C., 2015. *Guide méthodologique pour l'évaluation de la Réserve Utile d'échantillons de sol : protocoles de prélèvement et de caractérisation en laboratoire. Caractérisation des propriétés hydriques des sols dans le cadre du programme RMQS2 (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols)*. 22 p. <https://prodinra.inra.fr/record/355752>
- Cretat J., Pohl B., Richard Y., 2011. *Les modèles climatiques régionaux outils de décomposition des échelles spatio-temporelles*. Dixièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon (France), 11 p. <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2011/TQ2011%20ARTICLE%201.pdf>
- Curtis B. C., Rajaram S., Gomez Macpherson H., (eds) 2002. *Bread wheat improvement and production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy), 554. <http://www.fao.org/3/y4011e/y4011e00.htm#Contents>
- Debaeke P., Gauffreteau A., Durel C. H., Jeuffroy M. H., 2014. Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux. *Agronomie Environnement et Sociétés*, 4, 2, 65-73. https://agronomie.asso.fr/fileadmin/user_upload/Revue_AES/AES_vol4_n2_dec2014/AE_S_V4n2_pdf/AES-Vol4_n2_9_Debaeke_et_al.pdf
- Delahaye D., Le Gouée P. 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.
- Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D., 1994. The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10, 249-266. <https://link.springer.com/article/10.1007%2F00208992>
- 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*, 57, 16-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030>

- Dobler C., Hagemann S., Wilby R. L et Stötter J., 2012. Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections in an Alpine watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 4343-4360. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-4343-2012>
- Donald C. M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17, 385-403. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00056241>
- Doorenbos J., Pruitt W. O., 1975. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 154 p. <http://www.fao.org/3/a-f2430e.pdf>
- 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 de Rennes 2, 381 p.
- Dubreuil V., Lamy C., Planchon O., 2018. Les sécheresses à Rennes : Passé, présent et futur. *Actes du colloque : Les risques naturels dans le contexte du changement climatique à Cluj (Roumanie)*, 15-21. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01825987v2/document>
- Dubreuil V., Mème K., Bonnardot V., Aubert J.-F., Verger A. C., Melec D., 2019. Changement climatique et date de floraison des pommiers dans le Val de Rance (Bretagne). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 32, 83-88. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/Thessaloniki2019_actes.pdf
- Durand R., 1969. Signification et portée des sommes de températures. *Bulletin Technique Informatif, Météorologie et Agriculture*, 238, 185-190.
- Escourrou G., 1978. *Climats et types de temps en Normandie*. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris, Honoré Champion, 1081 + 525 p.
- Fisher R. A., Maurer O., 1976. Crop temperature modification and yield potential in a dwarf spring wheat. *Crop science*, 16, 855-859. <https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600060031x>
- Fitzgerald G. J., Tausz M., O'lear Y G., Mollah M. R., Tausz-Posch S., Seneweera S., Mock I., Löw M., Partington D. L., Mcneil D., Norton R. M., 2016. Elevated atmospheric CO₂ can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Global Change Biology*, 22, 2269–284. <https://doi.org/10.1111/gcb.13263>
- Fremont A., 2015. *Paysans de Normandie aujourd'hui*. Bayeux, Orep Editions, 160 p.
- Gate P., 1995. *Ecophysiologie du blé tendre. De la plante à la culture*. Paris, Technique et Doc. Lavoisier, 429 p.
- Gate P., 2009. Les raisons du plafonnement des rendements du blé en France. *Perspectives Agricoles*, 355, 6-12.
- Gate P., Blondot 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 ? *Oilseeds and fats Crops and Lipids Journal*, 15, 5, 332-336. <https://doi.org/10.1684/ocl.2008.0221>
- 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 de l'Agriculture de France*, 96, 17-23.
- Goldringer I., Enjalber T J., Rivière 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*, 213(1), 153-161. <https://doi.org/10.3917/pour.213.0153>
- Gouache D., Le Bris X., Bogard M., Deudon O., Page C., Gate P., 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheatgrain filling in

France. *European Journal of Agronomy*, 39, 62-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.009>

Gouache D., Bogard M., Pegard M., Thepot S., Garcia C., Hourcade D., Paux E., Oury F. X., Rousset M., Deswarte J. C., Le Bris X., 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*, 202, 108-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.012>

Guillemot H., 2009. Comment évaluer un modèle numérique de climat ? Circulations et dialogues entre simulations et observations dans les pratiques des modélisateurs. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3, 2, 273-293. <https://www.cairn.info/revue-anthropologie-des-connaissances-2009-2-page-273.htm>

Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, 27, 17, 6779-6798. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00629.1>

HLPE, 2012 : *Sécurité alimentaire et changement climatique*. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome, 119 p. <http://www.fao.org/3/a-me421f.pdf>

Holzkämper A., Calanca P., Fuhrer J., 2011. Analyzing climate effects on agriculture in time and space. *Procedia Environ. Sci*, 3, 58-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.02.011>

Holzkämper A., Calanca P., Fuhrer J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 149-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.004>

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*, 15, 109-122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0627-7>

INRA, 2013. *Quand le réchauffement climatique perturbe les saisons du vivant*. <http://www.inra.fr/Grandpublic/Rechauffementclimatique/Touslesdossiers/Phenologieetchangementclimatique>.

