



HAL
open science

Analyse de l'évolution des risques climatiques dans un contexte de changement climatique et de l'évolution de la répartition géographique des bassins de production : Application au cas de la culture du blé tendre en France

Alexis Durand

► To cite this version:

Alexis Durand. Analyse de l'évolution des risques climatiques dans un contexte de changement climatique et de l'évolution de la répartition géographique des bassins de production : Application au cas de la culture du blé tendre en France. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. hal-03438933

HAL Id: hal-03438933

<https://hal.inrae.fr/hal-03438933v1>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

**ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES
RISQUES CLIMATIQUES DANS UN
CONTEXTE DE CHANGEMENT
CLIMATIQUE ET DE L'ÉVOLUTION DE
LA REPARTITION GEOGRAPHIQUE
DES BASSINS DE PRODUCTION :**
Application au cas de la culture du blé
tendre en France.

Alexis DURAND

Résumé

Avec l'intensification des activités humaines, le climat mondial subit de profonds changements, qui modifient les conditions de production agricole. La sélection variétale apparaît comme l'une des réponses face à cet enjeu. En effet, elle permet notamment de sélectionner des individus plus résistants face à une menace, ici le changement climatique. Pour ce faire, il est essentiel de connaître les critères sur lesquels doit porter l'amélioration variétale. L'objectif de cette étude est donc d'analyser quels sont les risques climatiques que devra affronter le blé tendre demain au niveau métropolitain et ainsi de déterminer si les bassins de production français actuels sont modifiés ou non. Les résultats de celle-ci ont montré que dans le futur proche, les conditions climatiques de croissance du blé étaient peu modifiées. En revanche, à horizon 2100, les risques climatiques sont de plus en plus nombreux et sévères. De ce fait, certaines zones géographiques de France pourraient présenter des conditions climatiques extrêmes et ainsi ne plus pouvoir accueillir cette culture.

Mots-clés : changement climatique, blé tendre, indicateur écoclimatique, risques climatiques

Abstract

Due to human activities intensification, world climate is undergoing big changes. Thus, we are now in an era of climatic upheavals which directly threat the global food security. The challenge for agronomic research is colossal to ensure quality food for 10 billion people by the end of the century. Climatic conditions aren't editable, the soil can't ensure good physico-chemical properties on the long term, the varietal selection is considered as the best response to this issue. Indeed, it allows in particular selecting more resistant individuals in the face of a threat, as the climate change. For that, it's essential knowing criterias on which varietal improvement must relate. The aim of this study is analyzing which are the climate risks that wheat will have to face tomorrow at the metropolitan level and so determining areas more or less favourable at his implantation by the end of the century. Results demonstrated that in the near future, climatic conditions wouldn't be extremely modified. In contrast, by the end of the century, climatic risks will be expected more numerous and more violent. More, few regions of France could present extreme climatic conditions and so no longer being able to accommodate this crop.

Key-words : climate change, soft wheat, ecoclimatic indicator, climatic risks

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Marie Launay, ma maîtresse de stage, avec qui cette expérience professionnelle s'est parfaitement bien déroulée. J'ai apprécié mener ce stage sous son encadrement. Très pédagogue, Marie a su m'encadrer parfaitement que ce soit au niveau du stage en lui-même mais aussi au niveau de la rédaction de ce mémoire. J'ai également très apprécié ses qualités humaines, qui ont fait que ces 6 mois se sont déroulés dans la bonne humeur, sans aucun stress particulier.

Ensuite, j'adresse mes remerciements à Célia Seassau, qui a su faire preuve de rigueur, de pédagogie et d'un grand accompagnement pour réaliser au mieux ce mémoire. Ses conseils dans la matière ont été très bénéfiques et m'ont permis de progresser très franchement dans le domaine.

Un grand merci à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce stage. Je pense à toutes les personnes de l'unité Agroclim et Emmah qui ont su m'accueillir au sein de leurs locaux, avec qui j'ai entretenu de très bonnes relations malgré la crise sanitaire du Covid19. Je pense également à toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger au cours de mon stage, en particulier Mr Deswarte Jean-Charles, Mme Bancal Marie Odile, Mme Chenu Karine, Mme De Noblet-Ducoudré Nathalie, Mr Garcia de Cortazar Atauri Inaki.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu tout au long de cette expérience et lors de la rédaction de ce mémoire.

Table des sigles et abréviations

CO₂ : Dioxyde de carbone

ppm : parties par millions

°C : Degré Celsius

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

GES : Gaz à Effet de Serre

W : Watt

m² : mètre carré

km = kilomètre

CH₄ : Méthane

NO₂ : Dioxyde d'azote

ppb : parties par billion

RCP : Representative Concentration Pathways

% : pourcent

mm : millimètre ou litres d'eau/m²

SAU : Surface Agricole Utile

t : tonne

ha : hectare

€ : euro

q : quintal

cm : centimètre

PMG : Poids de Mille Grains

SWC : Soil Water Content

GICS : Global Indicator for Crop Suitability

REGARD : RechErche d'analogues climatiques pour sélectionner Demain

LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

ETR : Evapotranspiration Réelle

ETP : Evapotranspiration Potentielle

CC : Capacité au Champ

TT : Variété Tardive-Tardive

TP : Variété Tardive-Précoce

PT : Variété Précoce-Tardive

PP : Variété Précoce-Précoce

RU : Réserve utile (en mm)

Kc : Coefficient cultural de la culture

Ks : Coefficient de stress

CLC : Corine Land Cover

MJ : Méga Joules

Tmin : Température minimale

Tmoy/Tmean: Température moyenne

Tmax : Température maximale

BBCH : Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie

Sommaire

Introduction générale

Partie 1 : Le changement climatique et ses impacts en agriculture

Partie 2 : Matériel et méthodes

Partie 3 : Résultats

Partie 4 : Discussion, perspectives et limites de l'étude

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Introduction

Aujourd'hui, l'agriculture doit relever un défi majeur, nourrir 9 à 10 milliards de personnes dans un futur proche tout en continuant à garantir des produits de qualité pour tous. Plusieurs facteurs viennent mettre en porte à faux la capacité du secteur agricole à relever cet enjeu. Tout d'abord, de plus en plus de terres sont destinées à un usage non-agricole, cause de l'agrandissement urbain. Ensuite, les sols agricoles tendent à se dégrader, via des problèmes de salinité, de pollution aux nitrates, aux pesticides ... ce qui limite leur potentiel de production. De plus, nous assistons à une stagnation des rendements pour bon nombre de cultures représentant la quasi-totalité des calories mondiales. Cette stagnation peut s'expliquer par l'essoufflement du progrès génétique, la modification des pratiques culturales, l'appauvrissement des sols ... Cependant, une autre menace bien visible est apparue au cours des dernières décennies. Il s'agit du changement climatique. Ce phénomène, longtemps mis à l'écart au profit d'une industrialisation croissante, pose aujourd'hui un défi majeur pour notre agriculture et donc notre sécurité alimentaire. Ses impacts sont bel et bien visibles depuis quelques années (multiplication des phénomènes climatiques extrêmes, effondrement des rendements agricoles, catastrophes meurtrières ...) et l'agriculture apparaît comme la première activité économique impactée. En effet, une perturbation climatique sur une courte période du cycle de culture se répercute à l'ensemble de la filière jusqu'au prix pratiqué au consommateur. Les deux principaux effets du changement climatique notables à ce jour dans le secteur agricole sont la stagnation des rendements et l'avancée de la phénologie. Certaines années, les extrêmes climatiques peuvent même causer la perte intégrale ou partielle d'une culture. Pour pouvoir s'adapter le plus rapidement possible à cette menace d'ampleur inédite, la sélection variétale apparaît comme l'un des moyens les plus efficaces. En effet, elle permet de sélectionner des plantes capables d'affronter une contrainte venant perturber leur croissance, les modifications climatiques apparaissant comme la contrainte majeure. Or, pour aboutir à un système de production efficace et pérenne, il est crucial de connaître les critères de résistance climatique à mettre en place. Pour cela, il faut auparavant analyser l'évolution spatiale (au niveau métropolitain) et temporelle (dans le futur proche et dans le futur lointain) des variables climatiques selon les projections climatiques futures basées sur les scénarios du GIEC. C'est sur ce thème là que plusieurs acteurs du monde agricole (sélectionneurs, organismes de recherche, institut du végétal), ont mis en place le projet REGARD. Ce dernier vise à analyser l'évolution des conditions de croissance du blé tendre dans un contexte de changement climatique afin de proposer aux sélectionneurs une méthodologie à mettre en œuvre pour obtenir des variétés résistantes aux conditions climatiques futures.

Ce mémoire est organisé en quatre parties. La première est une présentation du contexte général de l'étude lié au changement climatique, à ses impacts en agriculture et plus précisément sur l'écophysiologie du blé. La seconde partie détaille la méthodologie mise en place et les outils utilisés afin de répondre à la problématique. Les résultats sont présentés dans la troisième partie. Enfin, la dernière partie consiste en une discussion, un regard critique sur les résultats obtenus ainsi que les perspectives de l'étude.

Partie 1 : Le changement climatique et ses impacts en agriculture

I.1 Le changement climatique : causes anthropiques et projections climatiques futures

I.1.1. Les activités humaines et l'effet de serre : un fort impact sur le changement climatique

I.1.1.1 Du paléoclimat au climat récent

I.1.1.1.a. Le paléoclimat : des variations cycliques

Le paléoclimat a permis de mettre en évidence l'origine anthropique du climat que nous connaissons depuis plusieurs décennies. Il s'agit de l'étude du climat passé, sur une longue période (jusqu'à plusieurs millions d'années). Afin de l'étudier, le carottage glaciaire s'avère être un des principaux moyens. La Figure 1 présente la fluctuation de la concentration en CO₂ entre -800000 ans et aujourd'hui. Celle-ci a fluctué entre 150 et 260ppm. La courbe des températures suit sensiblement la même allure que celle de la concentration en CO₂, traduisant le fait que ces variables sont étroitement corrélées.

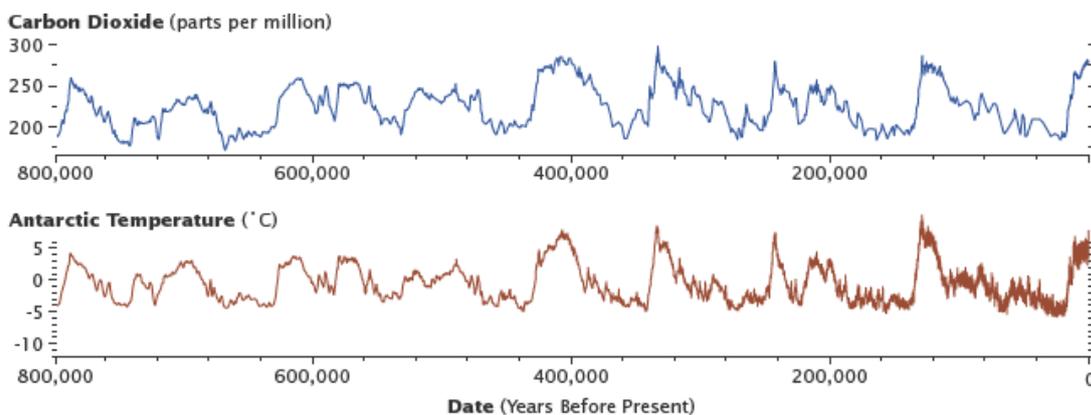


Figure 1 : Evolution de la concentration en CO₂ et des températures en Antarctique les 800 000 dernières années (NASA, 2019).

I.1.1.1.b. L'impact des activités humaines sur l'évolution rapide du climat

Aujourd'hui, une entrée en glaciation aurait dû se produire mais celle-ci est contrée par les activités humaines qui représentent la première cause du réchauffement actuel. C'est d'ailleurs à cet égard que l'ère présente est désignée comme celle de l'anthropocène. Ce terme, adopté en 2016, fait référence à l'impact des activités humaines sur les cycles naturels en mettant l'humain comme premier perturbateur des cycles naturels (Waters *et al.*, 2016). Selon Waters *et al.* (2016) les modifications climatiques actuelles sont donc bien la résultante de l'explosion des activités humaines. La Figure 2 en témoigne. En effet lorsqu'il s'agit des seules causes naturelles, la variabilité climatique reste très faible (0,2°C d'écart lors

d'importantes éruptions), alors que depuis l'industrialisation, la température augmente de manière exponentielle, pour atteindre +1°C en 2020 (par rapport à la fin du 19^{ème} siècle).

