Cybergeo: European Journal of Geography
Environnement, Nature, Paysage | 2022

Changement climatique et culture du blé tendre d'hiver en France aux horizons 2070 et 2100 : étude phénoclimatique et géographique à partir des données issues du modèle ALADIN-Climat

Climate change and soft winter wheat cultivation in France in 2070 and 2100: phenoclimatic and geographical study using data from the ALADIN-Climat model

Cambio climático y cultivo de trigo blando de invierno en Francia entre 2070 y 2100: estudio fenoclimático y geográfico a partir de datos del modelo ALADIN-Climate

François Beauvais, Olivier Cantat, Patrick Le Gouée, Philippe Madeline, Sophie Brunel-Muguet, Line Boulonne, Hervé Gaillard, Claudy Jolivet, Marie-Paule Bataille et Mohand Medjkane

Édition électronique
URL : https://journals.openedition.org/cybergeo/39679
DOI : 10.4000/cybergeo.39679
ISSN : 1278-3366

Éditeur
UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par INRAE Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

Référence électronique
François Beauvais, Olivier Cantat, Patrick Le Gouée, Philippe Madeline, Sophie Brunel-Muguet, Line Boulonne, Hervé Gaillard, Claudy Jolivet, Marie-Paule Bataille et Mohand Medjkane, « Changement climatique et culture du blé tendre d'hiver en France aux horizons 2070 et 2100 : étude phénoclimatique et géographique à partir des données issues du modèle ALADIN-Climat », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 1034, mis en ligne le 09 novembre 2022, consulté le 22 novembre 2022. URL : http://journals.openedition.org/cybergeo/39679 ; DOI : https://doi.org/10.4000/cybergeo.39679

Ce document a été généré automatiquement le 10 novembre 2022.

Creative Commons - Attribution 4.0 International - CC BY 4.0

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Changement climatique et culture du blé tendre d'hiver en France aux horizons 2070 et 2100 : étude phénoclimatique et géographique à partir des données issues du modèle ALADIN-Climat

Climate change and soft winter wheat cultivation in France in 2070 and 2100: phenoclimatic and geographical study using data from the ALADIN-Climat model

Cambio climático y cultivo de trigo blando de invierno en Francia entre 2070 y 2100: estudio fenoclimático y geográfico a partir de datos del modelo ALADIN-Climate

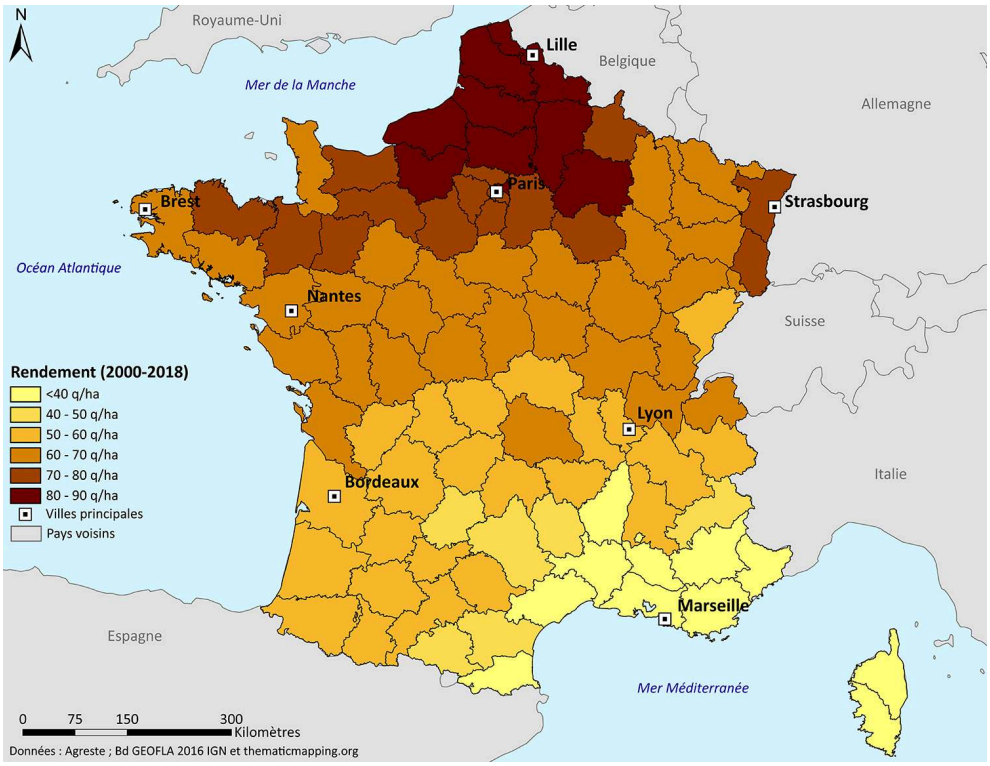
François Beauvais, Olivier Cantat, Patrick Le Gouée, Philippe Madeline, Sophie Brunel-Muguet, Line Boulonne, Hervé Gaillard, Claudy Jolivet, Marie-Paule Bataille et Mohand Medjkane

Introduction

1 La culture du blé tendre occupe une place très importante dans l'économie agricole et agroalimentaire française. À l'échelle nationale, la céréaliculture recense 300 000 exploitations spécialisées et génère, de la production à la seconde transformation, 440 000 emplois (données FranceAgriMer) pour une valeur ajoutée hors subvention de 10 milliards d'euros, soit 14 % de toutes les productions agricoles confondues hors services (données INSEE). D'après les chiffres de la FAO-STAT (2011-2019), la France produit en moyenne 37,6 millions de tonnes (Mt) par an de blé tendre (*Triticum aestivum* L.), ce qui

équivaut à environ 5 % de la production mondiale. Le pays se classe cinquième producteur mondial, derrière la Chine (128,7 Mt), l'Inde (94,5 Mt), la Russie (63,3 Mt) et les États-Unis (56 Mt). Selon les données FranceAgriMer, 48 % des grains français sont exportés à destination des pays du Maghreb et de l'Afrique subsaharienne, de la Chine et des pays de l'Union Européenne, tandis que l'exportation de la farine reste très faible (1,8 %). À ce titre, la France est le quatrième exportateur mondial. Une très faible partie des productions reste en stock sur le marché (7,8 %). Le reste (42 %) est transformé par l'industrie française pour l'alimentation du bétail (13,4 %), la panification (8,1 %), l'amidonnerie et glutennerie (7,9 %), l'alcool et les biocarburants (4,4 %), la biscotterie, biscuiterie et pâtisserie industrielles (3,5 %), la malterie (1,9 %), les semences (1,1 %) et enfin la freinte (1 %) ou d'autres débouchés minoritaires (1 %). La France est donc en mesure de répondre à sa demande intérieure et d'être très présente sur le marché international. Les surfaces dédiées à cette céréale représentent 18 % de la surface agricole totale française, mais elles dépassent largement ce chiffre dans les plaines agricoles spécialisées en grandes cultures et céréales, notamment celles du Bassin parisien. Les conditions pédoclimatiques y sont favorables, puisqu'elles permettent de limiter les stress hydrique (sécheresse) et thermique (échaudage). Avec souvent plus de 80 quintaux (q) à l'hectare, les rendements sont les plus élevés du pays, supérieurs à la moyenne nationale de 71,0 q/ha sur la période 2000-2018 (figure 1). Plus généralement, ces valeurs expriment la productivité élevée des plants de blé français, quelles que soient les variétés utilisées, comparativement à ceux des autres pays leaders en la matière (Chine : 46,8 q/ha ; États-Unis : 29,5 q/ha ; Inde : 28,9 q/ha ; Russie : 22,0 q/ha).

Figure 1 : **Rendement en blé tendre des départements français sur la période 2000-2018**



François Beauvais, 2020

2 Cependant, le climat évolue (IPCC, 2021). Depuis les années 1950, à l'échelle de la France, les températures moyennes ont augmenté d'environ 0,3°C par décennie (Gibelin *et al.*, 2014), entrainant une diminution des jours de gel et une augmentation des vagues de chaleur, devenues plus intenses et récurrentes (Météo-France)[1]. Comme dans le même temps les précipitations annuelles n'ont pas présenté d'évolution significative, les surfaces concernées par les sécheresses augmentent. Ces évolutions ont des répercussions sur les productions de blé tendre. Une stagnation des rendements est observée en France depuis le milieu des années 1990 et concerne 66 à 80 % des surfaces cultivées pour cette céréale (Ray *et al.*, 2012 ; Schauberger *et al.*, 2018). Ce constat vaut également pour 36 % des surfaces mondiales consacrées à cette culture, principalement en Europe, Inde et Chine (Ray *et al.*, 2012). En France, cette tendance est principalement engendrée par la hausse des journées d'échaudage thermique pendant le remplissage des grains et des sécheresses au cours de la montaison (Brisson *et al.*, 2010 ; Gate *et al.*, 2010). D'autres menaces d'origines atmosphériques pénalisent aussi les productions, telles que les conditions favorables au développement de maladies causées par des champignons, comme la septoriose et la fusariose, à l'image de la chute historique des rendements observée en 2016 (Ben-Ari *et al.*, 2018).

3 Le blé constitue l'aliment de base pour 40 % de la population mondiale ainsi que la première source d'alimentation humaine, devant le riz et le maïs (Le Stum, 2017). La sécurité alimentaire mondiale repose en grande partie sur les productions de blé tendre. C'est dans ce contexte que des études d'impacts prospectives se sont principalement développées à partir des années 2000, à l'aide de modèles de cultures intégrant les données extraites de la modélisation prédictive du climat : Harrison, Butterfield, 1996 ; Tubiello *et al.*, 2002 ; Ju *et al.*, 2005 ; Luo *et al.*, 2005 ; Zhang, Liu, 2005 ; Brisson, Levrault, 2010 ; Magrin *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2009 ; Guo *et al.*, 2010 ; Liu, Tao, 2012 ; Thaler *et al.*, 2012 ; Sommer *et al.*, 2013 ; Tao, Zhang, 2013 ; Vashist *et al.*, 2013 ; Asseng *et al.*, 2013 ; Kumar *et al.*, 2014 ; Semenov *et al.,* 2009, 2015 ; Webber *et al.*, 2018 ; Senapati *et al.*, 2019 ; Qian *et al.*, 2019 ; Wang *et al.*, 2020). Cependant, les résultats sont variables en raison des structures et paramétrages différents selon les modèles de culture (Guo *et al.*, 2010 ; Asseng *et al.*, 2015). Pour Wilcox et Makowski (2014), il s'agit principalement des effets opposés de la température, des précipitations et de la concentration en CO_2 sur les rendements de cette céréale. Mais ces deux auteurs exposent, après méta-analyse de 90 études, qu'à partir d'une élévation de la température de + 2,3°C, plus de 50 % des variations de rendements seraient négatives. En France, l'augmentation des jours d'échaudage thermique pendant le remplissage des grains (Gate *et al.,* 2008 ; Gouache *et al.*, 2012) devrait se poursuivre comme les sécheresses. Cependant, d'après les résultats du programme CLIMATOR (2007-2010), la valorisation du CO_2 atmosphérique par la plante pourrait compenser les pertes associées à ces aléas et même procurer une augmentation des rendements dans certaines régions. Parallèlement à l'utilisation des modèles de cultures, des études complémentaires, telle que celle présentée dans cet article, précisent les diagnostics en considérant des indicateurs climatiques spécifiques aux productions agricoles. Ces recherches n'estiment pas les potentiels de rendement, mais centrent l'analyse sur l'identification des aléas intervenant au cours des processus écophysiologiques de la plante (Holzkämper *et al.*, 2013 ; Caubel *et al.*, 2015). Des recherches telles que celles de Gate (2008) pour la France et Trnka *et al.* (2014, 2015) pour l'Europe ont montré que la modification de la durée des périodes phénologiques en raison de l'augmentation de la

température modifie l'exposition du blé tendre aux aléas météo-climatiques. L'essentiel des travaux sur cette thématique sont relatifs à l'écophysiologie et à l'agronomie. Notre travail s'inscrit ici dans le champ de la climatologie et de la géographie, en proposant une lecture spatiale, temporelle et géosystémique, complémentaire aux recherches déjà menées dans d'autres disciplines.