IPCC, 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., Meyer L. A. (eds.)], Genève, IPCC, 151 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

Jacob D. *et al.*, 2014. EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change projections for European impact. *Regional Environmental Change*, 1-16, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

Jacquart C., Choissnel E. 1995. Un modèle simplifié de bilan hydrique à deux réservoirs utilisable en agrométéorologie. *La Météorologie*, 8, 9, 29-44. <https://doi.org/10.4267/2042/51939>

Jamagne M., Betremieux R., Begon J.-C., Mori A., 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

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. <https://prodinra.inra.fr/record/459007>

- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavresky P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergéo*, article 501. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Goergen K., Jacob D., Lüthi D., Van Meijgaard E., Nikulin G., Schär C., Teichmann C., Vautard R., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V., 2014. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7, 1297-1333. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- Lamy C., Cantat O., Le Gouée P., Dubreuil V., Bensaid A., Lemercier B., Savouret E., 2012 : *Sécheresse et réserve en eau des sols*. In Mérot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions*, Presses Universitaires de Rennes, 458 p.
- Lecomte C., 2005. *L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype-milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences*. Thèse de doctorat à AGROPARISTECH, 173 p. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003471/document>
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Savouret E., 2010. La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 23, 333-336. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/rennes2010_actes.pdf
- Le Gouée P., Marie M., Cantat O., Bensaid 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)*. ISDA, 28-30 juin 2010, 10 p. Consulté sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00521286/document>
- Le Stum H. [Dir.], Bonjean A., Ruch O., Bouqueru J.-M *et al.*, 2017. *Le blé*. Paris, France Agricole, 269 p.
- Lucas P., Lebreton L., Carrillo S., Masson E., 2009. Piétin-échaudage : associer les méthodes de lutte. *Perspectives Agricoles*, 356, 80-82. https://www.perspectivesagricoles.com/file/galleryelement/pj/4a/06/5d/87/356_70296109624_2894870.pdf
- Madelin M., Bois B., Chabin J.-P., 2010. Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique. *EchoGéo*, 14, 13 p. DOI: <https://doi.org/10.4000/echogeo.12176>
- Makowski D., Asseng S., Ewert F., Bassu S., Durand J. L., Li T., Martre P., Adam M., Aggarwal P. K., Angulo C., Baron C., Basso B., Bertuzzi P., Biernath C., Boogaard H., Boote K. J., Bouman B., Bregaglio S., Brisson N., Buis S., Cammarano D., Challinor A. J., Confalonieri R., Conijn J. G., Corbeels M., Deryng D., De Sanctis G., Doltra J., Fumoto T., Gaydon D., Gayler S., Goldberg R., Grant R.F., Grassini P., Hatfield J.L., Hasegawa T., Heng L., Hoek S. B., Hooker J., Hunt L. A., Ingwersen J., Izaurralde C., Jongschaap R. E. E., Jones J.W., Kemanian R. A., Kersebaum K. C., Kim S. H., Lizaso J., Marcaida M., Müller C., Nakagawa H., Kumar N.S., Nendel C., O'leary G. J., Olesen J. E., Oriol P., Osborne T. M., Palosuo T., Pravia M.V., Priesack E., Ripoche D., Rosenzweig C., Ruane A.C., Ruget F., Sau F., Semenov M. A., Shcherbak I., Singh B., Singh U., Soo H. K., Steduto P., Stöckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tang L., Tao F., Teixeira E., Thorburn P., Timlin D., Travasso M., Rötter R. P., Wa H., 2015. A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 483-493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.013>