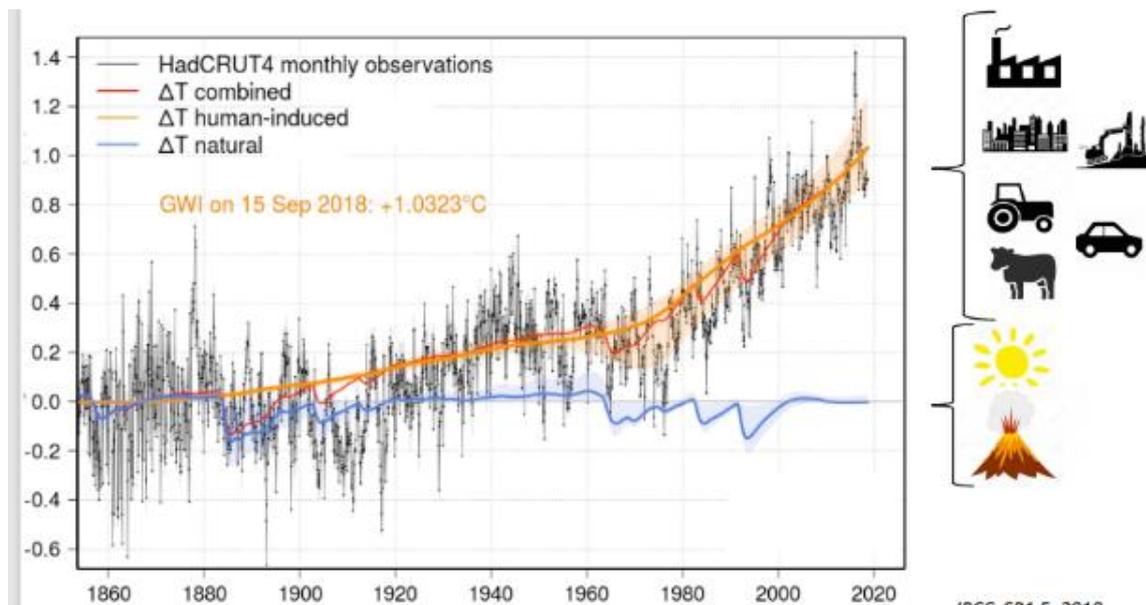


Figure 2 : Evolution des températures à la surface du globe entre 1860 et 2020 selon la source de perturbation du climat. La courbe noire représente les observations de température, la courbe bleue les modifications de température causées par les seuls facteurs naturels et la courbe orange les modifications de température causées par les activités humaines en plus des facteurs naturels (IPCC 2018).

I.1.1.2. L'effet de serre, moteur du climat sur Terre

I.1.1.2.a. Définition et explication du phénomène

L'effet de serre est un phénomène naturel provoquant une élévation de la température à la surface de notre planète. Sans ce phénomène, la vie sur Terre serait impossible puisque la température moyenne à sa surface serait de -19°C au lieu des 15°C que nous connaissons (Météo France, 2020). Il s'agit d'un bilan d'énergie entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant de l'atmosphère (Météo France, 2020). Les deux tiers du rayonnement solaire (courtes longueurs d'ondes) sont absorbés par l'atmosphère, les sols et les océans. Le tiers restant est directement réfléchi vers l'espace par la surface, les nuages, les aérosols et l'atmosphère. L'atmosphère et la surface terrestre émettent en retour un rayonnement infrarouge (grandes longueurs d'onde) que nuages et GES absorbent et réémettent vers le sol, réchauffant ainsi la surface. Les GES ont la particularité d'être transparents au rayonnement solaire et opaques au rayonnement infrarouge. C'est pourquoi la quasi-totalité de ce rayonnement est renvoyé vers la surface. La concentration en GES dans l'atmosphère joue donc un rôle majeur dans l'intensité du phénomène, et c'est pourquoi l'effet de serre tend à augmenter considérablement avec les activités humaines.

I.1.1.2.b. Une amplification récente de l'effet de serre

La meilleure façon de quantifier l'impact des activités humaines sur l'effet de serre est de calculer la valeur du forçage radiatif observé au sommet de l'atmosphère (à environ 12 kms d'altitude). Le forçage radiatif se définit comme la variation du flux de rayonnement dans le

système Terre/atmosphère. Il se calcule par la différence entre le rayonnement solaire descendant et le rayonnement infrarouge ascendant et se mesure en $W.m^{-2}$. Un système à l'équilibre doit présenter une valeur de forçage radiatif nulle (IPCC, 2013). Or, avec l'explosion des activités humaines, les valeurs de forçage radiatif ont tendance à augmenter sensiblement. En effet, d'un système à l'équilibre avant l'industrialisation, le forçage radiatif s'est établi à $+1W.m^{-2}$ en 1950 et $+2W.m^{-2}$ en 2010 (IPCC, 2013). Cela signifie donc que le bilan énergétique Terre/atmosphère est déséquilibré positivement ; le rayonnement reçu est donc supérieur au rayonnement renvoyé et l'atmosphère se réchauffe (IPCC, 2013). C'est à partir de ce processus de forçage radiatif que sont construits les scénarios climatiques futurs.

Depuis 1950, la concentration en CO_2 n'a cessé de croître et l'accélération est de plus en plus marquée depuis les années 1970. En effet, selon Canadell *et al.* (2007), sur la décennie 1970-1979, la concentration en CO_2 dans l'atmosphère évoluait à un rythme de $+1,3$ ppm/an alors que depuis les années 2000, celle-ci est de $+1,9$ ppm/an. Cela a conduit à une concentration très élevée, qui est proche des valeurs les plus élevées imaginées. En effet, selon le Ministère de la transition écologique (2018), le seuil de 400ppm a été franchi en 2015 avec une progression franche entre 2015 et 2016 de $+3,3$ ppm sur la seule année 2016. Pour l'ensemble des 3 principaux GES (CO_2 , CH_4 et NO_2), la Figure 3 rend compte d'une accélération franche depuis 1900 (rectangle au centre sur une échelle plus réduite). En effet, une élévation de 100ppm est observée pour le CO_2 entre 1950 et 2000. Ce chiffre s'établit à 600ppb pour le CH_4 (méthane) sur la même période.

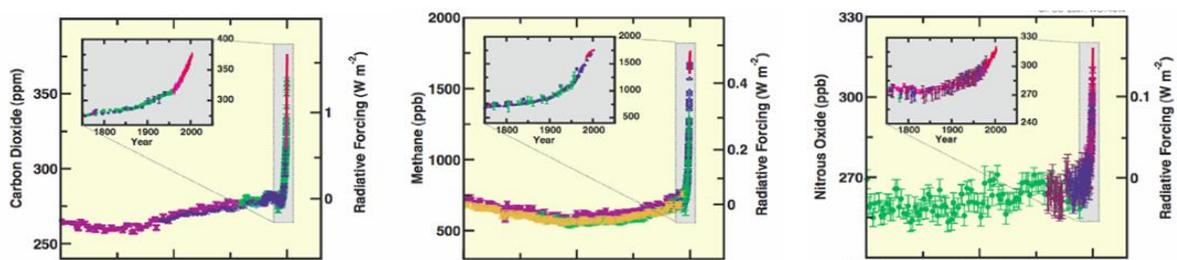


Figure 3 : Evolution de la concentration (en ppm et ppb) de 3 principaux GES (CO_2 à gauche, CH_4 au centre et NO_2 à droite) depuis 10 000 ans (IPCC, 2013)

I.1.2. Les projections climatiques au niveau mondial et métropolitain

I.1.2.1. La construction des scénarios climatiques

Les nouveaux scénarios Representative Concentration Pathways (RCP) apparaissent pour la première fois dans le 5^e rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat). Ils sont au nombre de 4 et traduisent chacun une évolution de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère associée à une valeur de forçage radiatif (Jouzel *et al.*, 2014) (Tableau 1). Au rythme des émissions actuelles, il apparaît de plus en plus réaliste que le seuil de concentration en CO_2 de 475ppm sera dépassé bien avant la fin du siècle, ce qui explique que le RCP2.6 est de plus en plus abandonné dans les études puisqu'il n'est plus représentatif de l'évolution probable.

Tableau 1 : Les 4 RCPs et leurs caractéristiques : la valeur de forçage radiatif à horizon 2100 ; la concentration en CO₂ (en ppm) équivalente et le profil d'évolution (Jouzel et al., 2014).

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W.m ⁻²)	Concentration en CO ₂ vers 2100 (ppm)	Profil d'évolution
RCP2.6	2,6	475	Pic puis déclin
RCP4.5	4,5	630	Stabilisation avant 2100
RCP6.0	6	800	Stabilisation après 2100
RCP8.5	8,5	1313	Croissant

I.1.2.2. Les projections climatiques au niveau mondial

I.1.2.2.a. Les projections d'évolution des températures moyennes

Quel que soit le scénario retenu, de grandes tendances apparaissent, comme en témoigne la Figure 4. Les pôles ont tendance à se réchauffer plus rapidement sous un effet albédo plus important. Leur température devrait augmenter entre 3°C et 10°C selon le scénario envisagé d'ici la fin du siècle. De manière générale, les terres émergées connaîtront une augmentation de température plus importante que les océans, comprise entre 1,5°C et 5°C en moyenne selon le scénario retenu. Cependant, ce réchauffement paraît hétérogène selon différentes zones du globe. Il est beaucoup plus important en Asie, en Amérique du Nord et en Afrique subsaharienne et moins marqué en Amérique du Sud, en Australie et en Europe. Des projections à plus petite échelle sont nécessaires pour effectuer une analyse beaucoup plus précise.

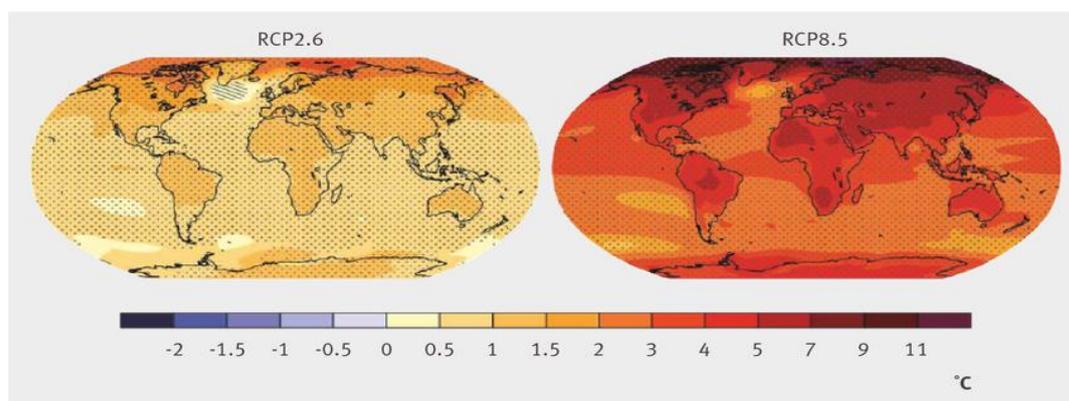


Figure 4 : Projections de l'évolution des températures au niveau mondial pour le RCP2.6 (à gauche) et 8.5 (à droite) à horizon 2100 (IPCC, 2013).

I.1.2.2.b. Les projections d'évolution des précipitations moyennes

De manière générale, quel que soit le scénario envisagé et comme en témoigne la Figure 5, les hautes latitudes ainsi que la zone équatoriale devraient connaître une augmentation de la moyenne annuelle des précipitations de l'ordre de 10 à 20% pour le RCP2.6 et de 40 à 50% pour le RCP8.5 d'ici la fin du siècle. Les précipitations extrêmes devraient connaître une plus forte activité au niveau des zones tropicales et plus généralement, là où le niveau des océans augmentera le plus. Les zones connaissant une diminution marquée sont celles situées aux alentours du golfe du Mexique, de l'Afrique du Sud ainsi que la grande majorité de l'Europe,

avec un déficit pouvant atteindre jusqu'à -30% d'ici la fin du siècle. Tout comme pour les températures, des projections à plus fine échelle sont nécessaires pour tirer des conclusions représentatives pour une zone particulière.

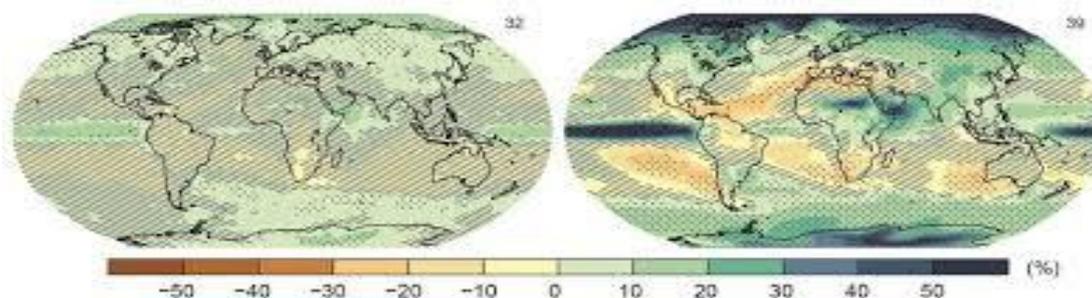


Figure 5 : Projections de l'évolution des précipitations moyennes à horizon 2100 pour le RCP2.6 (à gauche) et 8.5 (à droite) (IPCC, 2013).