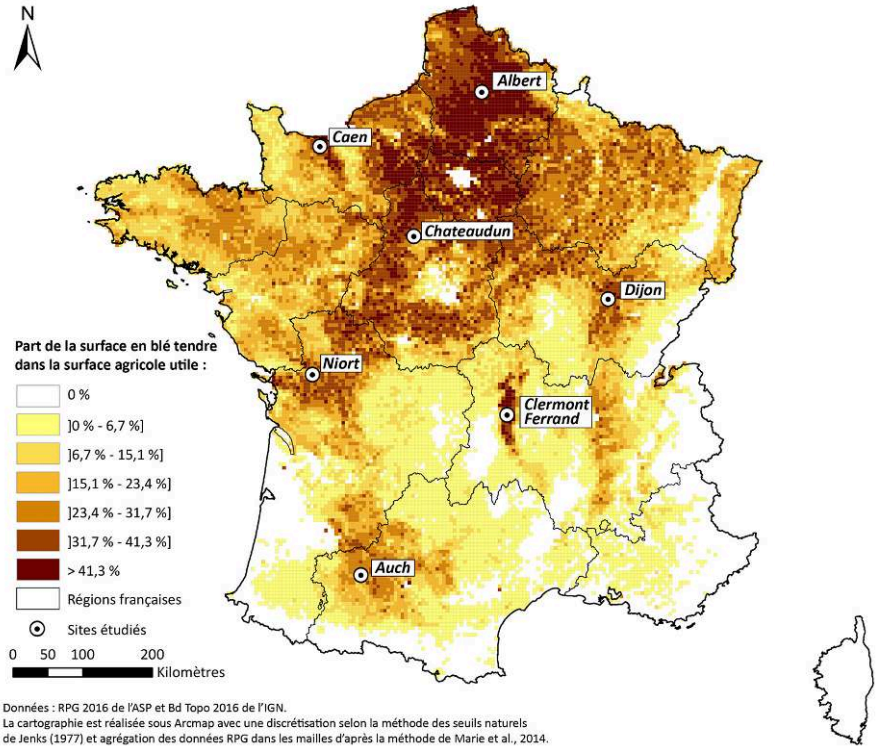
4 Cet article s'intéresse à la simulation de l'évolution du potentiel bioclimatique du blé tendre dans les prochaines décennies au regard des évolutions climatiques modélisées, dans le cadre d'une mise en perspective de l'agrosystème céréalier français et de sa géographie agricole.

Sites d'études, données et méthode

Présentation des sites d'étude

5 Pour cet article concernant les conséquences attendues du changement climatique sur la céréaliculture en France, sept sites représentatifs des régions agricoles spécialisées dans le blé tendre (figure 2) ont été sélectionnés : Caen (site 1), Albert (site 2), Châteaudun (site 3), Dijon (site 4), Niort (site 5), Clermont-Ferrand (site 6) et Auch (site 7). Ces sites se rattachent aux régions agricoles suivantes : la Plaine de Caen, le Sansterre, la Petite Beauce, le Dijonnais, le Niortais, la Grande Limagne et le Pays Auchois. Ils expriment la diversité des conditions climatiques propices à son développement à l'échelle de la France (Joly *et al.*, 2010 ; Cantat, 2015a)[2]. Le blé est susceptible de pousser sous des climats variés, allant des nuances tempérées océaniques plus ou moins douces et arrosées à l'ouest, de Auch en remontant vers Albert, à des faciès se teintant de continentalité à l'est, comme pour Clermont-Ferrand et Dijon (figure 3).

Figure 2 : Sites retenus pour l'étude et part de la surface agricole utilisée par le blé à l'échelle française

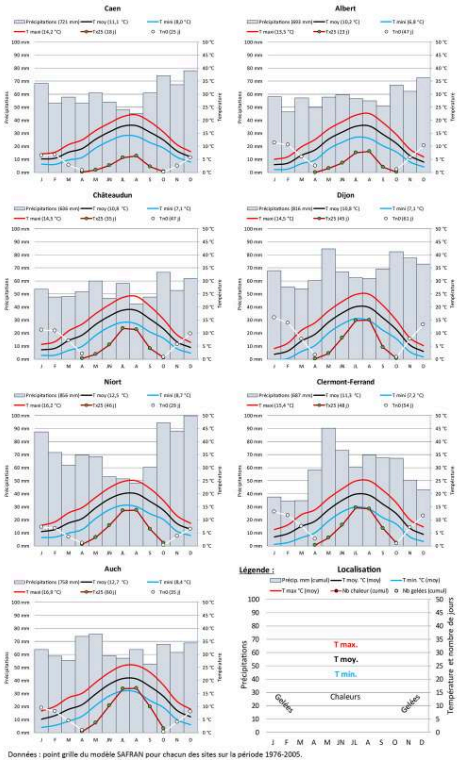


François Beauvais, 2020

6 La température moyenne annuelle des sites traduit un climat tempéré, avec des valeurs comprises entre 10,4°C dans le nord du pays (Albert) et 12,8°C dans le sud (Auch). L'hiver est naturellement plus rude dans les sites éloignés du littoral. Ainsi, il gèle en moyenne plus de 60 jours par an à Dijon, contre environ 30 jours par an à Auch, Niort et Caen. L'été, la continentalité et la méridionalité imposent des jours de chaleur plus fréquents, à l'inverse de l'océanité et de la septentrionalité qui en réduisent fortement les occurrences. La chaleur n'apparaît ainsi qu'une vingtaine de fois à Caen et Albert, contre plus de soixante à Auch, site le plus méridional. Les précipitations s'échelonnent de 600 mm pour le site le plus sec (Châteaudun) à près de 850 mm pour le plus arrosé (Niort). Elles sont réparties assez régulièrement sur l'année à Châteaudun, Auch, Albert et Dijon, Niort et Caen, avec toutefois un maximum automnal plus présent pour ces deux dernières stations du fait de leur caractère plus océanisé. La seule véritable originalité provient de Clermont-Ferrand, avec une fin d'automne et un hiver sensiblement moins arrosés que les périodes estivale et printanière.

7 Ces différents sites présentent donc des caractères climatiques sans contraintes majeures pour le développement des végétaux en général, et la culture du blé en particulier. Cette "bienveillance" des conditions atmosphériques s'exprime par l'absence d'excès thermiques et pluviométriques, propre à la façade ouest de l'Europe aux latitudes moyennes, et notamment d'un point de vue bioclimatique par l'absence de mois imposant une sécheresse physiologique.

Figure 3 : Diagrammes ombrothermiques, nombre de jours de gelées et de chaleur sur la période de référence 1976-2005



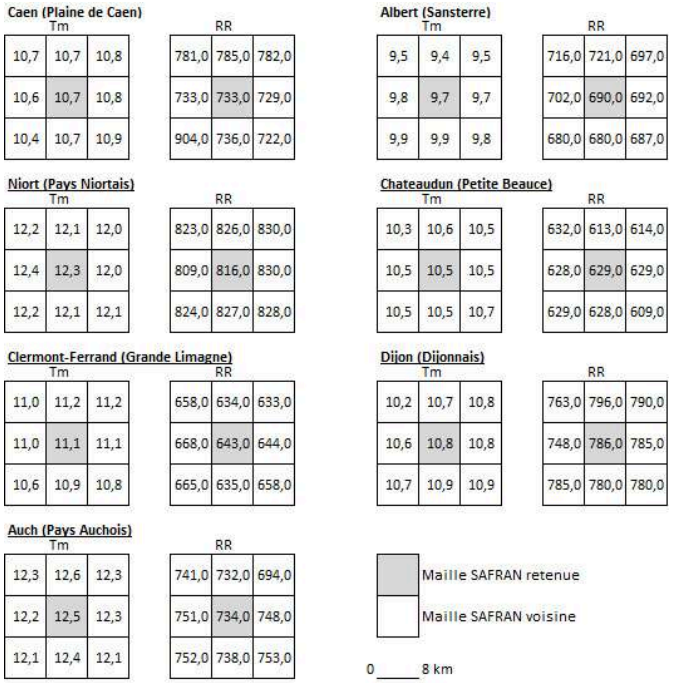
François Beauvais, 2020

Données

Données climatiques

8 Les données climatiques régionalisées mobilisées dans cette recherche sont celles de la simulation CNRM-2014 au pas de temps quotidien du modèle ALADIN-Climat (Spiridonov *et al.*, 2005). Un point de grille a été retenu pour chaque plaine céréalière. Il s'agit du point le plus proche de la ville considérée mais situé dans la plaine agricole. En revanche pour Clermont-Ferrand ou Dijon, nous avons retenu le point à l'est puisqu'à l'ouest de ces deux villes nous ne sommes plus dans un paysage de plaine agricole (respectivement contreforts de la chaine des Puys et cuesta de Bourgogne où l'altitude et l'occupation du sol diffèrent). Le choix a été effectué sur SIG avec les valeurs des mailles SAFRAN, pour la période de référence 1976-2005, et en sous calque les mailles de densité de blé, une carte du relief ainsi qu'une orthophotoplan de l'IGN. 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 d'une résolution de 8x8 km pour chaque entité étudiée (figure 4).

Figure 4 : 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 huits points voisins pour les 7 sites céréaliers



François Beauvais, 2020

9 Les conditions aux limites latérales d'ALADIN-Climat sont issues d'une première descente d'échelle dynamique entre le modèle global couplé CNRM-CM5 (Voldoire *et al.*, 2013) et le modèle ARPEGE-Climat (Déqué *et al.*, 1994). Cette base de données est téléchargeable sur le portail Internet *DRIAS Les futurs du climat* (Ouzeau *et al.*, 2014). Les traitements bioclimatiques sont effectués pour la période de référence (1976-2005) et pour le futur sur les horizons moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100). Les projections utilisées sont issues des scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 du GIEC (Van Vuuren *et al.*, 2011). Le premier (RCP 2.6) intègre une réduction des émissions de gaz à effet de serre limitant le réchauffement climatique planétaire à + 2°C en 2100. Le second (RCP 8.5) illustre le climat possible sans politique climatique à l'échelle mondiale.

10 La simulation CNRM-2014 est corrigée par la méthode quantile-quantile par rapport à l'observation (modèle SAFRAN)[3]. Un biais froid est toutefois constaté sur la période historique. Pour cette raison, le scénario historique est légèrement recorrigé en considérant le biais moyen mensuel des températures minimales et maximales (Dubreuil *et al.*, 2019) observé sur les 7 sites sur la période pré-rupture puis post-rupture (Beauvais, 2021).

Données pédologiques

11 Les données pédologiques sont utiles au calcul du RUM (Réservoir Utilisable Maximal), c'est-à-dire la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et disponible pour la plante. Cette détermination des RUM traduit des différences de potentiels pédoclimatiques, opposant des sols épais avec peu de contraintes pour le

développement des plantes, contrairement à des sols squelettiques et chargés en éléments grossiers. En guise d'illustration concrète, dans la Plaine de Caen, lors des printemps secs et ensoleillés, les céréaliculteurs au nord-ouest de la ville dont les exploitations sur sols épais bénéficient de la réserve en eau des sols constituée après l'hiver, associent en termes de production "année de sécheresse, année de richesse", contrairement à leurs homologues au sud-est de Caen sur "petites terres" qui voient leurs rendements chuter.

12 Le RUM est déterminé à partir des règles de pédotransfert (Bouma, 1989), en tenant compte de la texture[4], de l'épaisseur et de la charge en éléments grossiers des différents horizons ainsi que de la profondeur d'exploration théorique des racines du blé tendre (110 cm lorsque le sol le permet ; d'après Gate, 1995). Ces données pédologiques sont issues de la base de données DONESOL qui héberge les données du RMQS 1 (première campagne 2000-2009 du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols de l'INRA ; Arrouays *et al.*, 2002) à l'exception des sites normands pour lesquels nous avons produit nos propres données sur la base d'ouverture de fosses pédologiques, en suivant le protocole du RMQS (Jolivet *et al.*, 2018) (tableau 1).

13 Les sols agricoles ont été choisis en tenant compte de leur représentativité dans les plaines agricoles rattachées aux sites étudiés, sur la base des Unités Cartographiques de Sols (UCS) fournies par les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) issus du programme Inventaire, gestion et Conservation des Sols (IGCS) du Groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS SOL ; tableau 4). Cette sélection de sols résulte également de critères pédologiques non contraignant agronomiquement sur le plan de la pédogenèse (forte hydromorphie, carbonatation excessive, podzolisation, lessivage important).