- Marie M., Bermond M., Madeline P., Coinaud C., 2014. Une typologie des combinaisons d'utilisation du sol en France en 2010 : propositions méthodologiques. *Mappemonde*, 114, 24 p. <http://mappemonde.mgm.fr/num42/articles/art14203.html>
- Mérot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions*. Presses Universitaires de Rennes, 458 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*, 150, 3, 399-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.001>
- Monteith J., 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>
- Mcgrath J. M., Lobell D. B., 2011. An independent method of deriving the carbon dioxide fertilization effect in dry conditions using historical yield data from wet and dry years. *Global Change Biology*, 17, 2689-2696. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02406.x>
- 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. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500010031x>
- Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., [Dir : Jouzel J.], 2014. *Le climat de la France au XXIe siècle - Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 64 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF.pdf
- Pedelaborde P., 1958. *Le climat du Bassin parisien : essai d'une méthode rationnelle de climatologie physique*. Paris, Génin, 539 + 232.
- Pettitt A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Planchon O., 1997. *Les climats maritimes dans le Monde*. Thèse de Doctorat, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.
- Prost L., 2008. *Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR*. Thèse de doctorat à AGROPARISTECH, 215 p. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00381092/document>
- Quintana-Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets E., Baillon M., Canellas C., Franchisteguy L., Morel S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Ray D. K., Ramankutty N., Mueller N. D., West., Foley J. A., 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature Communications*, 3, 1293. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>
- Rezaei E. E., Siebert S., Hugging H., Ewert F., 2018. Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. *Scientific Reports*, 4891, 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23101-2>
- Richard Y., Roucou P., Cretat J., Castel T., Pohl B., 2012. Modèles de climats régionaux : potentiels et limites. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 25, 7 p. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/grenoble2012_actes.pdf

- 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. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086310>
- Sarda X., Diquelou S., Abdallah M., Nesi N., Cantat O., Le Gouée P., Avice J.-C., Ourry A., 2013. Assessment of sulphur deficiency in commercial oilseed rape crops from plant analysis. *Journal of Agriculture Sciences*, Cambridge University Press, 18 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859613000105>. HAL01108798.
- Schauberger B., Ben-Ari T., Makowski D., Kato T., Kato H., Ciais P., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific Reports*, 8, 16865. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>
- Semenov M. A., Stratonovitch P., 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*, 65, 123-138. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01297>
- Spinger N. M., 2013. Epigenetics and crop improvement. *Trends in genetics*, 29, 241-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tig.2012.10.009>
- Spiridonov V., Somot S., Déqué M., 2005. ALADIN-Climate : from the origins to present date. *ALADIN Newsletter*, 4 p. <http://www.umr-cnrm.fr/aladin-old/newsletters/news29/N29WEB/SPIRIDONOV.pdf>
- 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. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1, 5, 551-56. DOI: <https://doi.org/10.1071/PP9900551>
- Thakur P., Kuma S., Malik J., Berger J., Nayyar H., 2010. Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 67, 429-443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.09.004>
- Thorntwaite C., Mather J., 1955. *The water balance*. Centerton, Climatology, 104 p.
- 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. *Etudes Normandes*, 12, 55-74. [Document sur Persee](#).
- Trzpit J.-P., 1998. Gens de Normandie, et si l'eau vous était comptée ? *Noroi*, 169, 9-22. DOI: <https://doi.org/10.3406/noroi.1996.6678>
- Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Annales agronomiques*, 1961, 12, 13-49.
- Urruty N., 2017. *Robustesse du rendement du blé tendre face aux perturbations abiotiques et biotiques : cadre méthodologique et leviers agronomiques*. Thèse de doctorat à l'Université de Poitiers, 255 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01980909/document>
- Van Vuuren D., Edmonds J., Kainuma M Riahi K Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*, 109, 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

- Vautard R., Gobiet A., Jacob D., Belda M., Colette A., Deque M., Fernandez J., Garcia-Diez M., Goergen K., Güttler I., Halenka T., Karakostas T., Katragkou E., Keuler K., Kotlarski S., Mayer S., Van Meijgaard E., Nikulin G., Patarcic M., Scinocca J., Sobolowski S., Suklitsch M., Teichmann S., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V., Yiou P., 2013. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Climate Dynamics*, 41, 2555-2575, <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>
- Vidal J.-P., Martin E., Franchisteguy L., Baillon M., Soubeyroux J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Vigneau J.-P., 1997. *Le climat océanisé de la façade atlantique médiane de l'Europe*. In *Le climat, l'Eau et les Hommes*, ouvrage en l'honneur de Jean Mounier, Presses Universitaires de Rennes, 227-244.
- Voltaire A., Sanchez-Gomez E., Melia D. S. Y., Decharme B., Cassou C., Senesi S., Valcke S., Beau I., Alias A., Chevallier M., Deque M., Deshayes J., Douville H., Fernandez E., Madec G., Maisonnave E., Moine M. P., Planton S., Saint-Martin D., Szopa S., Tyteca S., Alkama R., Belamari S., Braun A., Coquart L., Chauvin F., 2013. *The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation*. In *Presentation and analysis of the IPSL and CNRM climate models used in CMIP5*. *Climate Dynamics*, 40 (9-10), 2091-2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>
- Weir A. H., Bragg P. L., Porter J. R., Rayner J. H., 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science*, 102, 371-382. <https://doi.org/10.1017/S0021859600042702>
- Zadoks J. C., Chang T. T., Konzak C. F., 1974.: A decimal code for the growth stages of cereals. *Weeds Research*, 14, 415-42. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>