I.1.2.3 Les projections climatiques au niveau national

I.1.2.3.a. Synthèse des projections pour le RCP8.5

Comme dit précédemment, la prise en compte du RCP2.6 est peu utile car les objectifs fixés par celui-ci sont déjà dépassés. L'analyse des projections s'appuie donc sur les RCP4.5 et RCP8.5 (Jouzel *et al.*, 2014). Le Tableau 2 synthétise les projections climatiques du RCP8.5 :

Tableau 2 : Projections climatiques pour le RCP8.5 en France pour le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100) pour plusieurs paramètres : les températures, les précipitations et les événements extrêmes (Jouzel *et al.*, 2014)

Prévisions RCP8.5	Moyenne annuelle nationale		Variabilité saisonnière		Variabilité géographique	Incertitude
	2021 - 2050	2071 - 2100	Été	Hiver		
Températures (en °C par rapport à la référence)	+1,5	+4	+5,3	+3,6	réchauffement croissant selon un axe nord-ouest/sud-est.	Bonne concordance entre modèles climatiques
Précipitations (en mm/jour par rapport à la référence)	Peu de variations	-0,5 à -1	-0,1 à -0,5	+0,1 à +0,4	Diminution marquée dans le Sud-Est et augmentation sur les côtes atlantiques et de la Manche	Très grande hétérogénéité selon les modèles climatiques
Evènements extrêmes						
Précipitations extrêmes	Faibles changements	Renforcement	Peu de variabilité : les précipitations extrêmes semblent se renforcer que ce soit en hiver ou été		Renforcement sur la quasi-totalité du territoire +10% dans le Nord-Est	Bonne concordance entre modèles climatiques
Vagues de chaleur (nombre de jours par rapport à la référence)	Faibles changements	+ 10 à +30	Projections uniquement en été		Gradient Nord-Est/Sud-Est (de +10 jours au Nord-Ouest à +30 jours dans le Sud-Est)	Bonne concordance entre modèles climatiques
Sécheresse (nombre de jours par rapports à la référence)	Faibles changements	8 à 10 jours supplémentaires	Net renforcement	Peu de changements	Sud-Est et Sud-Ouest beaucoup plus touchés	Ecart géographique entre modèles

Plusieurs informations clés sont à retenir de ces projections :

- Les modèles climatiques sont en accord sur la projection des températures.
- Les modèles divergent sur la projection des précipitations mais il en ressort que celles-ci seront plus marquées au Nord qu'au Sud avec un renforcement des pluies en hiver et une diminution en été.
- Les événements extrêmes vont se multiplier.

Les projections concernant le RCP4.5 suivent la même tendance que celles du RCP8.5 avec cependant une intensité inférieure.

1.1.2.3.b. Une augmentation flagrante des périodes de canicule : une attention particulière

Selon Jouzel *et al.* (2014) une vague de chaleur se définit comme une période anormalement chaude durant plus de 5 jours consécutifs. Il s'agit d'une température dépassant de 5°C une valeur climatologique de référence calculée à partir d'une moyenne glissante des températures maximales quotidiennes sur la période 1976-2005. Le nombre de vagues de chaleur ne cesse de se multiplier ces dernières années, avec une durée et une intensité qui augmentent. Il est clair que les récents épisodes (2003, 2006, 2018, 2019 à deux reprises) se placent parmi les plus intenses en termes de durée et de sévérité.

Sur la Figure 6 sont représentées les futures vagues de chaleur en fonction des projections climatiques. Une année telle que 2003 pourrait devenir la norme dès le futur proche. En ce qui concerne la fin du siècle, les canicules rencontrées pourraient être bien plus sévères et meurtrières avec une température moyenne 5°C supérieure à celle de 2003 (29°C vs 34°C) et être jusqu'à 6 fois plus longues (15 jours vs 90 jours).

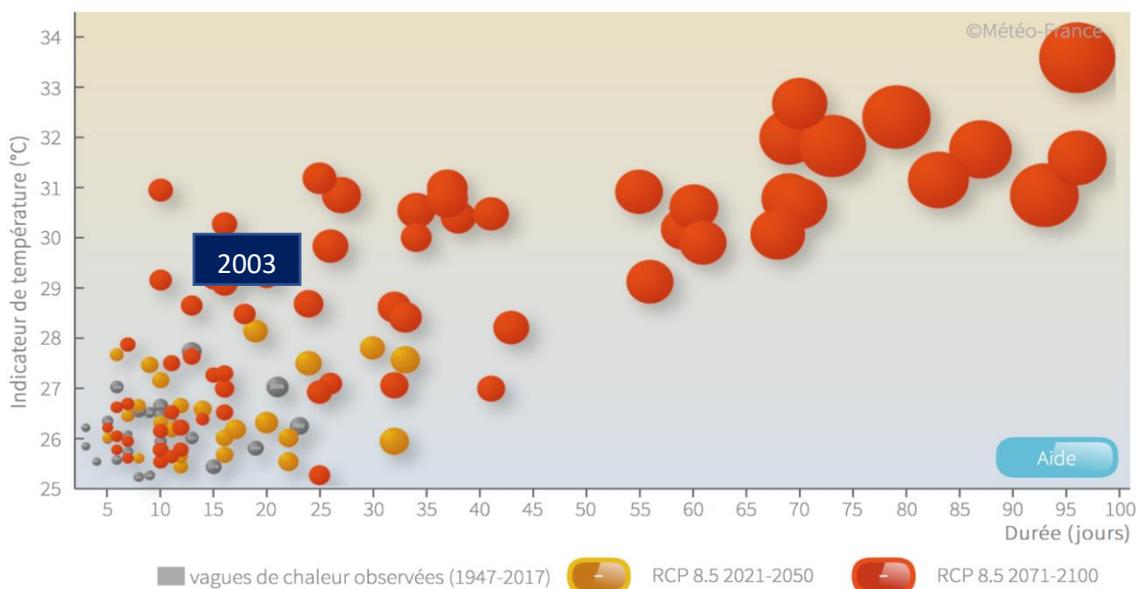


Figure 6 : Projections de l'évolution des vagues de chaleur en France à horizon 2100. Les bulles grises représentent les vagues de chaleur passées, les bulles jaunes celles simulées par le RCP8.5 pour la période 2021-2050 et les bulles rouges pour la période 2071-2100 (Météo France, 2019a).

I.2. Le changement climatique et ses impacts en agriculture

I.2.1. L'évolution des rendements, facteur d'incertitude sur la sécurité alimentaire et traceur de l'évolution du climat.

Selon Ray *et al.* (2013), l'augmentation des rendements s'avère être la meilleure solution pour assurer la sécurité alimentaire mondiale. Pour que l'ensemble des individus puissent avoir accès à une alimentation en quantité suffisante, la production doit augmenter de 60 à 110% d'ici 2050 (Ray *et al.*, 2013). Les rendements, entre 1960 et 2008, ont progressé environ de 1,6%/an, 1%/an, 0,9%/an et 1,3%/an pour le maïs, le riz, le blé et le soja respectivement. Ces 4 cultures représentent 2/3 des calories produites et suscitent donc un intérêt majeur. Cependant, pour augmenter la production mondiale de 60 à 110%, il faudrait que ce taux de progression soit de 2,4%/an pour ces 4 cultures (Ray *et al.*, 2013). Or, comme le montre la Figure 7, les rendements en riz et en blé n'évoluent plus dans 40% de la SAU depuis 1961.

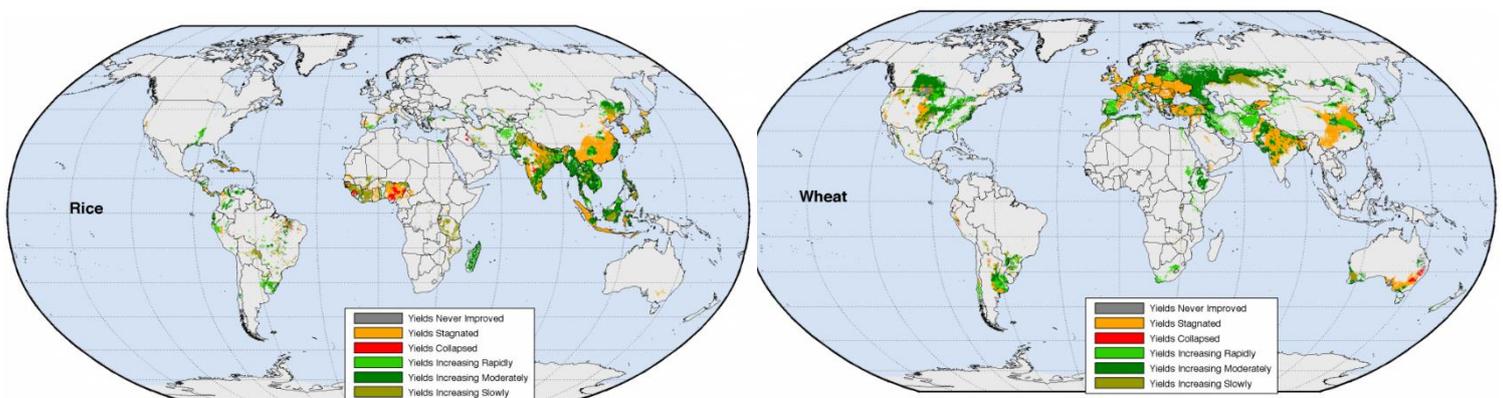


Figure 7 : Evolution des rendements de 1961 à 2008 pour le riz (gauche) et le blé (droite) (University of Minnesota's Institute on the Environment, 2012).

De plus, pour atteindre les niveaux de production estimés pour nourrir l'ensemble de la population, il faudrait augmenter la production de blé de 157 millions de tonnes à l'horizon 2025, soit l'équivalent de 46 millions d'ha supplémentaires (sans augmentation de rendement). Ces chiffres sont encore plus élevés à l'horizon 2050, avec une production nécessaire de 388 millions de tonnes de plus qu'actuellement, soit l'équivalent de 95 millions d'ha en plus (Ray *et al.*, 2013). Ce défi paraît colossal vu que la SAU cultivable devrait perdre 8 à 20% d'ici 2050 (Chakraborty et Newton, 2011), perte causée par la dégradation des sols, la salinité et l'augmentation de l'usage non agricole.

Du fait du changement climatique, les rendements globaux (toutes cultures confondues) devraient connaître une diminution de 2,3 à 2,6% à l'horizon 2050 (Semenov et Shewry, 2011 ; Calzadilla *et al.*, 2013). Cependant, il existe une très grande hétérogénéité selon le type de culture considéré. Ainsi, les rendements en céréales devraient accuser une baisse de 3 à 5% d'ici 2050 (Calzadilla *et al.*, 2013). Depuis 1980, le réchauffement climatique a causé d'importantes pertes financières dans le secteur agricole au niveau mondial. Elles sont estimées à 5 milliards d'€ par an pour les 6 premières cultures (blé, maïs, orge, riz, soja et sorgho) (Lobell et Field, 2007). Si l'on apporte quelques exemples, les pertes s'élèvent à 2,6 milliards d'€ par an depuis 1981 pour le blé et 1,2 milliard pour le maïs (Lobell et Field, 2007). Pour contrebalancer la raréfaction de la ressource, les prix des denrées agricoles pourraient augmenter de 39 à 43% à horizon 2050 (Calzadilla *et al.*, 2013).

I.2.2. Les impacts du changement climatique sur la culture de blé au niveau du rendement.

Entre 1950 et 1990, les rendements de blé tendre en France n'ont cessé de croître de manière linéaire à un rythme d'environ 1,2q/ha/an, ce qui a permis de passer de 25 à 70q/ha en 30 ans (Pons-Thévenot, 2014 ; Le Gouis, Oury, et Charmet, 2020 ; Ray *et al.*, 2013). Si cette progression avait continué au même rythme, nous aurions actuellement des rendements 10 à 20q supérieurs à ceux que nous connaissons (Pons-Thévenot, 2014). Or, depuis 1996, point d'inflexion de la courbe en France, les rendements n'évoluent plus (Figure 10). Plusieurs causes sont attribuées à cette stagnation telles que les pratiques culturales, l'essoufflement des progrès génétiques, la consommation d'intrants ou encore les conditions climatiques qui, selon Brisson *et al.* (2010), semblent représenter le principal facteur expliquant cette stagnation.

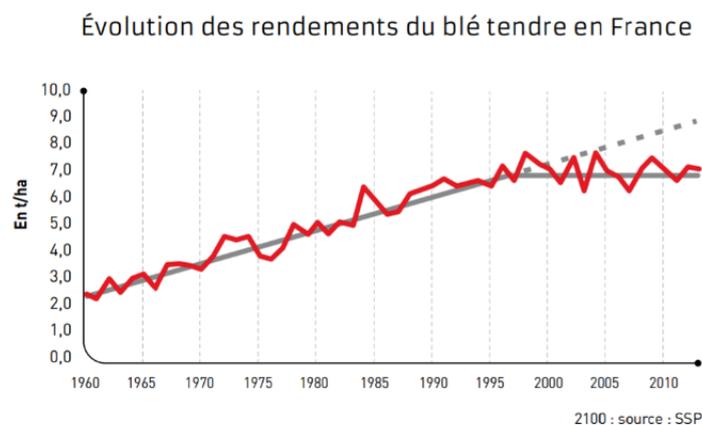


Figure 8 : Evolution des rendements (t/ha) de blé tendre en France depuis 1960 (Pons-Thévenot, 2014).

de l'évolution de la température moyenne. En se basant sur le RCP8.5 qui prévoit jusqu'à +5°C à horizon 2100, la floraison sera avancée en moyenne de 25 à 30 jours.