Tableau 1: Présentation des sols retenus pour les 7 sites étudiés et RUM associé

Site d'étude	Plaine agricole	Département	Date de prélèvement	Commune de prélèvement	Type de sol	Occupation du sol	Référentiel Régional Pédologique correspondant	RUM déterminé
Amiens	Sansterre	80	16/03/2004	Warloy-Baillon	Brunisol luvique limoneux, limono-argileux, battant	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Suc et al., 2017	203 mm
Caen	Plaine de Caen	14	02/04/2019	Anguerny	Brunisol pachique luvique	Grandes cultures	Le Gouée., 2016	204 mm
			29/06/2020	Fierville-Bray	Calcosol leptique	Grandes cultures	Le Gouée., 2016	23 mm
Châteaudun	Petite Beauce	28	16/04/2008	Logron	Luvisollimoneux, battant, hydromorphe issu de limon sur argile à silex cultivé	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Girot., 2009	204 mm
Dijon	Dijonnais	21	17/04/2007	Collonges-les-Premières	Brunisol limonoargileux alluvial décarbonaté	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Chretien et Meunier., 1998	194 mm
		21	18/10/2007	Saint-Gelais	Calcosol limono argileux	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Chretien et Meunier., 1998	130 mm
Niort	Niortais	79	29/07/2003	Epannes	Calcosol leptique limono-argileux à argileux issu de calcaire tendre	Système de rotations sans prairie sans intercultures	Cam., 2007	97 mm
Clermont-Ferrand	Grande Limagne	63	11/05/2004	Lezoux	Colluviosol calcaire épais remanié issu des colluvions calcaires et marnes de l'Oligocène cultivé	Système de rotations sans prairie sans intercultures	-	173 mm
Auch	Pays Auchois	32	25/10/2006	Prechac	Calcisol issu de molasse calcaire du Tertiaire à forte hydromorphie fossile.	Système de rotations sans prairie	Party et al., 2016	181 mm

François Beauvais, 2020

Méthode d'analyse phénoclimatique

14 La phénologie[5] est déterminée à partir d'une somme de température (Bonhomme, 2000), dont le calcul s'effectue en base 0°C pour le blé, avec un écrêtage à 28°C (Durand, 1969). On considère que la plante a besoin d'une certaine somme de chaleur pour se développer. Les besoins thermiques correspondent aux gammes de valeurs présentées dans la bibliographie (Gate, 1995 ; Arvalis, 2017). Ils ne sont pas équivalents d'une région à une autre, en raison notamment de l'usage de variétés différentes, adaptées au climat en présence. Par conséquent, ils sont ajustés en tenant compte des dates intermédiaires moyennes d'apparition des stades phénologiques "épi 1 cm", "épiaison", "floraison" et "remplissage des grains" (figure 5) exposés par Gate *et al.* (2003) pour les zones nord, centre et sud de la France. À titre d'exemple, il faut 1790°CJ (degré jour) pour atteindre l'épiaison à Caen tandis qu'il en faut 1410°CJ à Dijon pour un semis le 20 octobre. Cette date de semis a été retenue car elle fait partie, pour tous les sites, de la période optimale (Gate *et al.*, 2003 ; Arvalis, 2017). Afin de tenir compte de l'effet de la durée du jour sur le cycle, une photopériode de 11 heures est considérée pour l'apparition du stade épi 1 cm (Agroparistech, 2003 ; Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie, *comm. pers.*).

15 Différents travaux exposent les conditions climatiques ou les seuils à partir desquels des impacts sont possibles sur la production lorsqu'ils surviennent sur des phases sensibles du cycle (figure 5). Ainsi, les gelées et les basses températures peuvent engendrer des disparitions de plantes dès - 5°C lors de la levée, ou au cœur de l'hiver des nécroses foliaires durant le tallage à partir de - 10 ou - 20°C, selon l'endurcissement du blé (Gate, 1995). Les températures inférieures ou égales à - 4°C au début de la montaison génèrent un gel de l'épi. Sous le seuil de + 4°C durant la période proche méiose[6], un déficit de fécondation est ensuite observé (Thakur *et al.*, 2010). En effet, le froid engendre un blocage du transfert du sucre vers les grains de pollen, perturbant ainsi la fécondation des ovules[7].

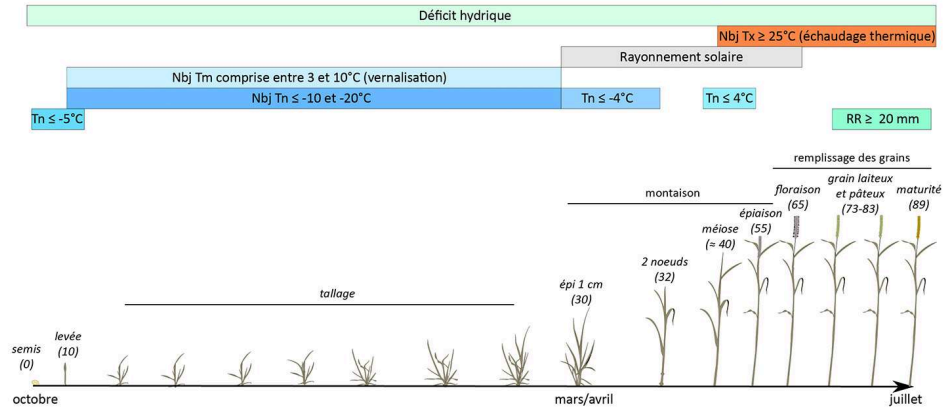
16 Tout comme le froid, la chaleur est également à craindre pour le blé. Le risque de journée échaudante apparaît dès lors que la température maximale atteint 25°C. Cet excès thermique perturbe la photosynthèse et peut conduire à un avortement de fleurs, de la méiose à la floraison, ou encore interrompre le remplissage des grains dès l'épiaison.

17 Le déficit hydrique provoque une réduction de l'activité photosynthétique de la plante et de l'assimilation en CO_2 à cause de la fermeture des stomates. Il est redouté sur la totalité du cycle mais plus particulièrement lors du remplissage des grains.

18 Les conditions biopédoclimatiques peuvent également être appréciées avec le confort hydrique de la plante correspondant au rapport ETR/ETM[8]. C'est un indicateur de satisfaction en eau variant de 0 (stress hydrique exacerbé) à 1 (conditions optimales). Le manque de rayonnement en cours de montaison impacte la croissance. Le manque de froid est également un facteur limitant pour le blé : en effet, cette plante doit être exposée à des températures comprises entre + 3 et + 10°C (vernalisation) de la levée jusqu'au stade épi 1 cm, sans quoi un déficit de fécondation est observé lors de la floraison (Gate, 1995). C'est aussi une condition nécessaire pour que l'épi puisse monter (Mossad *et al.*, 1995). Enfin, les très fortes pluies peuvent engendrer une verse physiologique du blé à partir du stade laiteux (Gate, 1996).

19 L'occurrence de ces aléas est alors étudiée à partir d'indicateurs phénoclimatiques (Gate, 2009), également appelés écoclimatiques (Caubel, 2015). Ils sont dérivés de variables climatiques (température minimale, maximale, précipitations, évapotranspiration, rayonnement) et greffés à une simulation de la phénologie simulée pour chaque année. Leur évolution ou le dépassement de seuils renvoient à des pertes de productions. Cette méthode d'analyse, tenant compte de la phénologie et de sa variabilité interannuelle est plus précise que les indicateurs agroclimatiques, utilisés à des dates invariantes (Holzkämper *et al.*, 2013 ; Caubel *et al.*, 2015). Plusieurs études ont déjà mobilisé ce procédé dynamique : Gate *et al.*, 2008, 2009 ; Mkhabela *et al.*, 2010 ; Gouache *et al.*, 2012 ; Holzkämper *et al.*, 2011, 2013, 2015 ; Caubel *et al.*, 2015, 2017 ; Beauvais *et al.*, 2019, 2021, 2022).

Figure 5 : **Indicateurs étudiés et phénologie du blé tendre**



François Beauvais, 2020

20 Le manque d'eau pour le blé est déterminé à l'aide d'un bilan hydrique journalier à décroissance logarithmique, selon la méthode de Thornthwaite et Mather (1955). L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée à partir de la formule de Turc (1961) [9]. Elle est multipliée à des coefficients culturaux (Kc) spécifiques à chaque période phénologique (Doorenbos, Pruitt, 1975 ; de 0,1 à la levée à 1,2 à la floraison et 0,5 à la maturité physiologique, d'après Arvalis, 2017) afin d'obtenir l'évapotranspiration maximale de la culture (ETM) qui permet de traduire les besoins en eau spécifiques à la plante (Allen *et al.*, 1998).

Résultats : quelles conséquences du changement climatique sur le cycle du blé tendre ?

21 En réponse à l'augmentation de la température, la durée des cycles végétatifs du blé tendre pourrait être réduite, modifiant de ce fait l'exposition aux aléas climatiques.

Anticipation de la phénologie

22 La durée du cycle du blé serait raccourcie sur les 7 sites puisque les besoins en chaleur sont satisfaits plus tôt dans l'année (tableau 2). Le raccourcissement du cycle s'effectue surtout sur sa première partie en raison du réchauffement hivernal, avec principalement une réduction de la durée du tallage. Les stades phénologiques qui suivent arrivent donc en avance dans le calendrier. À l'horizon moyen 2041-2070, l'anticipation des stades serait de l'ordre de deux semaines pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5. La montaison débuterait respectivement pour les deux scénarios autour du 5 et 6 mars pour le site le plus précoce (Auch) et entre le 9 et le 15 mars pour le plus tardif (Caen). La maturité physiologique interviendrait entre mi-juin et début juillet, soit des récoltes début juillet dans le sud de la France et en seconde quinzaine de ce même mois dans le nord. À l'horizon lointain 2071-2100, dans le cas du scénario RCP 2.6, l'anticipation est équivalente à la période précédente. En revanche, pour le scénario RCP 8.5, elle est plus prononcée, bien que restant limitée par le critère photopériodique. C'est-à-dire que la montaison ne débute pas avant le début du mois de mars à cause d'une durée du jour insuffisante alors même que le besoin en chaleur est satisfait. La maturité physiologique serait atteinte entre le 8 juin (Auch) et le 18 juin (Caen et Albert), correspondant à des moissons fin juin et début juillet. La réduction de la durée du cycle serait alors de trois semaines à un mois selon les sites.

Tableau 2 : Évolution et nombre de jours d'anticipation de la date de maturité physiologique pour une date de semis le 20 octobre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)

	(1976-2005)		(2041-2070)		(2071-2100)	
Site	SAFRAN observation	Scénario historique	RCP 2.6 Aladin	RCP 8.5 Aladin	RCP 2.6 Aladin	RCP 8.5 Aladin
Albert	18-juil	18-juil	30-juin (-18 j)	26-juin (-22 j)	03-juil (- 15 j)	18-juin (-30 j)
Auch	29-juin	30-juin	18-juin (-12 j)	15-juin (-15 j)	20-juin (-10 j)	08-juin (-22 j)
Caen	18-juil	18-juil	02-juil (-16 j)	27-juin (-21 j)	05-juil (-13 j)	18-juin (-30 j)
Châteaudun	09-juil	09-juil	25-juin (-14 j)	21-juin (-18 j)	26-juin (-13 j)	15-juin (-24 j)
Clermont-Ferrand	07-juil	06-juil	22-juin (-14 j)	18-juin (-18 j)	25-juin (-11 j)	10-juin (-26 j)
Dijon	06-juil	06-juil	24-juin (-12 j)	19-juin (-17 j)	26-juin (-10 j)	12-juin (-24 j)
Niort	06-juil	07-juil	24-juin (-13 j)	20-juin (-17 j)	25-juin (-12 j)	11-juin (-26 j)
Moyenne	09-juil	09-juil	25-juin (-14 j)	20-juin (-18 j)	27-juin (-12 j)	13-juin (-26 j)

François Beauvais, 2020

Hausse contenue de l'échaudage thermique

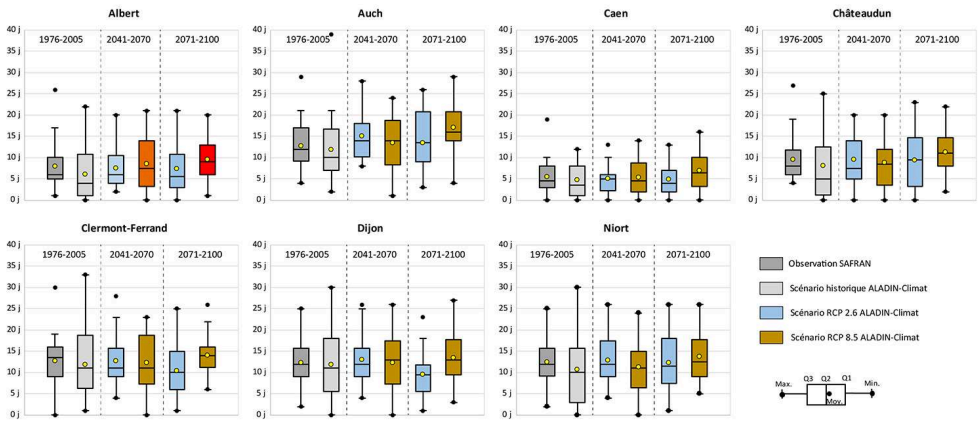
23 L'échaudage thermique pénalise la formation et le remplissage des grains. En période de référence (1976-2005), le nombre de jours d'échaudage thermique est supérieur à 10 jours pour les sites les plus au sud (Auch, Clermont-Ferrand et Niort) ainsi que Dijon en

raison de sa forte continentalité. À Chateaudun, ce cumul est d'un peu moins de 10 jours et d'environ 8 jours à Albert. C'est à Caen que cet aléa est le moins présent (environ 5 jours) du fait de la proximité de la mer de la Manche qui rafraîchit l'air en été (figure 6).

24 À l'horizon moyen (2041-2070), les évolutions sont peu marquées avec les deux scénarios, excepté une hausse de 2 à 3 jours à Auch. À l'horizon lointain (2071-2100), le scénario RCP 2.6 proposerait une exposition à l'échaudage thermique relativement proche de ce qui est observée en période de référence, avec même une légère diminution à Clermont-Ferrand et Dijon. Dans le cas du scénario RCP 8.5, la hausse n'est pas aussi importante qu'attendue grâce à l'anticipation des stades phénologiques garantissant un évitement des vagues de chaleur estivales. Le blé comptabiliserait seulement 2 jours suplémentaires d'échaudage à Caen, Dijon et Clermont-Ferrand. À Niort, Châteaudun et Albert, la hausse serait d'environ 3 jours et de 5 jours à Auch. Par ailleurs, le nombre d'années cumulant un nombre important de jours de chaleur serait plus important. À titre d'exemple, à Auch, 8 années sur 30 cumuleraient entre 20 et 30 jours d'échaudage thermique alors que ce type de situation est jugée comme extrême en période de référence (année 1976).

25 Les sites de la partie centrale de la France (Niort, Clermont et Dijon) seraient confrontés à une exposition similaire à celle d'Auch en période de référence. Il en est de même pour Albert à l'horizon 2100, qui enregistrerait les conditions observées à Chateaudun actuellement (*idem* pour Caen relativement à Albert). En somme, on observerait un décalage vers le nord des conditions d'échaudage.

Figure 6: Évolution et variabilité du nombre de jours d'échaudage thermique (Tx25) cumulés de la méiose à la maturité physiologique du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)



François Beauvais, 2020

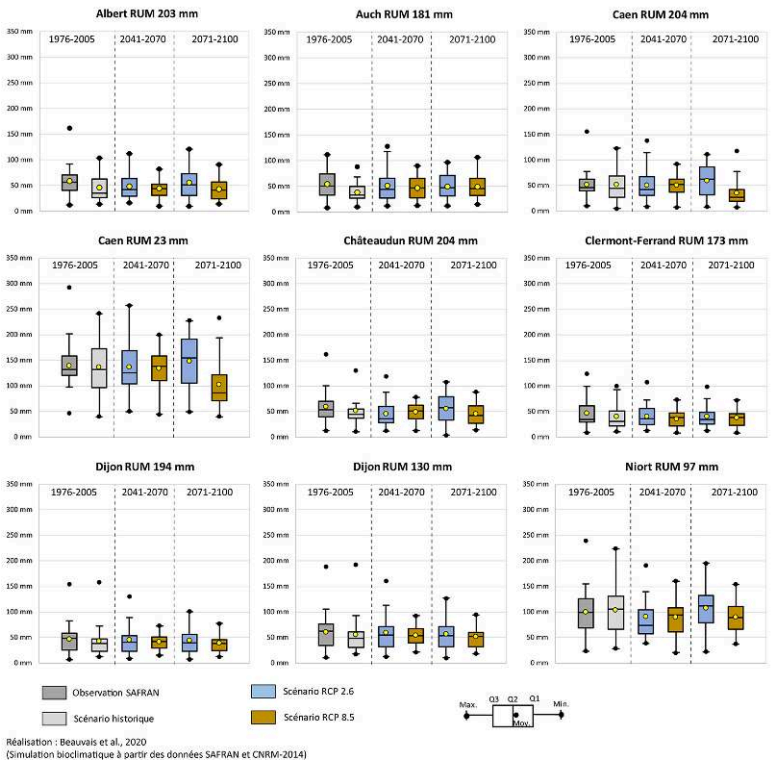
Stabilité et réduction légère du déficit hydrique

26 Le manque d'eau pour la plante limite la croissance de la plante et l'asimilation du CO_2 atmosphérique. En période de référence (1976-2005), le déficit hydrique cumulé au cours du cycle est modéré dans les grandes plaines céréalières françaises pourvues de sols épais. D'autant que le recours à des variétés au cycle raccourci dans les régions continentales et méridionales permet d'anticiper le remplissage des grains, afin qu'il ne

se prolonge pas au cours de la période estivale. Ce manque d'eau pour la plante est de l'ordre de 50 mm (figure 7). Cela se traduit notamment par une légère dégradation du confort hydrique à partir du stade épi 1 cm jusqu'au remplissage des grains inclus (valeur de 0,9 à 0,8). Sur les sept sites retenus pour cette étude, deux connaissent des conditions pédoclimatiques désavantageuses. Le sol moyen de la région Niortaise ne permet pas de compenser assez le manque d'eau pour la plante, où le déficit hydrique cumulé atteint 100 mm (pertes de 15 à 20 q/ha). Il en va de même pour les "petits sols" situés au sud de Caen, où le déficit hydrique atteint près de 140 mm (pertes de 20 à 30 q/ha) et où le confort hydrique n'est compris qu'entre 0,6 et 0,5 de l'épaison à la maturité.

27 À l'horizon moyen (2041-2070 ; voir figure de synthèse n°8 en fin d'article), le déficit hydrique resterait stable et peu de différences seraient constatées entre les deux scénarios. Les évolutions du manque d'eau cumulé seraient faibles, avec de légères diminutions (- 14 mm à Niort : - 14 %) ou augmentations (+ 6,5 mm à Auch : + 15 %). Ce constat est également valable pour le confort hydrique. A l'horizon lointain (2071-2100), en revanche, les deux scénarios se différencient. Dans le cas du RCP 2.6, le manque d'eau resterait globalement équivalent à la période de référence. Avec le RCP 8.5, le déficit hydrique cumulé présenterait une diminution, allant de -10 à - 30 % pour Albert, Niort, Chateaudun et Caen. En conséquence, la plante disposerait de conditions hydriques un peu plus confortables en raison de l'évitement de la période estivale. En revanche, le manque d'eau augmenterait légèrement à Auch (+ 10 %).

Figure 7 : Évolution et variabilité du déficit hydrique cumulé au cours du cycle du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)



François Beauvais, 2020

Réduction du rayonnement cumulé pendant la montaison

28 Le déficit de rayonnement solaire engendre des conséquences sur la croissance de la plante et notamment sur le nombre de grains/m². En période de référence, selon les conditions de nébulosité et des dates d'apparition des stades phénologiques, le rayonnement disponible cumulé par le blé tendre pendant la montaison va d'environ 22 000 cal/cm² sur les sites de Dijon et de Clermont à plus de 24 000 cal/cm² à Albert et Auch (tableau 3).

29 Que ce soit à moyen (2041-2070) ou à long terme (2071-2100), le rayonnement serait presque inchangé avec le scénario RCP 2.6. En revanche, avec le scénario RCP 8.5, l'énergie solaire disponible cumulée serait inférieure de - 9 à - 13 % d'ici 2070 et de - 18 à - 22 % à la fin du siècle selon les sites. Mais il convient de préciser que c'est surtout la première partie de la montaison qui serait la plus affectée, notamment la période "épi 1 cm - 2 nœuds", avec une diminution de l'ordre de - 40 % à Albert, Caen et Châteaudun, tout en sachant que concernant le site pour lequel elle est moins prononcée (Auch), la diminution demeure de - 23 %. Entre l'épiaison et la floraison, cette dégradation n'est plus que de l'ordre de - 5 à - 13 % selon les sites. Ces évolutions s'expliquent par l'avancée des stades phénologiques dans le calendrier vers des jours caractérisés par une durée d'éclairement plus courte.

Tableau 3 : Évolution du rayonnement cumulé pendant la montaison (en cal/cm²/jour entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Albert	25 090	24 016	21 976 (-8 %)	21 044 (-12 %)	23 456 (-2 %)	18 704 (-22 %)
Auch	24 506	24 211	22 745 (-6 %)	21 811 (-10 %)	23 196 (-4 %)	19 914 (-18 %)
Caen	23 567	23 512	21 935 (-7 %)	20 475 (-13 %)	22 363 (-5 %)	17 535 (-25 %)
Châteaudun	23 924	23 432	21 485 (-8 %)	20 356 (-13 %)	21 389 (-9 %)	18 055 (-23 %)
Clermont-Ferrand	22 976	21 567	20 312 (-6 %)	19 264 (-11 %)	20 555 (-5 %)	16 864 (-22 %)
Dijon	22 626	22 028	21 438 (-3 %)	20 105 (-9 %)	21 258 (-3 %)	17 637 (-20 %)
Niort	24 799	25 797	24 264 (-6 %)	23 233 (-10 %)	24 905 (-3 %)	21 203 (-18 %)
Moyenne	23 927	23 509	22 022 (-6 %)	20 898 (-11 %)	22 446 (-5 %)	18 559 (-21 %)

François Beauvais, 2020

Réduction des gelées mais hausse de l'exposition de la méiose aux basses températures

30 Les gelées peuvent engendrer des disparitions de plantes et des nécroses foliaires. Le risque de gelées automnales à - 5°C est presque absent pour les sites océaniques (Caen

et Niort) et le site méridional (Auch). Il peut néanmoins survenir dans les régions éloignées du littoral, entre 6 années sur 30 à Albert et 13 années sur 30 à Dijon, site le plus oriental. Dès l'horizon moyen, l'occurrence de cet aléa disparaîtrait à Caen, Auch, Niort et Châteaudun en raison du réchauffement. Sur les autres sites, la pression devient faible et ne concernerait que le scénario RCP 2.6, et il en va de même à l'horizon lointain.

31 L'occurrence de gelées à - 10°C pendant le tallage est actuellement rare à Niort, Auch et Caen (moins de 5 années sur 30), un peu plus fréquente à Albert et Chateaudun (7/30 ; 8/30) et plus commune à Dijon (12/30) et Clermont-Ferrand (18/30). À l'horizon moyen, ces très fortes gelées diminueraient sur les sites où elles sont déjà peu nombreuses en période de référence, tandis que ceux plus exposés restent encore vulnérables. À l'horizon lointain, elles seraient peu fréquentes, voire inexistantes avec le scénario RCP 8.5. Dans le cas du scénario RCP 2.6, elles pourraient toujours survenir. Même si l'occurrence est moins prononcée qu'en période de référence, il conviendrait de rester prudent, notamment si l'hiver est globalement doux et que le blé n'est pas endurci.

32 À Clermont-Ferrand, 7 années sur 30 connaissent un gel d'épis à - 4°C. Cet aléa peut survenir lorsque la montaison débute précocement. Sur les autres sites étudiés, ce type de gelée tardive est pas ou peu rencontré. À l'horizon moyen, il serait moins présent, avec 5 et seulement 1 année concernée pour les deux scénarios à Clermont-Ferrand. À l'horizon lointain, la Grande Limagne ne compterait plus que 1 seule occurrence dans le cas d'un réchauffement important. Néanmoins, avec le scénario RCP 2.6, le risque serait équivalent à la période de référence. Le site de Dijon qui n'était jusqu'alors que peu concerné, serait exposé 6 années sur 30 en raison de l'avancement de la phénologie.

33 Les journées de printemps, avec une température minimale inférieure à + 4 °C pendant la méiose, engendrant potentiellement une réduction de la fertilité du blé, peuvent avoir lieu sur tous les sites (tableau 4). Ce risque est inférieur à 5 années sur 30 à Albert, Caen et Niort. À Auch, où la méiose arrive plus précocement, l'occurrence est de 7 années sur 30 mais est plus fréquente à Dijon (9/30), Châteaudun (10/30) et Clermont-Ferrand (12/30). Ces occurrences augmentent à l'horizon moyen pour atteindre 10 années sur 30 pour tous les sites. L'avancement de la méiose dans le calendrier végétal l'expose davantage à ce risque. À Châteaudun et Dijon, près de 15 années sur 30 seraient concernées. À l'horizon lointain, cette pression resterait maintenue, notamment dans le cas du scénario RCP 2.6. Avec le scénario RCP 8.5, le risque serait légèrement plus faible qu'en période de référence, excepté à Albert, Caen et Niort.

34 Ainsi, résultat inattendu, l'effet d'anticipation des stades phénologiques dû au réchauffement climatique entrainerait paradoxalement plus de risques d'exposition au froid durant la méiose.