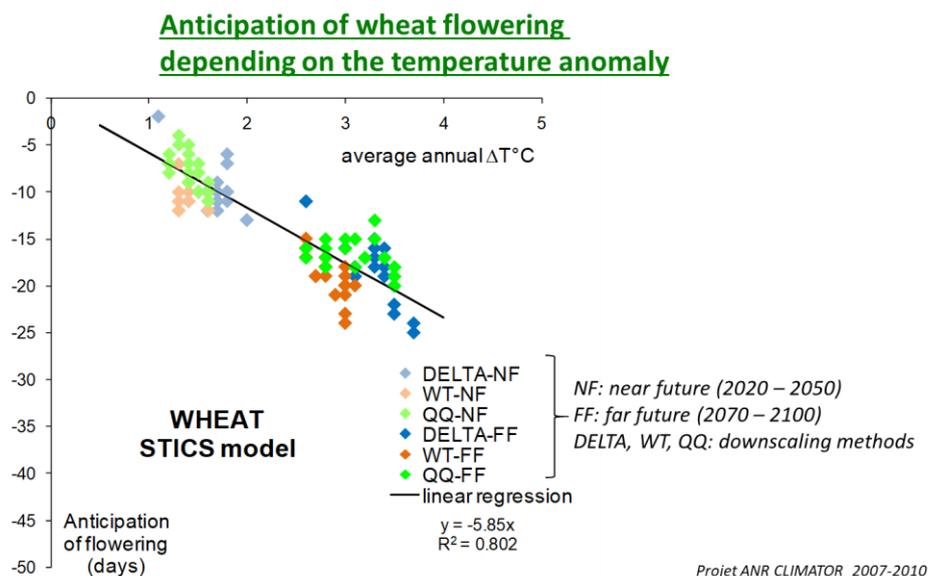


Figure 10 : Anticipation de la date de floraison du blé (en jours) en fonction de l'évolution de la température moyenne pour différents horizons temporels et différentes méthodes de régionalisation du climat (Brisson et Levrault, 2010).

1.2.3.3. L'impact des excès climatiques sur l'écophysiologie du blé

1.2.3.3.a. Les excès thermiques

- Le froid et ses impacts

Les basses températures apparaissent comme dangereuses pour la culture dès le début du cycle. Dès la germination, des températures minimales $< -5^{\circ}C$ (Gate, 1995) ou $-12^{\circ}C$ (de los Campos *et al.*, 2020) peuvent entraîner la destruction du coléoptile et donc la mort de la plantule. L'effet est d'autant plus marqué que les jours de gel se répètent (Gate, 1995). Ensuite, les températures basses affectent la phase de montaison. Là encore, les valeurs rencontrées dans la littérature divergent. En effet, Gate, (1995) considère que la montaison est ralentie lors de températures minimales $< 4^{\circ}C$ ou moyennes $< 7^{\circ}C$ alors que de los Campos *et al.* (2020) ramènent ce seuil à $0^{\circ}C$ pour les températures minimales.

Le froid a également un effet très préjudiciable autour du stade de la méiose. Des températures minimales $< 4^{\circ}C$ 10 jours avant et 10 jours après la méiose peuvent entraîner une réduction sensible du nombre de grains par épi (de los Campos *et al.*, 2020). Cela est dû à une stérilité qui selon Hunt et Pararajasingham, (1995) s'accroît avec des températures $< 0^{\circ}C$.

Les basses températures sont également préjudiciables aux alentours de l'anthesis (ou floraison). Elles entraînent une stérilité pouvant atteindre 90% si la température est $< 9,5^{\circ}C$ (Barlow *et al.*, 2015). Hunt et Pararajasingham, (1995) abaisse ce seuil à $0^{\circ}C$ et (de los Campos *et al.*, 2020) à $4^{\circ}C$.

- Les excès de chaleur et leurs impacts

Le stress thermique, lié aux températures élevées, est considéré comme le paramètre le plus impactant du cycle cultural entraînant des effets délétères à tous les stades de développement

(Ray *et al.*, 2015 ; van der Velde *et al.*, 2012). Tout d'abord, les températures élevées effacent les effets vernalisants. La limite est fixée à 15,7°C pour (Porter et Gawith, 1999) et à 17°C pour le modèle de culture SIRIUS ; la température moyenne optimale pour la vernalisation étant comprise entre 3,8 et 6°C (Porter et Gawith, 1999). En cours de montaison, les fortes températures entraînent une régression accélérée des tiges. Celle-ci peut atteindre 20% si la température moyenne dépasse 12°C pendant 3 semaines après le stade épi 1cm (Gate, 1995).

Les fortes chaleurs ont un effet très préjudiciable si elles interviennent autour de la méiose. En effet, elles sont responsables d'une chute du nombre de grains par épi. Celle-ci atteint 50% si la température maximale journalière est comprise entre 30 et 35°C, 90% si la température maximale est comprise entre 35 et 40°C et 100% si elle est supérieure à 40°C (Gate, 1995). Les températures élevées entraînent également une stérilité importante si elles interviennent autour de l'anthèse. Cette stérilité atteint 50% si la température maximale est supérieure à 30°C pendant 2 à 4 jours avant l'anthèse selon Gate, (1995), alors que Ferris *et al.* (1998) fixent ce seuil à 31°C. Durant cette période, la chaleur entraîne également une diminution sensible de la photosynthèse, pouvant aller jusqu'à -20% pour des températures maximales supérieures à 22°C (Djanaguiraman *et al.*, 2020).

Enfin, le stress thermique affecte directement le rendement s'il intervient durant la phase de remplissage. Le principal problème rencontré durant cette phase est l'échaudage. Il va entraîner une réduction importante du poids de mille grains (PMG). Celle-ci peut provenir de plusieurs sources. Si les fortes températures interviennent en début de phase, c'est-à-dire entre floraison et grain laiteux, c'est la multiplication cellulaire qui sera affectée et il en résultera donc un grain de plus petite taille. En revanche, si des températures excessives apparaissent au-delà du stade grain laiteux, c'est plutôt la migration des sucres vers les grains qui est pénalisée. A titre d'exemple, si la température maximale est supérieure à 25°C durant 3 à 4 semaines après l'anthèse, alors la concentration en sucre est de 50mg/g (Shah et Paulsen, 2003). Celle-ci tombe à 20mg/g pour des températures maximales supérieures à 35°C (Shah et Paulsen, 2003). En ce qui concerne le poids des grains, la perte peut aller jusqu'à -39% pour une température maximale supérieure à 32°C (Djanaguiraman *et al.*, 2020) et jusqu'à -49% pour une température maximale supérieure à 35°C (Schittenhelm *et al.*, 2020). Les impacts sur le rendement final peuvent s'avérer colossaux comme en 2003 par exemple où, les pertes ont été estimées à 21,5% au niveau national avec le quart Nord-Est enregistrant les plus gros déficits (jusqu'à -2t/ha).

1.2.3.3.b. Le déficit hydrique

Une alimentation hydrique suffisante est nécessaire à tous les stades de la culture pour un développement optimal. Le déficit hydrique, que l'on pourrait estimer comme le ratio entre la transpiration réelle et la transpiration potentielle de la plante, apparaît comme très préjudiciable qu'il intervienne en début ou en fin de cycle. Tout d'abord, l'alimentation hydrique est nécessaire pour un développement végétatif optimal. Ainsi, si le déficit hydrique apparaît au cours du tallage, la vitesse d'émission des talles diminue (Gate, 1995). Ensuite, en cours de montaison, le manque d'eau affecte le nombre d'épis par plante. Celui-ci peut chuter de 20% si le déficit hydrique atteint 20% (Gate, 1995). Durant cette phase, un déficit peut également provoquer une réduction d'assimilation du carbone qui se traduira donc par des capacités de stockage de carbone réduites (Barnabas, Jaeger, et Feher, 2008). Les besoins en eau estimés durant la montaison sont d'environ 220mm (Arvalis, Institut du végétal, 2015).

Un déficit hydrique se manifestant en fin de cycle, pendant le remplissage, peut être tout aussi pénalisant pour le rendement. En effet ce sont entre 15 et 25q/ha de perdus pour un déficit atteignant 45% (Gate, 1995). Durant cette phase, les besoins sont estimés à environ 230mm (Arvalis, Institut du végétal, 2015). Pour illustrer ces propos, l'année 2020 peut être classée parmi les années extrêmes au point de vue de la sécheresse des sols, surtout en début de

printemps. En effet, dans le quart Nord-Est, plus précisément en Bourgogne Franche-Comté, le déficit hydrique a atteint jusqu'à 150mm au stade floraison du blé tendre (Pelce et Chavassieux, 2020). L'impact a été d'autant plus important que les blés tendres d'hiver étaient au stade gonflement/épiaison lors de la période de déficit hydrique (du 28 avril au 5 mai), alors qu'habituellement à cette période, ces cultures sont au stade dernière feuille étalée (Pelce et Chavassieux, 2020).

I.2.3.3.c. Les excès d'eau

Tout d'abord, si l'eau est en excès dans le sol dès le semis, la graine peut mourir rapidement. Un ennoiemment de 5 jours peut suffire (Hunt et Pararajasingham, 1995). Durant la phase de tallage, l'ennoiemment présente 2 menaces majeures. Il entraîne une diminution de la teneur en chlorophylle allant de 55 à 64% (Ghobadi, Ghobadi, et Zebarjadi, 2017), ainsi que la diminution de la teneur en gliadines du grain. Pour cette dernière, un ennoiemment à 105% de la SWC (Soil Water Content, teneur en eau du sol) durant 14 jours présente des risques (Wollmer, Pitann, et Muehling, 2018). Le même effet est également à craindre au cours de la phase d'épiaison (Wollmer, Pitann, et Muehling, 2018).

L'année 2016 est très représentative des dégâts que peut engendrer un excès d'eau sur la culture. Le Nord de la France a été le plus impacté. Les conditions climatiques étaient plutôt bonnes jusqu'au 25 mai. A partir de là, les conditions sont devenues très humides, avec des cumuls de pluies enregistrés au Nord du bassin parisien dépassant les 150mm sur la seule semaine du 28 mai au 4 juin, et jusqu'à 25 jours de pluie sur le seul mois de juin (Colart, Denis, et Gagliardi, 2016). La perte de rendement estimée était d'environ 30 à 45% (Colart, Denis, et Gagliardi, 2016), l'excès d'eau ayant entraîné en plus d'une anoxie élevée, une verse plus importante, et une fusariose plus présente (Arvalis, Institut du végétal, 2016).

I.2.3.3.d. Le défaut de rayonnement

Le défaut de rayonnement apparaît dans la littérature comme étant un frein au développement de la culture s'il intervient dès la phase de montaison. Il diminuerait alors le nombre de fleurs viables si le déficit atteint 70% (Gate, 1995). Pendant la phase d'épiaison, la période -10 jours à +10 jours autour de la méiose apparaît comme la plus sensible. Des radiations $<180\text{W.m}^2$ étant préjudiciables (de los Campos *et al.*, 2020).

Si le défaut de rayonnement intervient autour de l'anthèse, il peut être responsable d'une diminution du nombre de grains/m² (Fischer, 1985). Une valeur $<200\text{W.m}^2$ sur la période -6 jours à +5 jours autour de l'anthèse semble être préjudiciable (de los Campos *et al.*, 2020).

Enfin, Fischer, (1985), a établi une relation liant 2 variables climatiques, à savoir le faible rayonnement et les fortes températures qui, corrélées, seraient responsables de la chute du nombre de grains/m². C'est ainsi que le quotient photothermique (PTQ) se définissant comme la radiation moyenne divisée par la température moyenne est parfois plus utilisé dans les études car il permet de combiner 2 effets climatiques. Pour illustrer le défaut de rayonnement, l'année 2016 peut être prise comme exemple. Le déficit enregistré a été historique, avec jusqu'à 30% de rayonnement en moins sur le mois de juin au Nord du bassin parisien (Arvalis, Institut du végétal, 2016). Or, à cette période la culture entre en floraison et le défaut de rayonnement a causé la stérilité de nombreux épis ce qui a entraîné une baisse du rendement de 20 à 30% (Arvalis, Institut du végétal, 2016).

I.3. Les indicateurs écoclimatiques : un outil d'analyse des effets du climat sur une culture

I.3.1. Définition et description

I.3.1.1. Qu'est-ce qu'un indicateur écoclimatique ?

Pour mieux appréhender, à l'échelle de vastes territoires, les effets du climat futur sur le déroulement du cycle cultural d'une espèce, des indicateurs écoclimatiques ont été développés (Caubel *et al.*, 2015). Ils permettent de caractériser les effets du climat sur les processus écophysologiques d'une espèce donnée, selon les stades phénologiques sensibles à cet effet.

A la différence des indicateurs agroclimatiques, qui eux sont calculés sur une phase calendaire (par exemple le nombre de jours de gel en janvier, ou le cumul de précipitations mensuel ...), les indicateurs écoclimatiques sont eux calculés sur une phase phénologique (par exemple nombre de jours avec une température maximale > 35°C lors de la phase de remplissage du grain). Cela permet d'avoir un niveau de précision adapté au cycle de développement de chaque espèce, voire de chaque variété comme l'illustre la Figure 11.