Tableau 4 : Occurrence d'au moins une journée avec une température minimale inférieure ou égale à 4°C pendant la phase proche méiose (+/- 6 jours) et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même phase - période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Albert	03/30a 0,1 j	07/30a 0,4 j	11/30a 1,3 j	11/30a 1,2 j	09/30a 0,6 j	11/30a 0,7 j
Auch	07/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j	13/30a 1,2 j	11/30a 0,8 j	12/30a 0,7 j	06/30a 0,3 j
Caen	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	11/30a 0,7 j	11/30a 0,8 j	07/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j
Châteaudun	10/30a 0,9 j	10/30a 1,0 j	14/30a 1,7 j	14/30a 1,2 j	14/30a 1,1 j	09/30a 0,5 j
Clermont-Ferrand	12/30a 0,8 j	12/30a 0,8 j	11/30a 1,2 j	11/30a 0,9 j	14/30a 0,9 j	10/30a 0,8 j
Dijon	09/30a 0,5 j	10/30a 0,5 j	14/30a 1,2 j	13/30a 1,1 j	14/30a 1,0 j	07/30a 0,5 j
Niort	05/30a 0,2 j	05/30a 0,3 j	11/30a 1,0 j	11/30a 0,6 j	11/30a 0,6 j	09/30a 0,3 j
Moyenne	07/30a 0,4 j	08/30a 0,5 j	12/30a 1,2 j	12/30a 0,9 j	12/30a 0,8 j	09/30a 0,5 j

François Beauvais, 2020

Augmentation des jours de très fortes pluies en fin de cycle

35 Les fortes précipitations pendant le remplissage des grains peuvent engendrer la verse physiologique du blé. Sur la période contemporaine, l'occurrence de fortes précipitations journalières (supérieures ou égales à 20 mm) reste rare (1 à 3 années sur 30) sur l'ensemble des sites, excepté à Dijon et Auch, où l'aléa est plus présent (8 à 9 années sur 30 ; tableau 6). À l'horizon moyen, avec le scénario RCP 2.6, un léger renforcement serait constaté sur l'ensemble des sites, sauf à Dijon et Auch. Dans le cas du scénario RCP 8.5, l'augmentation de l'aléa concernerait tous les sites. À l'horizon lointain, avec ce scénario, la vulnérabilité augmenterait de façon plus prononcée, excepté à Dijon. À titre d'exemple, cette occurrence passe de 1 à 7 jours sur 30 ans pour le site caennais. On notera néanmoins que le scénario historique surestime le retour de ces événements à Clermont-Ferrand.

Tableau 5 : Évolution de l'occurrence de jours de pluie où le cumul pluviométrique est supérieur ou égal à 20 mm : nombre d'année avec au moins une occurrence et la moyenne du nombre de jours par année sur cette même phase - période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)

Site	Safran 1976-2005	Sc hist 1976-2005	RCP 2.6 2041-2070	RCP 8.5 2041-2070	RCP 2.6 2071-2100	RCP 8.5 2071-2100
Albert	02/30a 0,1 j	04/30a 0,2 j	04/30a 0,3 j	07/30a 0,3 j	06/30a 0,2 j	09/30a 0,4 j
Auch	08/30a 0,3 j	09/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j	11/30a 0,6 j	11/30a 0,5 j	12/30a 0,6 j
Caen	01/30a 0,1 j	02/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	04/30a 0,1 j	07/30a 0,2 j
Châteaudun	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	04/30a 0,2 j	07/30a 0,3 j	04/30a 0,2 j	07/30a 0,3 j
Clermont-Ferrand	03/30a 0,2 j	11/30a 0,4 j	09/30a 0,4 j	14/30a 0,7 j	08/30a 0,3 j	09/30a 0,5 j
Dijon	09/30a 0,4 j	06/30a 0,2 j	06/30a 0,2 j	11/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j	08/30a 0,4 j
Niort	03/30a 0,1 j	05/30a 0,2 j	06/30a 0,3 j	08/30a 0,3 j	04/30a 0,1 j	06/30a 0,2 j
Moyenne	04/30a 0,2 j	06/30a 0,2 j	06/30a 0,3 j	09/30a 0,4 j	06/30a 0,3 j	08/30a 0,4 j

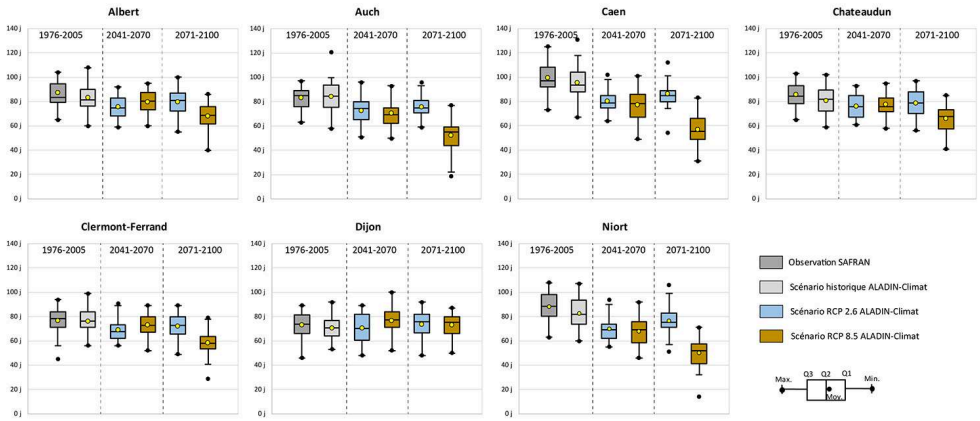
François Beauvais, 2020

Réduction du nombre de jours disponibles pour la vernalisation

36 L'hiver, la céréale nécéssite d'être exposée à de basses températures (mais pas trop basses), entre 3 et 10°C, pour initier sa montaison et fleurir au printemps. En période de référence, le nombre moyen de jours de vernalisation est suffisant sur tous les sites pour la réalisation de variétés de type hiver necessitant 60 jours de basses températures (figure 8). Toutefois, en s'intéressant à la variabilité interannuelle, les sites continentaux de Dijon et de Clermont-Ferrand peuvent être exposés certaines années à un déficit en raison d'hivers plus rudes, avec des températures inférieures aux bornes de la vernalisation.

37 À l'horizon moyen, la diminution du nombre de jours de vernalisation toucherait surtout les deux sites les plus océaniques et le site le plus au sud. Ainsi, à Caen, Niort et Auch, certaines années pourraient être défavorables avec moins de 60 jours disponibles, remettant en cause l'usage des variétés hivernales. La diminution serait moins marquée pour les autres sites. À Dijon et Clermont-Ferrand, l'élevation de la température réduirait la rudesse des hivers et permettrait davantage de jours disponibles dans le cas du scénario RCP 8.5. À l'horizon lointain, dans le cas du scénario RCP 2.6, la tendance repartirait très légèrement à la hausse, mais sans pour autant retrouver la situation de la période 1976-2005. Avec le scénario RCP 8.5, une réduction est constatée sur tous les sites à l'exception de Dijon. Les années favorables aux variétés de type hiver se raréfiraient. Après Auch, les sites les plus défavorisés seraient Caen et Niort (qui étaient pourtant les plus vernalisants en période de référence) puisque l'élévation de la température journalière hivernale engendrerait un dépassement régulier du seuil de 10°C. Les années les plus défavorables ne permettraient plus de semer que des variétés alternatives.

Figure 8 : Évolution et variabilité du nombre de jours disponibles pour la vernalisation du blé tendre entre la période de référence 1976-2005 et les horizons 2070 et 2100 pour deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 (simulations CNRM-2014)



François Beauvais, 2020

Discussion : quels agrosystèmes pour demain ?

38 Face à ces évolutions, il convient d'interroger le devenir des agrosystèmes céréaliers français et de dégager les perspectives de recherches pour envisager les pistes d'adaptation au changement climatique.

Analyse critique des résultats par rapport à l'état de l'art

39 Les résultats de cet article coïncident en partie avec les tendances observées dans la littérature scientifique. En France, d'après Gate (2008), le stade épi 1 cm pourrait être avancé de 25 à 30 jours en année médiane à l'horizon 2071-2100, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de notre étude. Cependant, les dates que nous avons simulées pour ce stade phénologique sont plus tardives d'environ deux semaines, en raison du critère photopériodique que nous avons retenu. Les résultats présentent également une augmentation de l'échaudage thermique sur l'ensemble de l'hexagone, malgré l'avancée de la phénologie qui permet pourtant d'atténuer l'exposition à cet aléa. Cette évolution serait moins prononcée sur la bordure maritime du nord-ouest. Gouache *et al.* (2012) simulent également une avancée de la phénologie, moins prononcée de quelques jours par rapport à notre étude, qui ne permet pas de contrer la hausse de l'échaudage thermique. Ces résultats coïncident également avec ceux du programme CLIMATOR (Brisson, Levrault, 2010), à l'exception que les conclusions présentent que l'avancée de la phénologie dans le calendrier ne permettrait pas d'éviter l'augmentation du déficit hydrique. Toutefois, rappelons que ces études ont été produites pour les scénarios SRES alors que nous avons travaillé avec les scénarios RCP plus récents. Par ailleurs, les sites retenus et les simulations climatiques diffèrent également, ce qui rend les résultats difficilement comparables. En Europe, Trnka *et al.* (2014) modélisent une avancée des stades d'environ 15 jours pour 14 sites d'après les scénarios RCP 4.5 et 8.5 pour l'horizon 2060, soit un résultat proche de ce que nous avons constaté dans notre étude. La modification de l'exposition de la plante aux aléas, en réponse à la modification de la durée des périodes phénologiques, coïncide avec nos résultats. En effet, bien que ce constat concerne les sites les plus au sud, les auteurs signalent que l'avancée de la

phénologie pourrait engendrer une réduction du rayonnement cumulé par la plante entre le semis et l'anthèse. Les fortes chaleurs en fin de cycle seraient en hausse, même si un évitement serait envisageable avec des variétés insensibles à la photopériode, participant de ce fait à un avancement plus marqué de la phénologie. Cette anticipation des stades pourrait aussi exposer la plante au gel de printemps. Enfin, les épisodes de sécheresses sévères ne concerneraient que la région de la Méditerranée occidentale. Semenov *et al.* (2009) constatent, quant à eux, que l'avancée de la phénologie liée à l'augmentation de la température permettrait au blé d'ici 2050 d'éviter la période estivale et son déficit hydrique plus intense, ce qui correspond aux conclusions de notre étude.

Quelle adaptation de la céréaliculture française au changement climatique ?

40 Face aux multiples forçages d'origine climatique identifiés dans ce travail, plusieurs stratégies d'adaptation sont envisageables.

41 Des semis tardifs permettraient d'améliorer le quotient photothermique pendant la montaison et d'éviter ainsi les basses températures à la méiose. Toutefois, en décalant le calendrier vers l'été, cette option engendrerait une augmentation du déficit hydrique et de l'échaudage thermique sur l'ensemble des sites et ne serait alors pas envisageable, excepté à Caen, où les jours de chaleur sont moins nombreux.

42 Le levier variétal pourrait en revanche être exploité. Il s'agirait alors de semer des variétés déjà existantes dans d'autres régions et répondant aux aléas pressentis pour le futur. À titre d'exemple, des variétés moins exigeantes en vernalisation semées dans le sud de la France pourraient être expérimentées dans le nord du pays. Le recours aux différentes variétés constitue d'ailleurs déjà une forme d'adaptation de la céréaliculture aux conditions climatiques et pédologiques locales. En effet, face aux disparités climatiques et pédologiques, l'agriculture sait s'adapter en recourant à des variétés de précocités différentes. Ainsi, dans les régions exposées à de nombreux jours de chaleur et à des sécheresses, la maturité physiologique intervient plus tôt afin d'éviter en partie ces deux aléas. À l'exception des petits sols, tels que ceux du sud de Caen et de Niort, les sols épais sur lesquels prennent place généralement ces cultures permettent également de limiter le déficit hydrique. À ce titre, les sites étudiés ne sont donc pas égaux dans l'adaptation variétale. C'est pourquoi des études bioclimatiques doivent être effectuées pour des variétés de différentes précocités (de très précoces à très tardives), afin d'identifier celles les plus adaptées et de mettre en lumière une tendance globale de l'ensemble. Pour approfondir l'adéquation des variétés et de la culture du blé tendre au climat du futur, il conviendra de retenir une méthode d'évaluation mettant en cohérence l'ensemble des indicateurs phénoclimatiques et leurs successions au cours du cycle, pour déterminer un indice global de faisabilité. Cette approche est d'ailleurs déjà présentée dans les travaux d'Holzkämper *et al.* (2011, 2013), Caubel *et al.* (2015) ou encore Garcia de Cortazar et Maury (2019).

43 La filière agricole peut aussi chercher de nouveaux idéaux-types (Donald, 1968 ; Debaecke *et al.*, 2014 ; Semenov, Stratonovitch, 2015 ; Gouache *et al.*, 2017), en adaptant la tolérance aux stress climatiques identifiés ou en modifiant la durée des périodes phénologiques afin d'éviter l'exposition à des fenêtres climatiques sensibles, en recourant notamment à des variétés anciennes (Goldringer *et al.*, 2012) ou à la

génétique. Par ailleurs, la mémorisation des événements climatiques, médiées notamment par des modifications épigénétiques transmissibles aux générations suivantes par "effet maternel", s'avère une piste d'acclimatation à explorer (Gutterman, 2000 ; Springer, 2012 ; Lamke, Baurle, 2017 ; Begcys, Dresselhauss, 2018). Par là même, on peut pressentir tout l'intérêt du développement de la production de semences au champ — sur le même schéma que la production de semences paysannes (Gervers *et al.,* 2019 ; Goldringer *et al.*, 2012) — qui, de fait, sont issues de plantes mères confrontées à ces stress récurrents favorisant l'acclimatation au cours d'un cycle, caractères transmissibles à la génération suivante (Hatzig *et al.*, 2018).

Engager des réflexions globales pour repenser les agrosystèmes de demain

44 Plus largement, le changement climatique pourrait être l'occasion d'engager des réflexions pour repenser la céréaliculture actuelle et s'inspirer de l'agroécologie (Dufumier, 2016). Les assolements et les rotations culturales pourraient être diversifiés, rendant ainsi les agrosystèmes moins exposés aux maladies et ravageurs (réduction des produits phytosanitaires), participant de ce fait à une agriculture plus respectueuse de l'environnement. De nouvelles productions aux débouchés locaux, contribuant à une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), pourraient être introduites. Il s'agit notamment des légumineuses fourragères et alimentaires, afin de limiter l'importation de protéines végétales (soja par exemple) mais aussi parce qu'elles procurent une fertilisation azotée des sols, favorable à la culture suivante (Guinet *et al.*, 2019 ; Angus *et al.*, 2015). Il conviendrait de ne pas négliger non plus l'agroforesterie, mode d'exploitation des terres offrant également des services écosystémiques (microclimat, apports de minéraux et de matière organique, biodiversité) utiles à la productivité des cultures, permettant un revenu supplémentaire pour l'exploitant et améliorant le bilan carbone de l'agriculture (Dupraz, Liagre, 2011). Une vigilance devra toutefois être portée quant à la réduction de lumière liée à l'ombre des arbres, pouvant affecter la photosynthèse. Les problématiques d'érosion des sols et de ruissellement devront également être intégrées en fonction des nouveaux assolements et des nouvelles pratiques agricoles identifiées comme les plus adaptées au changement climatique. Il en va de même pour les enjeux relatifs à la gestion de l'eau, notamment dans le cadre de l'irrigation. Des modes de gestion qui intègrent la diversité spatiale des propriétés des sols, avec une résolution géographique plus fine, seront primordiaux et plaident en faveur de programmes d'acquisition de donnés pédologiques renforcées et spatialisées. Par ailleurs, une attention particulière devra être portée à la diversité des conditions climatiques au sein des Plaines agricoles, en recourant à des mesures expérimentales et des descentes d'échelles, pour affiner la résolution des modèles climatiques régionaux jusqu'à l'échelle locale pour être véritablement opérationnel. Aussi, la modification des cycles végétatifs, les nouvelles pratiques et les cultures devront être remises en perspective par rapport aux composantes techniques (matériel et accès à la parcelle) et humaines (conditions de travail) du calendrier agricole.

45 De ce fait, il conviendra alors de trouver ce que nous pourrions appeler "la combinaison optimale" entre tous ces facteurs, afin de déterminer de façon théorique l'agrosystème de demain le plus adapté aux enjeux du développement durable et au changement

climatique. Une définition et une gestion de l'agrosystème abordée de façon spatiale, temporelle, intégrée, systémique et pluridisciplinaire prendrait alors tout son sens.

Recourir à des approches multi-modèles

46 Il convient de rappeler que toutes les simulations prédictives du climat sont soumises à des incertitudes (Guillemot, 2009 ; Hingray, Saïd, 2014) et offrent des enveloppes du possible variables d'un modèle à un autre. Pour consolider les premiers résultats présentés ci-dessus, nous envisageons donc de reproduire ces traitements avec les données sorties d'autres modèles climatiques, notamment les simulations DRIAS-2020 regroupant 12 couples modèles globaux/modèles régionaux (Soubeyroux, 2020) et, par la suite, avec les simulations régionales forcées par les modèles globaux du projet CMIP-6 lorsqu'elles seront disponibles. Les premiers résultats de cet ensemble de modèles exposent un réchauffement plus prononcé de 1°C que pour le précédent exercice, puisque dans le cas d'un scénario avec une croissance économique rapide fondée sur l'énergie fossile, il pourrait être de + 7°C (Braconnot *et al.*, 2019). Il conviendra également de tenir compte du fait que les modèles simulant le mieux le climat sur la période de référence sont ceux qui projettent le réchauffement le plus prononcé (Brown, Caldeira, 2017). Par conséquent, leurs simulations ne devront pas être négligées, puisque nos sociétés devront être en mesure de s'adapter au cas où elles se réaliseraient. Enfin, il conviendra, à partir des mêmes données extraites de la modélisation prédictive du climat, de confirmer les résultats en mobilisant un modèle de culture tel que STICS (Brisson *et al.*, 1998), permettant notamment d'estimer des potentiels de rendement.

Questionnement sur la rentabilité de l'agrosystème national par rapport aux enjeux mondiaux de la céréaliculture

47 La projection des conditions climatiques futures pour la production du blé tendre en France pose légitimement la question de l'avenir de la céréaliculture. La seule lecture agroclimatique et géographique ne permet pas de répondre à cette question puisque les composantes agissant sur ce système sont multiples (économiques, agronomiques, sociologiques, etc.). Cependant, il convient de rappeler que l'agrosystème céréalier national s'intègre dans un agrosystème mondial. La sécurité alimentaire internationale repose en grande partie sur la production du blé tendre. Par conséquent, dans l'optique d'une augmentation de la population mondiale à 10 milliards d'individus (FAO, 2018), la demande en blé tendre devrait rester importante alors même que les rendements stagnent dans plusieurs régions du globe. D'ailleurs, 75 % des pays dans le monde sont importateurs de blé tandis que les 5 premiers pays producteurs, dont la France, détiennent la moitié des productions mondiales. Dans un contexte économique et agroalimentaire inchangé et dans l'hypothèse où la filière céréalière française réussit son adaptation au changement climatique, ce constat pourrait garantir la rentabilité des systèmes d'exploitations céréaliers des plaines agricoles françaises. C'est pourquoi, comme le souligne Abis (2015), le blé pourrait constituer le "pétrole doré" de la France. Mais les incertitudes géopolitiques, qui pourraient être renforcées par le changement climatique, ne doivent pas être négligées et exposent la fragilité de la prospective. En témoigne par exemple l'impact sur l'économie mondiale en 2022 de la guerre entre l'Ukraine et la Russie.

Conclusion

48 Dans le cas d'une réduction des émissions de GES (scénario RCP 2.6), les conséquences sur la culture du blé tendre en France resteraient dans l'ensemble relativement contenues. Elles seraient plus prononcées sans réduction des émissions de GES (scénario RCP 8.5). Face à l'augmentation de la température, le cycle du blé pourrait être plus court d'un mois. La maturité physiologique interviendrait à la fin de la première décade de juin dans le sud du pays et au cours de la deuxième pour le nord. Dans le cas de variétés insensibles à la photopériode, cette avancée des stades pourrait être beaucoup plus prononcée. C'est surtout la phase du tallage qui serait réduite en durée, en raison de l'élévation de la température hivernale, ce qui pourrait engendrer une baisse du nombre d'épis/m².

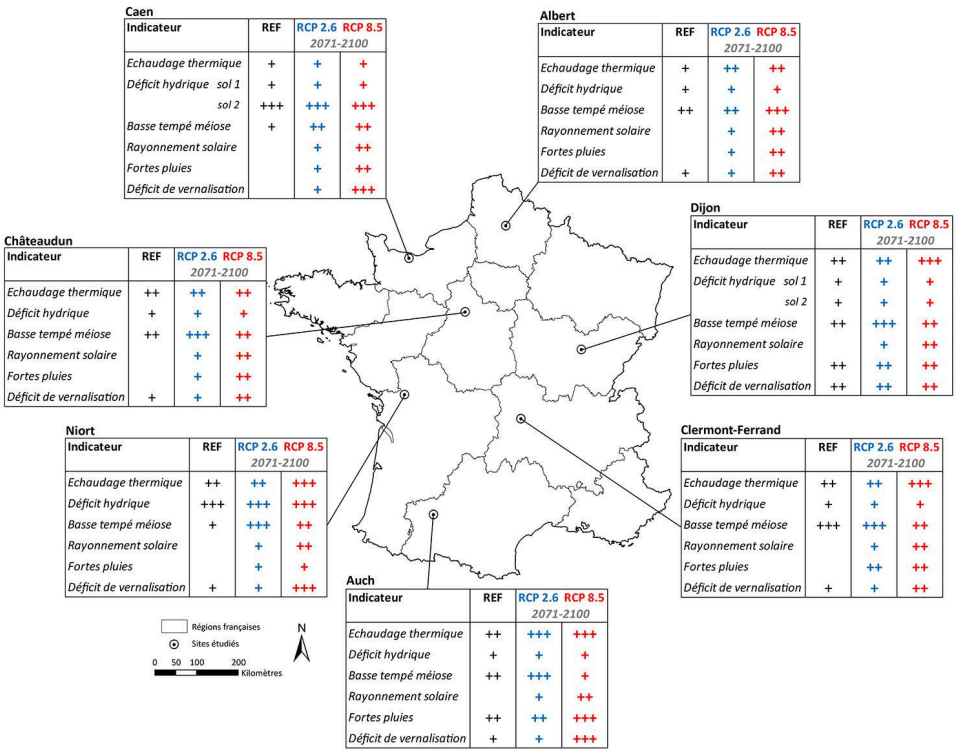
49 En conséquence, cette précocité permettrait au blé d'éviter les sécheresses estivales et de limiter la hausse annoncée de l'échaudage thermique pendant le remplissage des grains, même si des années extrêmes ne sont pas à exclure en raison de la variabilité naturelle interannuelle du climat. Il convient néanmoins de rappeler que les situations resteraient inégales entre les sites, en relation avec des conditions pédoclimatiques différentes (sols à faible capacité hydrique plus défavorisés). Les jours d'échaudage sur le cycle du blé dépasseraient en moyenne 15 jours à Auch et 10 jours pour les autres sites, à l'exception de Caen. Finalement, le blé ne réduirait pas plus qu'aujourd'hui son activité photosynthétique utile à la valorisation du CO_2 atmosphérique stimulant les rendements. Toutefois, l'augmentation des jours de chaleur en fin de cycle pourrait venir nuancer cette analyse pour le remplissage des grains.

50 Mais d'autres aléas météoclimatiques pourraient survenir. La montaison débutant plus tôt sur tous les sites, cette étape essentielle dans le développement de la plante pourrait manquer de rayonnement solaire, impactant négativement la croissance et le nombre de grains/m². La méiose se produirait en première partie de printemps, moment de l'année où les basses températures peuvent encore survenir et affecter la fertilité de la plante. Les sites de Caen, d'Albert et de Niort devront être attentifs à cet aléa car il est rare en période de référence. Les hivers de plus en plus doux engendreraient une réduction accrue du nombre de jours disponibles pour la vernalisation, moment crucial pour le passage du blé d'hiver de l'état végétatif à reproducteur. Enfin, il conviendra de rester vigilant face aux épisodes de très fortes pluies, associés à un risque de verse physiologique, qui pourraient survenir plus souvent. L'ensemble de cette analyse est synthétisé par la figure 9, qui expose l'évolution du potentiel bioclimatique du blé tendre à l'horizon 2100 pour chacun des sept sites.

51 Ainsi, grâce à son approche phénoclimatique et à la prise en compte de la diversité de la réserve hydrique des sols comme agents de modération/aggravation des conditions vécues par la plante, cette étude fait ressortir toute la complexité des conséquences possibles du changement climatique contemporain et surtout à venir. Cette approche systémique a notamment permis de quantifier objectivement les différences d'effet sur la culture du blé tendre pour un scénario avec contrôle des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6) ou au contraire sans maîtrise de ceux-ci (RCP 8.5). Contrairement à ce que nous pouvions attendre, les différences entre les projections climatiques "optimistes" et "pessimistes" ne sont pas si marquées car des interactions négatives

peuvent atténuer les risques en cas de plus fort réchauffement, avec notamment la plus grande précocité des cycles qui permet un évitement de la période estivale marquée par les stress liés à l'échaudage et à l'assèchement. Mais cette observation fondée sur les seules conditions biopédoclimatiques devra être complétée par la prise en compte de nouvelles contraintes, comme la progression des ravageurs et pathogènes qui accompagnent le changement climatique et menacent la filière agricole (Juroszek, Von Tiedemann, 2012). Pour s'adapter face à ces changements, la filière agricole dispose de plusieurs leviers, qui devront être mobilisés dans le cadre d'une gestion intégrée des agrosystèmes.

Figure 9 : Synthèse par approche experte de l'évolution de la vulnérabilité du blé aux aléas climatiques sur les 7 sites français étudiés entre la période de référence 1976-2005 et l'horizon lointain 2071-2100 pour les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 à partir des données CNRM-2014



François Beauvais, 2020

BIBLIOGRAPHIE

ABIS S., 2015, *Géopolitique du blé : un produit vital pour la sécurité mondiale*, Paris, Éditions IRIS Armand Colin, 269 p.