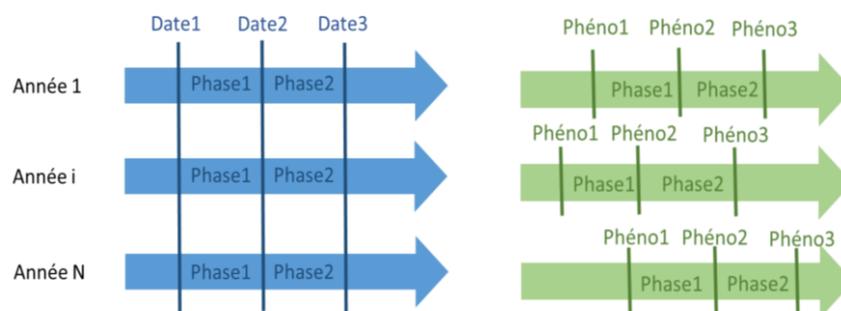


Figure 11 : Illustration schématique des 2 grandes familles d'indicateurs : agroclimatique à gauche et écoclimatique à droite (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019)

I.3.1.2. La construction d'indicateurs écoclimatiques pour étudier la « faisabilité climatique » d'une culture sur un territoire.

La faisabilité climatique rend compte à travers le calcul d'un panel d'indicateurs écoclimatiques, de la répartition géographique d'une culture en prenant en compte le climat et son évolution.

La construction des indicateurs écoclimatiques comprend 2 étapes clés (Figure 12) :

- Etape 1 : identifier, pour chaque phase phénologique de la culture, les effets des variables climatiques (température, précipitations, déficit hydrique, etc.) sur les processus écophysologiques du blé ; repérer en particulier les valeurs seuils de ces variables au-delà ou en-deçà desquelles un effet délétère est à craindre.
- Etape 2 : associer à chacun de ces impacts la variable climatique adéquate (ex : température maximale journalière, pluie cumulée, ...) et définir l'indicateur approprié pour rendre compte de l'effet du climat sur le processus physiologique (ex : température maximale journalière moyenne durant la phase, pluie cumulée durant la phase < 20mm, etc.)

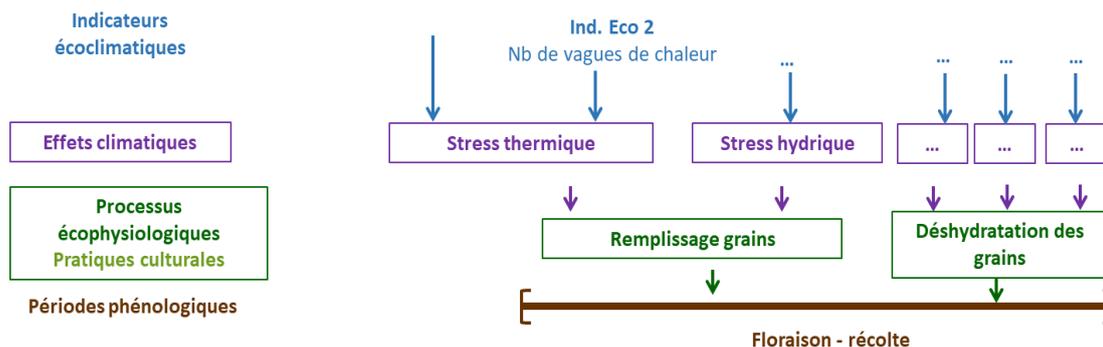


Figure 12 : Illustration de la construction des indicateurs écoclimatiques (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019)

Afin de comparer les poids relatifs de différents indicateurs, il peut être intéressant de les normaliser, ce qui nécessite 1 étape supplémentaire :

- Etape 3 : normaliser les indicateurs pour obtenir une valeur comprise entre 0 et 1 (en fonction de la réponse du processus écophysiologicals à l'évolution des valeurs de l'indicateur : réponse linéaire, exponentielle, logarithmique ... selon biblio) : 0 correspondant à un effet du climat très défavorable et 1 à un impact nul du climat. Cette étape est illustrée sur la Figure 13 par les 2 carrés du haut.

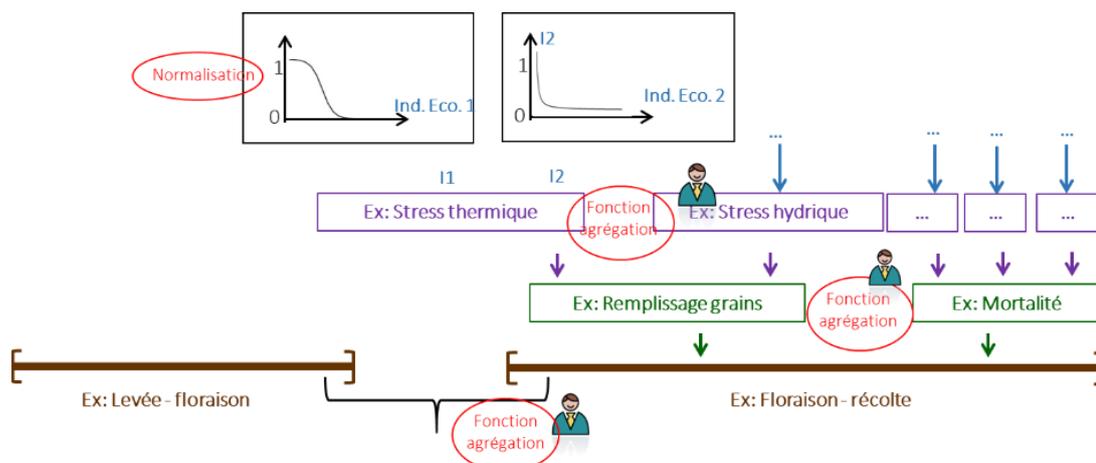


Figure 13 : Illustration de la construction de l'indicateur écoclimatique global (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019)

I.3.2. Travaux antérieurs sur les indicateurs climatiques : exemple sur blé

En 2018, une étude a été menée au sein de l'unité Agroclim d'INRAE d'Avignon pour essayer de comprendre l'influence du climat sur le plafonnement des rendements de blé en France. Ce travail, avec une approche plutôt statistique d'analyse de données, a abouti à une analyse des facteurs climatiques qui impactent le plus la culture de blé. La méthodologie appliquée pour y parvenir a consisté à calculer des indicateurs écoclimatiques et à confronter les résultats aux rendements observés (Marjou, 2018). Cependant, ce travail a présenté deux limites majeures :

- Les indicateurs choisis sont plus des indicateurs de caractérisation climatique d'une phase comme par exemple la température moyenne durant la phase ou bien le cumul de précipitations. Or, pour avoir un niveau d'analyse beaucoup plus fin, il est nécessaire de construire des indicateurs avec des valeurs seuils propres à l'écophysiologie du blé.
- Les analyses effectuées sont basées sur des séries de données climatiques historiques (analyse décennale entre 1960 et 2015) et ne rendent donc pas compte de l'évolution potentielle des impacts dans un contexte de changement climatique.

Ce travail permet toutefois d'avoir une vision globale sur le comportement de la culture face à tel ou tel paramètre climatique. Une analyse plus poussée est donc nécessaire pour apporter des résultats au plus près de ce que pourrait connaître la culture dans le futur. C'est l'objectif du projet REGARD, dont la première phase constitue l'objet de ce stage.

I.3.3. La mise en application dans le projet REGARD (RechErche d'analogues climAtiques pour sélectionneR Demain)

I.3.3.1 Le projet REGARD : les enjeux posés par le changement climatique aux sélectionneurs

I.3.3.1. a. Le contexte général du projet

Dans le contexte de changement climatique, continuer à nourrir une population de plus en plus nombreuse et dans des conditions de production de plus en plus défavorables représente un défi de taille pour l'agriculture. Parmi les leviers d'action pour faire face à cet enjeu, la sélection variétale, et en particulier la sélection de variétés adaptées au climat futur et aux stress abiotiques qu'il engendre constitue une recherche à part entière. C'est pourquoi les sélectionneurs interpellent la recherche pour les aider à identifier non seulement les contraintes futures à la culture du blé en France, mais également les zones appropriées où implanter leurs essais de sélection variétale de manière à se rapprocher le plus possible des conditions climatiques futures. La définition d'analogues climatiques semble de ce point de vue une solution pertinente pour confronter dès aujourd'hui le matériel végétal aux conditions climatiques semblables à celles qu'il pourrait connaître dans les décennies à venir. En effet, un analogue climatique est l'équivalent d'une niche climatique d'une zone de production et vise à regrouper les sites non plus selon leur géographie mais selon la similarité des conditions climatiques que connaît la culture considérée (Agarwal and Sinha, 2019).

I.3.3.1.b. Les grandes phases du projet

Le projet REGARD, d'une durée de 3 ans, s'organise autour de 5 grandes phases, résumées sur la Figure 14. Ce stage s'inscrit dans la 1^{ère} phase. L'objectif du stage était d'établir une liste d'indicateurs écoclimatiques pour rendre compte de l'effet potentiel du climat sur la culture de blé tendre, puis calculer ces indicateurs afin d'évaluer la potentielle répartition géographique de cette culture, dans le futur.

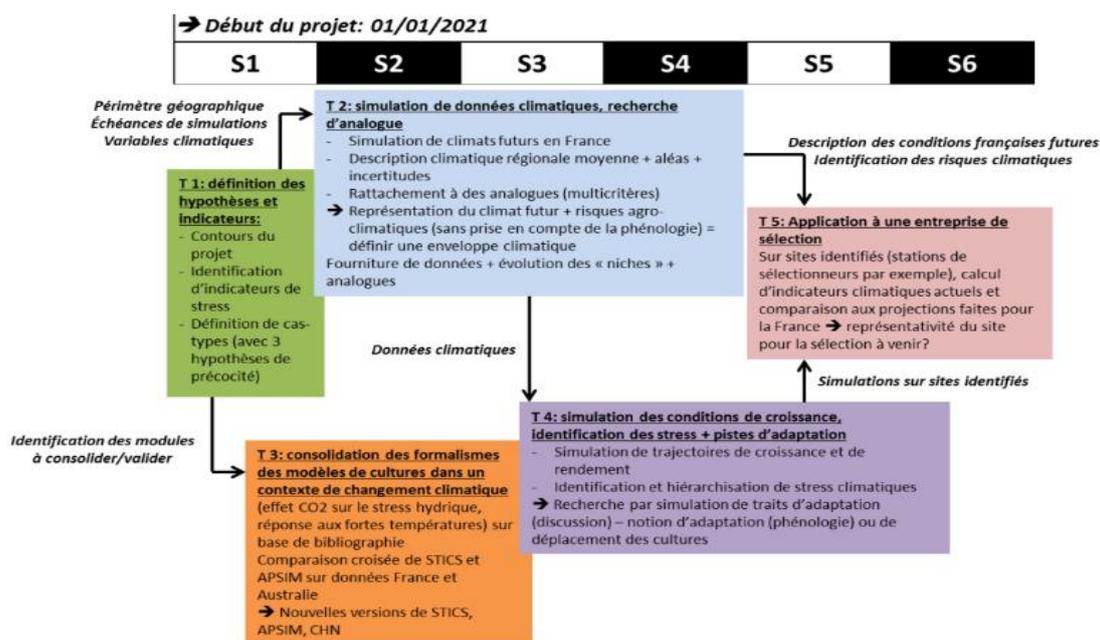


Figure 14 : Présentation des différentes phases du projet REGARD : durée et objectifs (FSOV, 2020)

I.3.3.2. Les acteurs du projet

Arvalis-Institut du végétal est le coordinateur du projet REGARD. Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) est en charge de la construction des analogues climatiques, et les unités AgroClim et Ecosys d'INRAE, sont impliquées dans l'étude des effets climatiques sur la culture du blé. L'université du Queensland en Australie est également intégrée au projet. Enfin, la société semencière RAGT, participe en tant qu'acteur de la filière au suivi du projet.

I.3.3.3. Zoom sur l'unité Agroclim de l'INRAE d'Avignon

L'unité US1116 Agroclim, rattachée au site INRAE d'Avignon Saint-Paul, est spécialisée dans la récolte et le traitement des données agro-climatiques, et présente 2 axes de recherche majeurs :

- l'analyse spatio-temporelle des variables climatiques.
- l'étude de l'influence du climat changeant sur les agrosystèmes annuels et pérennes en produisant et analysant les sorties de simulations par des modèles biophysiques (culture, phénologie, maladie fongique) ou d'une plateforme de calcul d'un panel d'indicateurs.

Le deuxième axe est donc pleinement intégré au projet REGARD. En effet, via l'extraction des projections climatiques ainsi que le calcul de la phénologie, le travail mené au sein de l'unité a permis d'aboutir à une liste d'indicateurs écoclimatiques caractérisant l'impact des variables climatiques sur la culture de blé tendre (cf Figure 14, semestre 1). Une analyse détaillée de ces indicateurs a été effectuée pour un niveau de précision plus important (analyse régionalisée, temporalisée ...) Les résultats ont été transmis au LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement) pour une analyse plus climatique qu'écophysologique afin de définir des analogues climatiques pertinents.