AGROPARISTECH., 2003, *Les céréales*, INA P-G, Département AGER, 86 p.

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998, "FAO Irrigation and drainage paper No. 56", *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Vol.56, No.97, 300 p.

AMAT J.P., COEUR C.L., DORIZE L., GAUTIER E., 2008, *Éléments de géographie physique*, Éditions Bréal, 461 p.

ANGUS J.F., KIRKEGAARD J.A., HUNT J.R., RYAN M.H., OHLANDER L., PEOPLES M.B., 2015, "Break crops and rotations for wheat", *Crop and Pasture Science*, Vol.66, No.6, 523-552.

ARROUAYS D., JOLIVET C., BOULONNE L., BODINEAU G., SABY N., GROLLEAU E., 2002, "Une initiative nouvelle en France : la mise en place d'un réseau institutionnel de mesure de la qualité des sols (RMQS)", *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, Vol.88, No.5, 93-103.

ARVALIS - INSTITUT DU VÉGÉTAL., 2017, *Blé tendre. Guide de culture*, 168 p.

ASSENG S., EWERT F., MARTRE P., RÖTTER R.P., LOBELL D.B., CAMMARANO D. *ET AL.*, 2015, "Rising temperatures reduce global wheat production", *Nature climate change*, Vol.5, No.2, 143-147.

ASSENG S., EWERT F., ROSENZWEIG C., JONES J.W., HATFIELD J.L., RUANE A.C. *ET AL.*, 2013, "Uncertainty in simulating wheat yields under climate change", *Nature climate change*, Vol.3, No.9, 827-832.

BEAUVAIS F., CANTAT O., MADELINE P., LE GOUÉE P., BRUNEL-MUGUET S., MEDJKANE M., 2019, "Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? - Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat", *Climatologie*, Vol.16, 129-160.

BEAUVAIS F., 2021, *Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver*, Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, 532 p.

BEAUVAIS F., CANTAT O., MADELINE P., 2021, "Le maïs ensilage dans le Grand-Ouest français face au changement climatique à l'horizon 2100", *Climatologie*, Vol.18, No.2, 13 p.

BEAUVAIS F., CANTAT O., LE GOUÉE P., BRUNEL-MUGUET S., MADELINE P., GAILLARD H., BATAILLE M.P., SALLENT A., PREUX T., MEDJKANE M., 2022, "Consequences of climate change on flax fiber in Normandy by 2100: prospective bioclimatic simulation based on data from the ALADIN-Climate and WRF regional models", *Theoretical and applied climatology*, 12 p.

BEGCY K., DRESSELHAUS T., 2018, "Epigenetic responses to abiotic stresses during reproductive development in cereals", *Plant reproduction*, Vol.31, No.4, 343-355.

BEN-ARI T., BOÉ J., CIAIS P., LECERF R., VAN DER VELDE M., MAKOWSKI D., 2018, "Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France", *Nature communications*, Vol. 9, No.1, 1-10.

BLOESH B., VIRET O., 2013, "Stades phénologiques repères des fruits à pépins (pommiers et poiriers)", *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, Vol.45, No.2, 128-131.

BONHOMME R., 2000, "Bases and limits to using 'degree.day' units", *European Journal of agronomy*, Vol.13, No.1, 1-10.

BOUMA J., 1989, "Using soil survey data for quantitative land evaluation", in: Stewart B.A., *Advances in soil science*, Springer, Vol.9, 177-213.

BRACONNOT P., BOUCHER O., SALAS Y MÉLIA D., 2019, "Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations", conférence de presse du 17 septembre 2019.

BRISSON N., GATE P., GOUACHE D., CHARMET G., OURY F.X., HUARD F., 2010, "Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France", *Field Crops Research*, Vol.119, No.1, 201-212.

BRISSON N., LEVRAULT F., 2010, *Livre vert du projet Climator 2007-2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, ADEME Éditions, 336 p.

BROWN P.T., CALDEIRA K., 2017, "Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget", *Nature*, Vol.552, No.7683, 45-50.

CAM C., 2007, *Carte des pédopaysages des Deux-Sèvres - Référentiel Pédologique du département des Deux-Sèvres (Étude n°25079).*

CANTAT O., 2015a, *Proposition méthodologique pour une approche globale et objective des types de temps en France métropolitaine. Étude de climatologie physionomique et appliquée*, 264 p.

CANTAT O., 2015b, *La diversité spatio-temporelle du climat bas-normand et ses impacts environnementaux et sociétaux*, Paris, Université Paris 7 Diderot, 288 p.

CANTAT O., LE GOUÉE P., BENSAÏD A., 2009, "Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques", *Journées de climatologie. Climat et société : climat et relief*, 19 p.

CAUBEL J., DE CORTÁZAR-ATAURI I.G., LAUNAY M., DE NOBLET-DUCOUDRÉ N., HUARD F., BERTUZZI P. *ET AL.*, 2015, "Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.207, 94-106.

CAUBEL J., DE CORTAZAR-ATAURI I.G., VIVANT A.C., LAUNAY M., DE NOBLET-DUCOUDRÉ N., 2017, "Assessing future meteorological stresses for grain maize in France", *Agricultural Systems*, Vol.159, 237-247.

CHRÉTIEN J., MEUNIER D., 1998, *Référentiel Pédologique de Bourgogne : Régions naturelles, pédopaysages et sols de Côte d'Or (Étude n°25021).*

DEBAEKE P., GAUFFRETEAU A., DUREL C.E., JEUFFROY M.H., 2014, "Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux", *Agronomie, Environnement & Sociétés*, Vol.4, No.2, 65-73.

DÉQUÉ M., DREVETON C., BRAUN A., CARIOLLE D., 1994, "The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling", *Climate Dynamics*, Vol.10, No.4, 249-266.

DOBLER C., HAGEMANN S., WILBY R.L., STÖTTER J., 2012, "Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections in an Alpine watershed", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.16, No. 11, 4343-4360.

DONALD C.T., 1968, "The breeding of crop ideotypes", *Euphytica*, Vol.17, No.3, 385-403.

DOORENBOS J., 1977, "Guidelines for predicting crop water requirements", *FAO irrigation and drainage paper*, Vol.24, 1-179.

DUBREUIL V., MEME K., BONNARDOT V., AUBERT J.F., VERGER A.C., MELEC D., 2019, "Changement climatique et dates de floraison des pommiers dans le val de Rance (Bretagne)", in: *XXXIIème Colloque International de l'AIC : Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques,* Vol.32, 83-88.

DUFUMIER M., 2016, "L'agriculture française de demain", *Pour*, No.4, 261-267.

DUPRAZ C., LIAGRE F., 2011, *Agroforesterie : des arbres et des cultures*, Paris, Groupe France Agricole, 432 p.

DURAND R., 1969, "Signification et portée des sommes de températures", *Bulletin Technique d'Information-Ministère de l'Agriculture*, No.238, 185-190.

FAO, 2018, *Climate change and food security: risks and response*, Rome.

GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., MAURY O., 2019, "GETARI : Generic Evaluation Tool of AgRoclimatic Indicators".

GATE P., 1995, *Écophysiologie du blé tendre. De la plante à la culture*, Paris, 429 p.

GATE P., BLONDLOT A., GOUACHE D., DEUDON O., VIGNIER L., 2008, "Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France - Quelles solutions et quelles actions à développer ?", *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, Vol.15, No.5, 332-336.

GATE P., BRISSON N., GOUACHE D., 2010, "Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d'abord une origine climatique", *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, Vol.96, No.3, 17-23.

GATE P., GIGAN M., BLONDIOT A., BRAUM P., COULEAUD G., JOUY L. *ET AL.*, 2003, *Stades du blé - Institut technique des céréales et des fourrages – ARVALIS*, Arvalis - Institut du végétal, 69 p.

GATE P., VIGNIER L., VADON B., MINOV D., LAFARGA A., ZAIRI M., 1996, "Céréales en milieu méditerranéen un modèle pour limiter les risques climatiques", *Perspectives agricoles*, Vol.27, 59-66.

GEVERS C., VAN RIJSWICK H.F., SWART J., 2019, "Peasant seeds in France: fostering a more resilient agriculture", *Sustainability*, Vol.11, No.11, 3014.

GIBELIN A.L., 2015, "Évolution du climat passé en France métropolitaine depuis les années 1950", *Rencontres nationales de l'agrométéorologie, session Agriculture et Changement climatique*, 22 p.

GIBELIN A.L., DUBUISSON B., CORRE L., DEAUX N., JOURDAIN S., LAVAL L. *ET AL.*, 2014, "Évolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence", *La Météorologie*, No.87, 45-53.

GIROTS G., 2009, *Référentiel Régional Pédologique d'Eure-et-Loir (Etude n°25028).*

GOLDRINGER I., ENJALBERT 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*, No.1, 153-161.

GOUACHE D., BOGARD M., PEGARD M., THEPOT S., GARCIA C., HOURCADE D. *ET AL.*, 2017, "Bridging the gap between ideotype and genotype: Challenges and prospects for modelling as exemplified by the case of adapting wheat (Triticum aestivum L.) phenology to climate change in France", *Field Crops Research*, Vol.202, 108-121.

GOUACHE D., LE BRIS X., BOGARD M., DEUDON O., PAGÉ C., GATE P., 2012, "Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France", *European Journal of Agronomy*, Vol.39, 62-70.

GUILLEMOT H., 2009, "Comment évaluer un modèle numérique de climat ?", *Revue d'anthropologie des connaissances*, Vol.3, No.2, 273-293.

GUINET M., NICOLARDOT B., DUREY V., REVELLIN C., LOMBARD F., PIMET E. *ET AL.*, 2019, "Fixation symbiotique de l'azote et effet précédent : toutes les légumineuses à graines se valent-elles ?", *Innovations Agronomiques*, Vol.74, 55-68.

GUO R., LIN Z., MO X., YANG C., 2010, "Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain", *Agricultural Water Management*, Vol.97, No.8, 1185-1194.

GUTTERMAN Y., 2000, "Maternal effects on seeds during development", *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, Vol.2, 410.

HARRISON P.A., BUTTERFIELD R.E., 1996, "Effects of climate change on Europe-wide winter wheat and sunflower productivity", *Climate Research*, Vol.7, No.3, 225-241.

HATZIG S.V., NUPPENAU J.N., SNOWDON R.J., SCHIESSL S.V., 2018, "Drought stress has transgenerational effects on seeds and seedlings in winter oilseed rape (Brassica napus L.)", *BMC plant biology*, Vol. 18, No.1, 1-13.

HINGRAY B., SAÏD M., 2014, "Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections", *Journal of Climate*, Vol.27, No.17, 6779-6798.

HOLZKÄMPER A., CALANCA P., FUHRER J., 2011, "Analyzing climate effects on agriculture in time and space", *Procedia Environmental Sciences*, Vol.3, 58-62.

HOLZKÄMPER A., CALANCA P., FUHRER J., 2013, "Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.168, 149-159.

HOLZKÄMPER A., FOSSATI D., HILTBRUNNER J., FUHRER J., 2015, "Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland", *Regional Environmental Change*, Vol.15, No.1, 109-122.

IPCC., 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, PACHAURI R.K., MEYER L.A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPCC., 2021, "Summary for Policymakers", in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S.L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARb L., GOMIS M.I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J.B.R., MAYCOCK T.K., WATERFIELD T., YELEKÇI O., YU R., ZHOU B. (eds.)], Cambridge University Press, In Press.

JENKS G.F., 1977, "Optimal data classification for choropleth maps occasional paper no 2", *University of Kansas*, Department of Geography.

JOLIVET C., ALMEIDA FALCON J.L., BERCHE P., BOULONNE L., FONTAINE M., GOUNY L., LEHMANN S., MAITRE B., RATIÉ 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., [en ligne]. URL : http://www.gissol.fr/wp-content/uploads/2018/03/Manuel_V_Num2.pdf

JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P., 2010, "Les types de climats en France, une construction spatiale", *Cybergeo: European Journal of Geography*.

JU H., XIONG W., XU Y.L, LIN E.D., 2005, "Impacts of climate change on wheat yield in China", *Acta Agronomica Sinica*, Vol.31, 1340-1343.

JUROSZEK P., VON TIEDEMANN A., 2013, "Climate change and potential future risks through wheat diseases: a review", *European Journal Plan Pathology*, Vol.136, 21-33.

KUMAR S.N., AGGARWAL P.K., RANI D.S., SAXENA R., CHAUHAN N., JAIN S., 2014, "Vulnerability of wheat production to climate change in India", *Climate Research*, Vol.59, No.3, 173-187.

LÄMKE J., BÄURLE I., 2017, "Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress memory in plants", *Genome biology*, Vol.18, No.1, 1-11.

LANCASHIRE P.D., BLEIHOLDER H., BOOM T. VAN DEN, LANGELÜDDEKE P., STAUSS R., WEBER E. *ET AL.*, 1991, "A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds", *Annals of applied Biology*, Vol.119, No. 3, 561-601.