I.4. Problématique

Dans un contexte de changement climatique la filière blé réfléchit aux meilleures stratégies, principalement génétiques, pour répondre à l'augmentation des stress abiotiques (thermiques et hydriques principalement) ayant des effets délétères sur la production, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs. Parmi ces stratégies, la sélection variétale permet de concevoir des variétés plus résistantes face aux excès climatiques auxquels sera confrontée cette culture. Or, la sélection variétale est un processus long qui prend une dizaine d'années (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015). Pour sélectionner et élaborer ces nouvelles variétés il est donc nécessaire de les confronter dès maintenant aux conditions climatiques dans lesquelles elles seront cultivées demain, afin d'anticiper le climat futur.

C'est dans ce contexte que le Fond de Soutien à l'Obtention Végétale (FSOV) a décidé de financer le projet REGARD qui vise à identifier des zones où le climat actuel est analogue à celui que connaîtront les bassins de production du blé en France dans le futur. Ainsi, si le climat beauceron devenait similaire à celui du Lauragais à horizon 2050, alors la Beauce et le Lauragais peuvent être considérés comme 2 analogues climatiques. Dans ce cas, les sélectionneurs pourraient implanter des stations de sélection variétale dans le Lauragais. S'inscrivant pleinement dans ce projet, ce stage visait à analyser l'évolution des risques climatiques pour la culture de blé tendre en France dans un contexte de changement climatique ainsi que l'évolution de la répartition géographique des bassins de production. Pour répondre à cette problématique, ce travail visait à (i) déterminer l'évolution des risques climatiques pour la culture de blé tendre, (ii) identifier des territoires qui présentent un profil similaire d'évolution et (iii) analyser la sensibilité variétale comme levier d'adaptation. Pour répondre à ces trois sous-objectifs, il convenait de décomposer ce travail en 3 grandes phases. La première concernait l'élaboration et le calcul d'indicateurs écoclimatiques. Le logiciel GETARI a permis d'effectuer ce travail. Les calculs sont réitérés à quatre reprises selon la variété étudiée, ici 4 variétés de blé de précocités différentes. La seconde consistait à analyser les sites présentant des risques climatiques similaires et enfin la troisième a consisté à mettre en évidence les différentes sensibilités variétales via la spatialisation des indicateurs écoclimatiques, pour les 4 variétés étudiées.

Partie 2 : Matériels et méthodes

II.1. Les indicateurs écoclimatiques retenus pour caractériser l'effet du climat sur le blé tendre

L'analyse bibliographique a permis de lister les principaux risques climatiques sur le cycle cultural du blé tendre. Pour compléter cette analyse, deux réunions avec les écophysiologistes du projet REGARD ont permis de confirmer ou d'infirmer certains points et établir ainsi une liste d'indicateurs écoclimatiques adaptée à cette culture, chaque indicateur caractérisant un risque climatique sur une phase ou un stade phénologique sensible (Tableau 3). C'est ainsi que 32 indicateurs ont été jugés comme pertinent à calculer. Sur le Tableau 3, ces indicateurs sont classés par phases de calcul (par période phénologique sur lesquelles ils ont été calculés). L'échelle BBCH avec les stades correspondants se trouve en Annexe1. L'identifiant GETARI représente le nom avec lequel l'indicateur figurant en colonne 2 est affecté sous le logiciel GETARI.

Tableau 3 : Liste des indicateurs choisis pour l'étude

Phases et stades de calcul	Indicateur élémentaire	Identifiant GETARI	Référence
S0S1 : Semis --> Levée	Nombre de jours avec Tmin < -5°C	cdaystmin	Gate (1995)
	Fréquence (%) des jours avec pluie > 15mm	hraifreq	
	Somme des précipitations	rainsum	Caractérisation météo de la phase
	Nombre de jours de semis possibles	sowfreq	
S1S2 - 10 : Levée --> Epi 1cm - 10j	Nombre de jours avec Tmin < -12°C	vcdaystmin	De Los Campos (2020)
	Nombre de jours avec SWC > CC	wetsoildays	Thomson (1991)
	Somme des précipitations	rainsum	Caractérisation météo de la phase
	Quotient photothermique	photothermalquotient	
	Nombre de jours de vernalisation nette (3°C < Tmoy < 12°C)	verndays	
S2 - 10S2 + 10 : 20 jours autour d'épi 1cm	Nombre de jours avec Tmin < -7°C	cdaystmin	Gate (1995) Arvalis (2018)
	Nombre de jours avec Tmoy > 12°C	hdaystmean	Gate (1995)
S2 + 10S3: Epi 1cm + 10j --> dernière feuille étalée	Somme des P - ETP	sumwd	Arvalis (2015)
	Rapport SWC/CC de la phase	swccc	Lou (2020)
	Nombre de jours avec SWC > CC	wetsoildays	Marti (2015)
	Somme des précipitations	rainsum	Caractérisation météo de la phase
	Quotient photothermique	photothermalquotient	
S3S4 : Dernière feuille étalée --> Floraison	Nombre de jours avec Tmin < 2°C	cdaystmin	Arvalis (2016)
	Nombre de jours de faible rayonnement (radiation < 200W/m ²)	rsdays	Arvalis (2016)
	Moyenne des Tmin de la phase	mint	Barlow (1999) Hunt (1995)
	Moyenne des Tmax de la phase	maxt	Gate (1995) Ferris et al. (1998)
	Somme des P - ETP	sumwd	Arvalis (2015)
	Rapport SWC/CC de la phase	swccc	Lou (2020)
	Somme des précipitations	rainsum	Caractérisation météo de la phase
	Quotient photothermique	photothermalquotient	
S4S5 : Floraison --> Maturité	Durée de la phase calculée	phalen	Siclisma
	Nombre de jours avec Tmax > 35°C	hdaystmax	Schittenhelm et al. (2016)
	Début stress thermique : 1ère date avec Tmax > 35°C	heatstart	
	Moyenne des Tmax de la phase	maxt	
	Somme des P - ETP	sumwd	Arvalis (2015)
	Rapport SWC/CC de la phase	swccc	Lou (2020)
	Somme des précipitations	rainsum	Caractérisation météo de la phase
Quotient photothermique	photothermalquotient		

Au cours de la discussion avec les écophysiologistes et au regard des moyens mis à disposition pour l'étude, certaines décisions ont dû être prises dans le choix de tel ou tel indicateur. C'est par exemple le cas en ce qui concerne le déficit hydrique. Dans la littérature, celui-ci est le plus souvent estimé via un rapport évapotranspiration réelle (ETR) /évapotranspiration potentielle (ETP). Or, la variable ETR n'est pas calculable grâce aux données disponibles. C'est pourquoi le déficit hydrique est approché via un rapport teneur en eau du sol (SWC) / teneur en eau à la capacité au champ (CC) (données disponibles grâce aux données de sol) et via un bilan hydrique simplifié (précipitations – ETP). Le même problème s'est posé en ce qui concerne le rayonnement. En effet, pour Gate (1995), des problèmes surviennent si le déficit atteint 70%. N'ayant pas de valeur de référence pour calculer ce déficit, le choix s'est plutôt orienté vers l'utilisation du quotient photothermique ou bien vers les seuils établis par De Los Campos (2020), qui eux sont en valeur absolue. Cette discussion a tout son sens ici car elle a permis d'affiner la liste d'indicateurs calculés et ainsi construire une méthodologie adéquate.

II.2. Le protocole d'expérimentation *in silico* pour le calcul des indicateurs écoclimatiques

La méthodologie appliquée se découpe en plusieurs grandes étapes comme l'illustre la Figure 15 ci-dessous. Après l'analyse bibliographique, dont les résultats ont permis d'écrire en grande partie le contexte, plusieurs sous-étapes ont été nécessaires pour construire et analyser les indicateurs écoclimatiques. Des tests préliminaires concernant la qualité prédictive du modèle phénologique ainsi que la fiabilité de certains indicateurs ont été effectués. Ensuite, après validation des indicateurs à utiliser, ces derniers ont été programmés dans le logiciel GETARI, utilisant des données de projections climatiques et des données de phénologie. Une fois les indicateurs calculés jusqu'à 2100, une méthodologie d'analyse des résultats est établie. Ainsi, 3 grandes analyses statistiques ont été effectuées. Tout d'abord, l'analyse de l'évolution des valeurs des indicateurs dans le futur proche et lointain par comparaison de moyennes trentenaires, tout idéotypes confondus. Cela a permis de dégager les indicateurs qui évoluent fortement de ceux restant plutôt stables. Ensuite, le regroupement entre sites à évolution commune a été effectué grâce à la construction de graphiques vecteurs basés sur la confrontation de couples d'indicateurs d'intérêt, tout idéotypes confondus. Ainsi, avec ce type de graphiques, il est facile de voir l'évolution des valeurs des 2 indicateurs sur l'ensemble des sites et ainsi repérer les sites qui se rapprochent de ceux qui s'éloignent. Enfin, puisqu'il est question d'évolution de répartition géographique des zones de production, la spatialisation des indicateurs à forte évolution a permis de visualiser l'évolution de l'indicateurs sur l'ensemble du territoire, avec un niveau de sensibilité variétale puisque la spatialisation a été menée sur les idéotypes tardifs et précoces. Ainsi, il est possible de déterminer si tel ou tel idéotype variétal est plus adapté pour réduire le risque climatique et donc si la précocité constitue une stratégie d'adaptation à part entière



Figure 15 : Schéma méthodologique

II.2.1. Les données d'entrées nécessaires au calcul des indicateurs écoclimatiques

II.2.1.1. Les données climatiques

Afin d'optimiser les temps d'extraction des données ainsi que leur volume, 12 sites de référence ont été choisis afin de représenter l'ensemble des climats possibles sur le territoire métropolitain : Avignon (84), Bordeaux (33), Clermont-Theix (63), Colmar (68), Dijon (21), Lusignan (86), Mirecourt (88), Mons (80), Rennes (35), St-Etienne (42), Toulouse (31) et Versailles (78). Pour chacun d'entre eux, les projections de 1950 à 2100 pour les RCPs 4.5 et 8.5 (voir Tableau 2) ont été extraites avec comme variables climatiques : l'ETP, les précipitations liquides, le rayonnement visible incident, les températures minimales, moyennes et maximales.

La Figure 16 ci-dessous illustre la répartition géographique des sites ainsi que leur température moyenne annuelle et les précipitations moyennes annuelles.

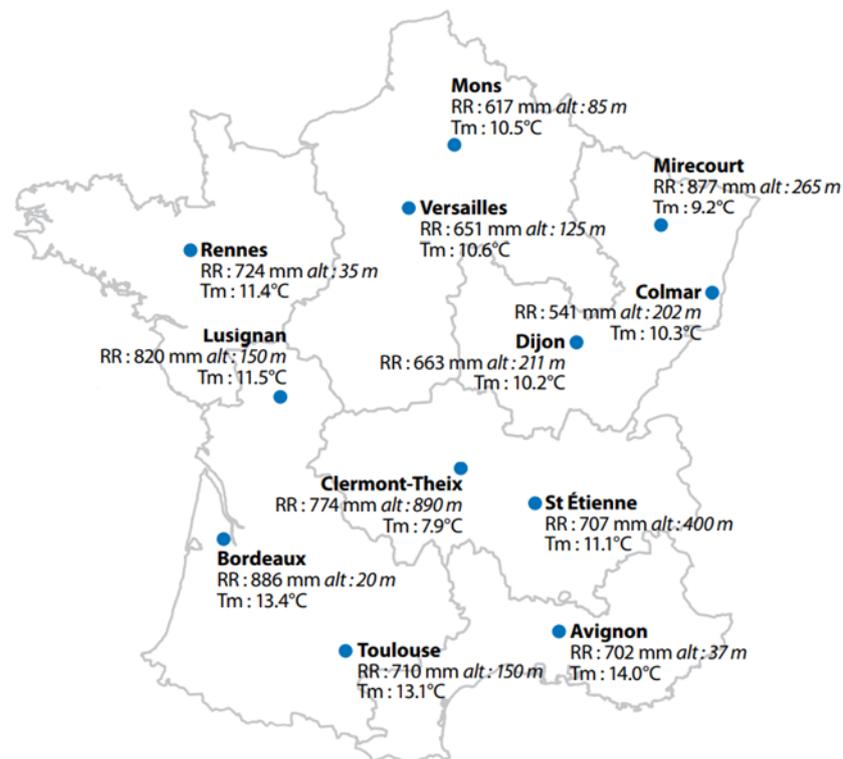


Figure 16 : Cartographie des 12 sites retenus pour l'étude avec les valeurs de températures moyennes (Tm) et de pluviométrie annuelle (RR). Source : Brisson et Levrault (2010)

Dans une deuxième étape, nous avons calculé les indicateurs les plus intéressants de par leur évolution future sur l'ensemble de la France métropolitaine (8602 mailles de 8 x 8 km de résolution spatiale) à l'aide de la plateforme Siclima (voir §II.2).

Enfin, pour comparer certains indicateurs à des observations passées nous avons également extrait des données climatiques spatialisées sur toute la France. C'est ainsi que les données SAFRAN, correspondant aux variables mesurées sur une maille de résolution 8km*8km, ont été extraites pour les années 2014, 2016, 2017, 2019 ...

II.2.1.2. Les variétés de précocités différentes

Nous avons choisi 4 variétés permettant d'illustrer les différentes gammes de précocité existantes, un blé « TT » (tardif à épi 1 cm et tardif à épiaison) (proche des variétés Arminda ou Ritmo), 1 blé « PT » (précoce à épi 1 cm et tardif à épiaison) de type Talisman, 1 blé « TP » (tardif à épi 1 cm et précoce à épiaison) de type Texel et 1 blé « PP » (précoce aux deux stades) de type Galibier. Le choix de précocité variétale par l'agriculteur constitue en effet une stratégie d'évitement des événements climatiques extrêmes.

II.2.1.3. Les données de sol

Nous avons choisi de calculer les indicateurs relatifs à l'humidité du sol à partir de 2 sols de réserves utiles contrastées (Tableau 4). Ces sols avaient été utilisés pour un autre projet de recherche (ANR Climator) sur l'évolution du comportement des principales cultures dans un contexte de changement climatique.

Tableau 4 : Caractéristiques des 2 sols choisis pour l'étude

	Sol commun : Sc	Sol à faible RU : S2
Réserve utile (RU) (mm)	140	65
Humidité à la capacité au champ (en % massique)	28	30
Humidité au point de flétrissement (en % massique)	12	15

Pour chaque type de sol, un bilan hydrique journalier a été calculé selon l'équation :

$$SWC_i = SWC_{(i-1)} + Pluies_{(i)} - ETR_{(i)} = SWC_{(i-1)} + Pluies_{(i)} - (Ks * Kc * ETP)_{(i)}$$

Avec SWC = Soil Water Content (teneur en eau du sol) ; Kc = Coefficient cultural ; Ks = coefficient de stress. SWC au jour initial (à la date de semis) est égal à 80% de la RU.

Pour les indicateurs qui par la suite ont été spatialisés, un sol « moyen » par maille a été utilisé sur la base de la carte des sols BDGSF (Base de Données Géographique des Sols de France). Le sol « moyen » fait référence à un sol ayant une profondeur égale à la moyenne des profondeurs de sol de chaque relevé sur une même maille, une réserve utile et une capacité au champ moyennes.

(<https://agroenvgeo.data.inra.fr/geonetwork/srv/search?keyword=BDGSF>)

II.2.1.4. La base de données Epiphyt

Epiphyt, base de données phénologiques en libre accès (<https://data.pheno.fr/>), a été utilisée pour évaluer la qualité prédictive du modèle phénologique. En effet, elle regroupe de nombreuses données de phénologie observée (date d'apparition des stades phénologiques par exemple). Cela permet donc d'avoir accès à la phénologie sur des années antérieures (depuis 2010 à aujourd'hui) et ainsi confronter les dates de phénologie observées aux dates de phénologie simulées, afin de déduire la marge d'erreur du modèle phénologique.

II.2.1.5. Les bilans de campagne d'Arvalis

Nous avons utilisé les bilans de campagne de blé tendre édités par Arvalis sur plusieurs années (2016 pour les impacts des excès d'eau et de déficit de rayonnement ; 2017 pour les impacts d'une sécheresse précoce). Ils ont permis d'évaluer la qualité descriptive des indicateurs d'excès d'eau, de déficit hydrique et de rayonnement. En effet, ils présentent des cartes relatives aux conditions climatiques présentes sur une phase phénologique donnée. Il a donc été possible de comparer ces cartes à celles établies par la spatialisation des indicateurs qui ont été testés avec SICLIMA. Si elles concordent, alors l'indicateur est pertinent. Au contraire, si de grosses divergences apparaissent, alors le mode de calcul de l'indicateur ne permet pas de rendre compte des conditions climatiques de manière affinée.

II.2.2. Les outils de calcul des indicateurs écoclimatiques élémentaires

II.2.2.1. Siclima

Siclina, plateforme interne à INRAE, présente 3 fonctions principales : l'extraction des données climatiques (SAFRAN pour les données passées et DRIAS pour les projections climatiques), le calcul de la phénologie (pour de nombreuses espèces et variétés, incluant les 4 idéotypes variétaux de blé tendre retenus pour l'étude) et le calcul d'indicateurs de manière spatialisée. Siclima a donc été utilisé pour extraire les données climatiques utiles aux tests préliminaires, les projections climatiques à horizon 2100 pour les RCPs 4.5 et 8.5 ainsi que le calcul de la phénologie pour les 4 idéotypes variétaux de blé tendre étudiés.

En ce qui concerne l'analyse des résultats, Siclima a été utilisé pour l'analyse spatialisée. La version 1.0.12 en date du 11 juin 2021 a été utilisée.

II.2.2.2. Getari

Getari est un outil de calcul d'indicateurs développé au sein de l'unité Agroclim et en libre accès (<https://w3.avignon.inrae.fr/getari/about/>). La version 1.1.1 en date du 20 avril 2021 a été utilisée. Getari permet de construire et de calculer ses propres indicateurs écoclimatiques. La principale différence avec Siclima repose dans le fait que dans Getari, il est possible de normaliser et d'agréger les indicateurs pour une analyse plus complexe. Il ne permet cependant pas de représentation spatialisée des résultats.

II.2.2.3. RStudio

Le logiciel R (version 4.1.1) a été utilisé via RStudio d'une part pour calculer le bilan hydrique du sol et en déduire une valeur journalière de SWC pour chaque type de sol (S2 et Sc), et d'autre part pour l'analyse des résultats et notamment l'élaboration de graphiques de synthèse et la réalisation de tests statistiques.

II.2.3. Les tests préliminaires de validation des indicateurs

Afin de valider notre démarche nous avons, lorsque c'était possible, comparé les indicateurs et les stades phénologiques calculés avec des valeurs observées.

II.2.3.1. Le test des indicateurs d'excès d'eau, de déficit hydrique et de rayonnement

II.2.3.1.a. Le test des indicateurs d'excès d'eau

A l'aide de la plateforme Siclima nous avons calculé de manière spatialisée les indicateurs relatifs à l'excès d'eau et nous avons comparé les cartes obtenues avec le bilan de la campagne de blé tendre de 2016. En effet, l'année 2016 a été choisie puisque les faibles rendements observés sont pour grande partie la résultante d'un ennoisement marqué à des stades critiques. Les variétés de blé choisies pour ces calculs sont les deux variétés les plus précoces et tardives (types PP et TT).

II.2.3.1.b. Le test des indicateurs de rayonnement

3 indicateurs ont été ici testés : la moyenne du rayonnement journalier ; le rayonnement cumulé durant la phase analysée et le nombre de jours à faible rayonnement (c'est-à-dire le nombre de jours avec un rayonnement $< 17,28\text{MJ}/\text{m}^2/\text{jour}$, soit $< 200\text{W}/\text{m}^2$). L'année de référence est encore une fois 2016, puisque les rendements observés cette année-là sont dus à la fois à un excès d'eau mais aussi à un déficit de rayonnement. Le test s'est déroulé de la même façon que pour les indicateurs d'excès d'eau, avec une comparaison au bilan de campagne d'Arvalis.

II.2.3.2. L'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique

La phénologie étant simulée par un modèle, il est nécessaire d'évaluer la qualité prédictive du modèle phénologique. Le modèle utilise les projections climatiques (notamment la température car l'apparition des stades phénologiques est directement liée à des sommes de température) pour prévoir les dates d'apparition des différents stades phénologiques ainsi que la durée des phases phénologiques. Il faut donc de déterminer la marge d'erreur du modèle afin de calculer les indicateurs écoclimatiques sur les bonnes périodes, en incluant la marge d'erreur (c'est par exemple utile pour les périodes de calcul autour d'un stade précis tel que le stade épi 1cm où il est nécessaire de connaître la marge d'erreur autour de ce stade afin de calculer les indicateurs associés sur une période en étant certain que celle-ci inclus le stade). Ce travail a donc consisté à comparer la phénologie observée à la phénologie simulée et ainsi déduire le nombre de jours d'écart. La base de données Epiphyt a été utilisée pour obtenir des données de phénologie observées. Les données d'intérêt pour notre étude sont celles concernant le blé tendre et pour les stades phénologiques qui requièrent une grande précision, tels qu'épi 1cm, la méiose et la floraison. Une fois ces données téléchargées, elles ont été comparées à la phénologie simulée par le modèle, pour les mêmes stades et sur la même année. Ce travail a été effectué plusieurs fois, selon les paramètres suivants :

- Calcul sur la totalité du territoire métropolitain et uniquement sur les zones avec une surface arable $> 30\%$ pour omettre les mailles qui ne sont pas représentatives de la culture du blé (par exemple les mailles de haute altitude, les zones urbaines, les mailles côtières) et ainsi espérer obtenir des résultats moins dispersés autour de la médiane.
- Calcul sur plusieurs années afin de voir si l'année choisie a un fort impact sur les résultats.
- Pour 2 dates de semis : l'une au 1^{er} octobre et l'autre au 15 novembre afin de s'accorder sur la date de levée (levée simulée = levée observée) et ainsi voir si les écarts se réduisent sur les stades suivants.

II.2.4. Le calcul des indicateurs sous GETARI

Le logiciel GETARI, pour être utilisé, requiert 2 fichiers d'entrée au format CSV ou texte. Le premier est un fichier climatique, comportant les projections climatiques pour le RCP choisi. Le second est un fichier phénologique, comportant les dates d'apparition des différents stades phénologiques selon les projections climatiques. Cette phénologie est calculée grâce à Siclima et son modèle phénologique.

Les indicateurs climatiques sont ensuite construits ou choisis dans une librairie par l'utilisateur. Chaque indicateur est associé à un effet durant une phase sensible. L'utilisateur peut également être amené à spécifier des valeurs seuils pour cet indicateur. La méthode est illustrée ci-dessous sur un exemple :

- L'utilisateur choisit la phase phénologique sensible allant de - 10 jours à + 10 jours autour du stade épi 1cm.
- L'utilisateur définit les effets climatiques susceptibles d'affecter le bon déroulement de la phase phénologique : ici le froid gélif et la chaleur.
- On sélectionne enfin les indicateurs que l'on souhaite calculer et l'on paramètre leurs valeurs seuils. Ici, pour le froid, l'indicateur « Jours froids Tmin » renvoie au nombre de jours avec une température minimale inférieure à un certain seuil. Ici, le seuil de -7°C est enregistré. Idem pour la chaleur, l'indicateur « Jours chauds Tmoy » renvoie au nombre de jours avec une température moyenne supérieure à un seuil. Ici, le seuil est de 12°C.

Une fois le calcul exécuté, des valeurs brutes de l'indicateur sont obtenues (la valeur du paramètre climatique tel qu'il est issu des projections climatiques)

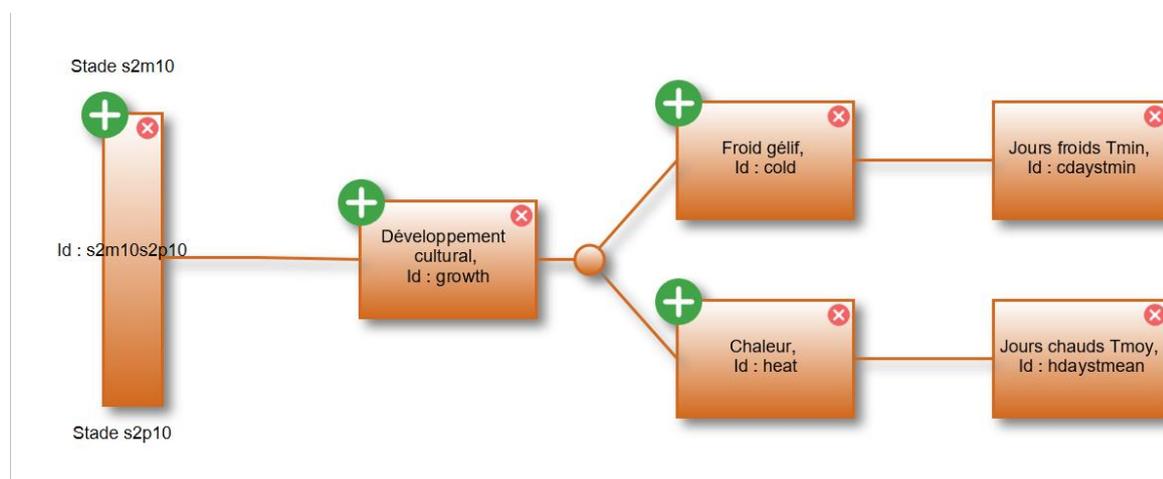


Figure 17 : Processus de programmation des indicateurs écoclimatiques sous GETARI

L'arbre d'indicateurs élémentaires complet figure en Annexe 2.

II.3. La méthodologie d'analyse des résultats

Les résultats se présentant sous la forme de tableaux de données très volumineux, il a fallu adopter une méthodologie pour les traiter de manière efficace, rapide et permettant d'aboutir à une présentation la plus claire possible. L'analyse s'est déroulée en plusieurs étapes.

Afin d'alléger la charge de données à traiter, les résultats sont d'abord analysés pour le RCP8.5 afin d'obtenir des différences plus marquées puisqu'il s'agit du scénario le plus pessimiste.