LE GOUÉE P., 2016, *Référentiel Régional Pédologique du Calvados (Etude n°30234)*.

LIU Y., TAO., 2012, "Probabilistic Assessment and Uncertainties Analysis of Climate Change Impacts on Wheat Biomass[J] ", *Acta Geographica Sinica*, Vol.67, No.3, 337-345.

LUO Q., BELLOTTI W., WILLIAMS M., BRYAN B., 2005, "Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.132, No.3-4, 273-285.

MAGRIN G.O., TRAVASSO M.I., RODRIGUEZ G.R., SOLMAN S., NUNEZ M., 2009, "Climate change and wheat production in Argentina", *International Journal of Global Warming*, Vol.1, No.1-3, 214-226.

MARIE M., BERMOND M., MADELINE P., COINAUD C., 2015, "Une typologie des combinaisons d'utilisation agricole du sol en France en 2010 : propositions méthodologiques", *M@ppemonde*, No.114, 24 p.

MKHABELA M., BULLOCK P., GERVAIS M., FINLAY G., SAPIRSTEIN H., 2010, "Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies", *Agricultural and Forest meteorology*, Vol.150, No.3, 399-410.

MOSSAD M.G., ORTIZ-FERRARA G., MAHALAKSHMI V., FISCHER R.A., 1995, "Phyllochron response to vernalization and photeperiod in spring wheat", *Crop Science*, Vol.35, No.1, 168-171.

OUZEAU G., DÉQUÉ M., JOUINI M., PLANTON S., VAUTARD R., 2014, *Le climat de la France au XXIe siècle*, Vol.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.

PARTY J., MULLER N., VAUTHIER Q., RIGOU L., TOUTAIN L., LEHMANN S. *ET AL.*, 1979, *Référentiel Régional Pédologique de Midi-Pyrénées : Département du Gers (Etude n°32232)*.

RAY D.K., RAMANKUTTY N., MUELLER N.D., WEST P.C., FOLEY J.A., 2012, "Recent patterns of crop yield growth and stagnation", *Nature communications*, Vol.3, No.1, 1-7.

QIAN B., ZHANG X., SMITH W., GRANT B., JING Q., CANNON A.J. *ET AL.*, 2019, "Climate change impacts on Canadian yields of spring wheat, canola and maize for global warming levels of 1.5 C, 2.0 C, 2.5 C and 3.0 C", *Environmental Research Letters*, Vol.14, No.7, 14074005.

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*, Vol.8, No.1, 1-12.

Semenov M.A., 2009, "Impacts of climate change on wheat in England and Wales", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol.6, 343-350.

SEMENOV M.A., STRATONOVITCH P., 2015, "Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections", *Climate Research*, Vol.65, 123-139.

SENAPATI N., STRATONOVITCH P., PAUL M.J., SEMENOV M.A., 2019, "Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe", *Journal of experimental botany*, Vol.70, No.9, 2549-2560.

SOUBEYROUX J.M., BERNUS S., CORRE L., DROUIN A., DUBUISSON B., ETCHEVERS P. *ET AL.*, *Les nouvelles projections climatiques de référence. DRIAS 2020 pour la métropole*, Météo France, 97 p.

SPIRIDONOV V., DÉQUÉ M., SOMOT S., 2005, "ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date", *ALADIN Newsletter*, Vol.29, 89-92.

SPRINGER N.M., 2013, "Epigenetics and crop improvement", *Trends in genetics*, Vol.29, No.4, 241-247.

SOMMER R., GLAZIRINA M., YULDASHEV T., OTAROV A., IBRAEVA M., MARTYNOVA L. *ET AL.*, 2013, "Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia", *Agriculture, ecosystems & environment*, Vol. 178, 78-99.

SUC O., ANCELIN O., DECOSTER Y., ROLLE C., ROUSSEAU S., THOMAS M. *ET AL.*, 2017, *Référentiel Régional pédologique du département de la Somme (Etude n°25080)*.

TAO F., ZHANG Z., 2013, "Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection", *Agricultural and forest meteorology*, Vol.170, 146-165.

THAKUR P., KUMAR S., MALIK J.A., BERGER J.D., NAYYAR H., 2010, "Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview", *Environmental and Experimental Botany*, Vol.67, No.3, 429-443.

THALER S., EITZINGER J., TRNKA M., DUBROVSKY M., 2012, "Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe", *The Journal of Agricultural Science*, Vol.150, No.5, 537-555.

THORNTWAITE C.W., MATHER J., 1955, *The water balance*, 104 p.

TRNKA M., RÖTTER R.P., RUIZ-RAMOS M., KERSEBAUM K.C., OLESEN J.E., ŽALUD Z. *ET AL.*, 2014, "Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change", *Nature Climate Change*, Vol.4, No.7, 637-643.

TRNKA M., HLAVINKA P., SEMENOV M.A., 2015, "Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol.12, No.112, 20150721.

TUBIELLO F.N., ROSENZWEIG C., GOLDBERG R.A., JAGTAP S., JONES J.W., 2002, "Effects of climate change on US crop production: simulation results using two different GCM scenarios. Part I: wheat, potato, maize, and citrus", *Climate research*, Vol.20, No.3, 259-270.

TURC L., 1961, "Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle", *Annales Agronomiques*, Vol.12, 13-49.

VAN VUUREN D.P., EDMONDS J., KAINUMA M., RIAHI K., THOMSON A., HIBBARD K. *ET AL.*, 2011, "The representative concentration pathways: an overview", *Climatic change*, Vol.109, No.1, 5-31.

VASHISHT B.B., MULLA D.J., JALOTA S.K., KAUR S., KAUR H., SINGH S., 2013, "Productivity of rainfed wheat as affected by climate change scenario in northeastern Punjab, India", *Regional Environmental Change*, Vol.13, No.5, 989-998.

VOLDOIRE A., SANCHEZ-GOMEZ E., Y MÉLIA D.S., DECHARME B., CASSOU C., SÉNÉSI S. *ET AL.*, 2013, "The CNRM-CM5. 1 global climate model: description and basic evaluation", *Climate dynamics*, Vol.40, No.9, 2091-2121.

WANG B., FENG P., LI LIU D., WATERS C., 2020, "Modelling biophysical vulnerability of wheat to future climate change: A case study in the eastern Australian wheat belt", *Ecological Indicators*, Vol.114, 106290.

WANG J., WANG E., LUO Q., KIRBY M., 2009, "Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia", *Climatic Change*, Vol.96, No.1, 79-96.

WEBBER H., EWERT F., OLESEN J.E., MÜLLER C., FRONZEK S., RUANE A.C. *ET AL.*, 2018, "Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe", *Nature communications*, Vol.9, No.1, 1-10.

WILCOX J., MAKOWSKI D., 2014, "A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies", *Field Crops Research*, Vol.156, 180-190.

ZHANG X.C., LIU W.Z., 2005, "Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.131, No.3-4, 127-142.

NOTES

1. [en ligne]. URL : https://meteofrance.com/climathd
2. La sélection de ces sites a été déterminée en croisant la cartographie des données du Registre Parcellaire Graphique 2016 (méthode exposée dans Marie *et al.*, 2014) dans des mailles de 2500 ha, avec la cartographie des climats français de Joly *et al.*, 2010 et de Cantat, 2015.
3. 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 8x8 km.
4. Les parts du sol en Argiles, Limons et Sables ont été reportées sur le diagramme de Jamagne (Jamagne, 1977)
5. "La phénologie est l'étude de l'apparition d'événements annuels périodiques dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat. Chez les végétaux, les différentes étapes constituant ces événements sont par exemple le développement foliaire, la floraison et la fructification aboutissant à la maturation des fruits" (Bloesh, Viret, 2013).
6. La méiose pollinique est une phase qui correspond aux étapes de formation du pollen. Les aléas climatiques auxquels elle est sensible peuvent pénaliser la fertilité du blé tendre.
7. https://www.arvalis-infos.fr/stress-climatique-recent-a-meiose-et-floraison-les-processus-physiologiques-en-jeu-@/view-10280-arvarticle.html
8. L'ETR correspond à l'évapotranspiration réelle et l'ETM à l'évapotranspiration maximale.
9. Tous les paramètres nécessaires pour la formule de Penman ne sont pas disponibles en sortie de la simulation CNRM-2014. Par défaut, nous utilisons celle de Turc.

RÉSUMÉS

Cinquième pays producteur de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) dans le monde, la France subit depuis le milieu des années 1990 le changement climatique qui perturbe la filière céréalière, avec d'ores et déjà une stagnation des rendements attribuée en partie à une augmentation des jours de chaleur et des sécheresses. Cet article examine l'évolution du potentiel bioclimatique du blé tendre aux horizons 2070 et 2100 pour 7 sites représentatifs de la céréaliculture française. L'approche phénoclimatique mobilisée pour cette étude consiste à simuler le cycle de la plante et à calculer l'occurrence des aléas climatiques sur les phases sensibles du cycle à partir des données extraites du modèle climatique régional ALADIN-Climat de Météo-France. Les résultats nuancent certaines craintes attendues sur la pérennité du blé tendre mais soulignent aussi l'apparition de nouveaux aléas, en raison notamment d'une modification de la durée des périodes phénologiques. Cette recherche illustre la nécessité des études d'impact prospectives en climatologie, selon une approche systémique et pluridisciplinaire (géographie, climatologie,

agronomie, pédologie) pour envisager rationnellement l'adaptation des agrosystèmes au changement climatique.

The world's fifth largest producer of common wheat (*Triticum aestivum* L.), France, has been affected since the mid-1990s by climate change, which is disruptive to the cereal industry, with yields already stagnating, partly due to an increase in hot days and droughts. This article examines the evolution of the bioclimatic potential of this cereal in 2070 and 2100 for 7 sites representative of French cereal growing. The phenoclimatic approach used for this study consists of simulating the plant cycle and calculating the occurrence of climatic hazards on the sensitive phases of the cycle from data extracted from the regional climate model ALADIN-Climat of Météo-France. The results alleviate some of the expected concerns about the sustainability of soft wheat, but also highlight the appearance of new hazards, particularly due to a change in the length of the phenological periods. This research illustrates the need for prospective impact studies in climatology, using a systemic and multidisciplinary approach (geography, climatology, agronomy, pedology) to rationally consider the adaptation of agrosystems to climate change.

Francia es el quinto productor mundial de trigo blando (Triticum aestivum L.). El país ha experimentado desde mediados de la década de 1990, los efectos del cambio climático perturbándose el sector cerealero que expresa rendimientos estancados atribuidos en parte al incremento de los días de calor y sequías. Este artículo examina la evolución del potencial bioclimático del trigo blando entre 2070 y 2100 en siete áreas representativas del cultivo de cereales en Francia. Desde un enfoque fenoclimático, se simula el ciclo de la planta calculando la ocurrencia de amenazas climáticas en las fases sensibles del ciclo, según datos extraídos del modelo climático regional ALADIN-Climat de Météo-France. Los resultados, si bien matizan ciertos temores esperados sobre la sustentabilidad del trigo, subrayan la emergencia de nuevas amenazas, particularmente producto de una alteración en la duración de los períodos fenológicos. Esta investigación, expresa la necesidad de contar con estudios prospectivos en el campo de la climatología, considerando un enfoque sistémico y multidisciplinario (geografía, climatología, agronomía, pedología) y así contribuir al conocimiento de la adaptación de los agrosistemas al cambio climático.

INDEX

geographyun 908, 926, 250
Palabras claves : cambio climático, modelización, prospectiva, agrosistema, clima
Keywords : climate change, modeling, prospective, agrosystem, climate
Mots-clés : changement climatique, modélisation, prospective, agrosystème, climat

AUTEURS

FRANÇOIS BEAUVAIS

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France.
Normandie Université, UNICAEN, CNRS, ESO, 14000 Caen, France.
francois.beauvais@unicaen.fr

OLIVIER CANTAT

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France.
olivier.cantat@unicaen.fr

PATRICK LE GOUÉE

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France.
patrick.legouee@unicaen.fr

PHILIPPE MADELINE

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, ESO, 14000 Caen, France.
philippe.madeline@unicaen.fr

SOPHIE BRUNEL-MUGUET

Normandie Université, UNICAEN, INRAE, EVA, 14000 Caen, France.
sophie.brunel-muguet@unicaen.fr

LINE BOULONNE

INFOSOL, INRAE, 45075, Orléans, France.
line.boulonne@inrae.fr

HERVÉ GAILLARD

INFOSOL, INRAE, 45075, Orléans, France.
herve.gaillard@inrae.fr

CLAUDY JOLIVET

INFOSOL, INRAE, 45075, Orléans, France.
claudy.jolivet@inrae.fr

MARIE-PAULE BATAILLE

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France.
marie-paule.bataille@unicaen.fr

MOHAND MEDJKANE

Normandie Université, UNICAEN, CNRS, IDEES, 14000 Caen, France.
mohand.medjkane@unicaen.fr