De plus, l'indicateur « sowfreq » rendant compte du nombre de jours potentiels pour le semis présente une défaillance dans son calcul. Il est donc retiré de la liste des indicateurs soumis aux analyses suivantes.

II.3.1. L'analyse statistique

L'analyse statistique mérite d'être scindée en plusieurs parties distinctes car chacune d'entre elles renvoie à une méthodologie d'analyse différente. C'est l'objet des sous parties figurant ci-après.

II.3.1.1. L'analyse des dates d'apparition et des durées de phases

Cette analyse est primordiale car les dates d'apparition des phases ainsi que leur durée risquent d'évoluer sensiblement dans le futur du fait du réchauffement. De ce fait, les cultures pourraient être exposées à des risques climatiques différents de ceux qu'elles connaissent aujourd'hui. Pour cela, la durée moyenne de l'ensemble des phases phénologiques a été calculée pour chacune des 3 périodes et pour les 2 idéotypes variétaux les plus extrêmes (précoce-précoce et tardive-tardive) sur 4 sites représentant 4 grandes zones climatiques. Avignon représentant le site le plus chaud, Clermont-Theix le site le plus froid, Lusignan avec un climat océanique et Mirecourt avec un climat continental.

II.3.1.2. L'analyse de l'évolution des indicateurs écoclimatiques

Cette analyse permet de comparer les sites entre eux pour un même indicateur, sans tenir compte de l'effet variété. Cela permet donc de regrouper les sites dont l'évolution de l'indicateur choisi est similaire dans le futur. Pour cette analyse, les paramètres d'un box-plot sont calculés (médiane, 1^{er} et 3^{ème} quartiles, min et max) pour chaque indicateur et pour chaque site pour les 3 périodes (référence : 1976-2005, futur proche : 2021-2050 et lointain : 2071-2100). Cette analyse s'est déroulée sous R, en faisant appel aux packages d'outils nécessaires pour la création de box-plots, à savoir le package ggplot2.

Ensuite, des graphiques violons ont été réalisés sous R grâce aux packages ggplot2, vioplot, gridextra et cowplot. Ils reprennent les mêmes paramètres qu'un box-plot mais leur forme permet de donner une représentation de la distribution des valeurs et la p-value est affichée, suite au test de comparaison de moyennes de Wilcoxon. Ce test a été choisi car au regard de la distribution des valeurs, celle-ci ne suit pas une distribution normale. Il faut donc appliquer un test statistique non paramétrique tel que le test de Wilcoxon.

La p-value est un marqueur statistique permettant de connaître le pourcentage d'erreur en conservant l'hypothèse nulle d'un test statistique. Pour l'analyse des indicateurs, nous considérerons qu'il évolue de manière très significative si la p-value de comparaison de moyennes est inférieure à 0.01 et de manière significative si $0.01 < p\text{-value} < 0.05$. Tous les

indicateurs pour lesquels les moyennes du futur proche et du futur lointain sont représentés avec une p-value très significative et significative seront donc retenus pour l'analyse.

II.3.1.3. Le regroupement des sites

Pour essayer de regrouper les sites présentant une évolution climatique similaire, les graphiques vecteurs ont été utilisés. Etablis sous Excel, ils permettent de représenter l'évolution de 2 indicateurs écoclimatiques selon les 3 périodes analysées. Des couples d'indicateurs ont ainsi été construits pour pouvoir les comparer 2 à 2. C'est ainsi que sont comparés :

- La quantité de précipitations entre le semis et la levée (s0s1 rainsum) et entre la levée et le stade épi 1 cm (s1s2m10 rainsum) pour caractériser le risque de manque d'eau au semis et l'excès d'eau post-levée
- La quantité de précipitations entre la levée et le stade épi 1 cm et le nombre de jours d'enneigement sur cette même phase (s1s2m10 wetsoildays) pour caractériser l'effet pluie /humidité du sol en hiver.
- Le nombre de jours vernalisants (s1s2m10 verndays) et le quotient photothermique entre la levée et le stade épi 1 cm (s1s2m10 PTQ) pour mettre en évidence l'augmentation des températures durant cette phase.
- Le nombre de jours chauds autour du stade épi 1 cm (s2m10s2p10 hdaystmean) et le quotient photothermique entre épi 1 cm et la fin tallage (s2p10s3 PTQ) pour caractériser des températures plus chaudes autour et à partir du stade épi 1 cm.
- Le nombre de jours d'enneigement entre la levée et le stade épi 1 cm (s1s2m10 wetsoildays) puis entre le stade épi 1 cm et la fin tallage (s2p10s3 wetsoildays) pour caractériser l'excès d'eau sur 2 phases consécutives.
- Le quotient photothermique entre la levée et le stade épi 1 cm (s1s2m10 PTQ) puis entre le stade épi 1 cm et la fin tallage (s2p10s3 PTQ) pour caractériser l'effet des températures plus chaudes sur 2 phases consécutives.

II.3.2. L'analyse cartographique

L'analyse des indicateurs a permis de mettre en évidence les excès climatiques les plus problématiques dans le futur. En effet, pour certains indicateurs, les valeurs évoluent fortement alors qu'elles évoluent de manière plus modérée pour d'autres. Pour les indicateurs ayant une forte évolution sur les 12 sites étudiés, une analyse spatialisée sur l'ensemble du territoire a été effectuée pour une meilleure vision globale de la distribution géographique des risques.

Pour ce faire, Siclima a été utilisé et a fourni des cartes pour les indicateurs retenus. Une spatialisation par idéotype a été effectuée pour déterminer si l'effet variétal permettait ou non de contourner un risque climatique par exemple.

Partie 3. Résultats

III.1 Les résultats des tests préliminaires

Cette première sous-partie fait référence aux résultats obtenus à l'issue de la réalisation des tests préliminaires, en amont du calcul des indicateurs écoclimatiques. C'est ainsi que figurent dans le paragraphe III.1 les résultats faisant référence à la qualité prédictive du modèle phénologique et les résultats du test des indicateurs présentés dans le paragraphe II.3.

III.1.1. La qualité prédictive du modèle phénologique

Sur la Figure 18, représentant les données de phénologie simulée (données SICLIMA) et observée (données Epiphyt) pour 3 stades phénologiques (épi 1 cm, fin tallage et floraison) pour 3 années différentes. Nous pouvons observer que les dates de phénologie simulée sont légèrement supérieures à celles de la phénologie observée car elles sont situées au-dessus de la 1^{ère} bissectrice. Cela semble logique puisqu'il s'agit des résultats obtenus pour une variété de type tardive-tardive telle que décrite dans la partie II.1, alors que les données Epiphyt représentent la moyenne des dates observées pour une large gamme de variétés, des plus précoces aux plus tardives (non spécifiées dans la base).

En détaillant un peu plus les résultats obtenus pour une variété de type tardive-tardive, le Tableau 5 permet d'affirmer que l'effet « année » est très négligeable (à peine 3 à 4 jours d'écart, écart dû aux conditions climatiques). Ce tableau permet également de conclure que le modèle phénologique est très performant sur la prévision du stade épi 1cm (BBCH31) puisque seulement 2 à 4 jours d'écart et un peu moins sur les stades plus tardifs (dernière feuille étalée ainsi que floraison).

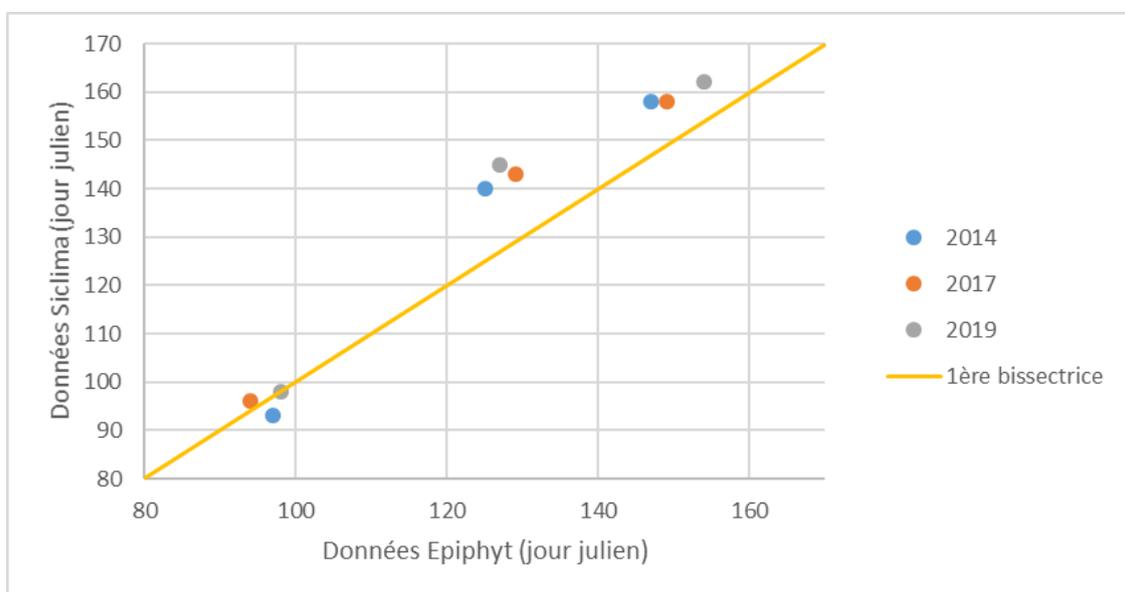


Figure 18 : Résultats de l'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique pour une variété de type tardive-tardive. Les résultats font référence aux médianes des phénologies observées et simulées sur l'ensemble des mailles CLC211 ce qui représente environ 3500 données pour la phénologie simulées et entre 3000 et 10000 données pour la phénologie observée (cela dépend du stade considéré). Le premier groupe de points fait référence au stade épi 1cm (BBCH31), le deuxième groupe au stade dernière feuille étalée (BBCH39) et le troisième groupe au stade floraison (BBCH65).

Tableau 5 : Synthèse des médianes des dates de stades phénologiques en jours juliens (numéro du jour de l'année) observés (Epiphyt) et simulés (Siclima) pour 3 années et pour 3 stades pour une variété de type tardive-tardive.

	Epi 1cm		BBCH39		BBCH65	
	Siclima	Epiphyt	Siclima	Epiphyt	Siclima	Epiphyt
2014	93	97	140	125	158	147
2017	96	94	143	129	158	149
2019	98	98	145	127	162	154

Dans le cas d'une variété précoce-précoce nous pouvons observer des différences par rapport à une variété tardive-tardive. En effet, sur la Figure 19, nous pouvons observer que les dates de phénologie simulée pour une variété de type précoce-précoce sont légèrement inférieures à celles de la phénologie observée car elles sont situées en-dessous de la 1^{ère} bissectrice.

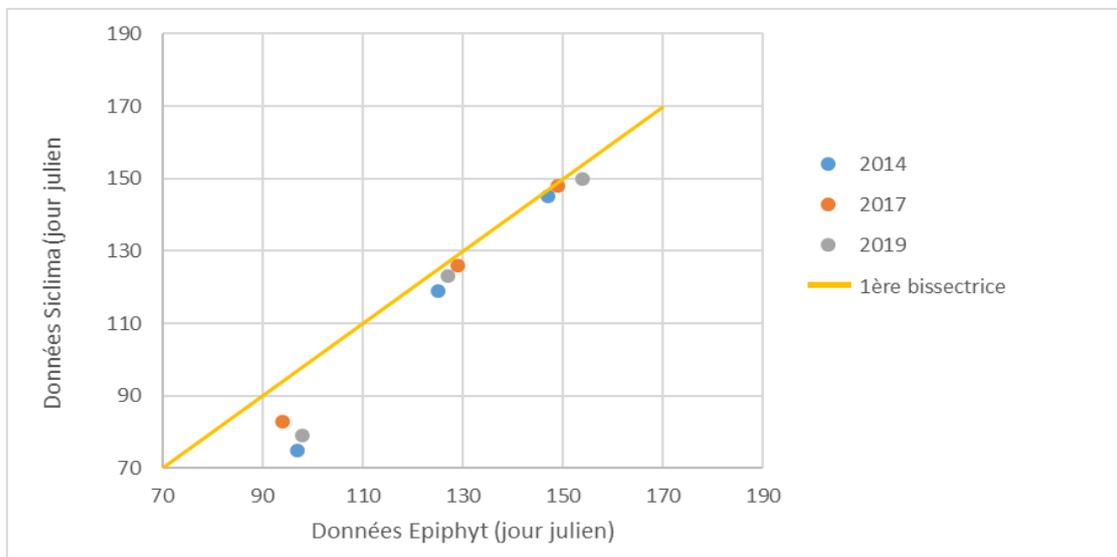


Figure 19 : Résultats de l'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique pour une variété de type précoce-précoce. Les résultats font référence aux médianes des phénologies observées et simulées sur l'ensemble des mailles CLC211 ce qui représente environ 3500 données pour la phénologie simulée et entre 3000 et 10000 données pour la phénologie observée (cela dépend du stade considéré). Le premier groupe de points fait référence au stade épi 1cm (BBCH31), le deuxième groupe au stade dernière feuille étalée (BBCH39) et le troisième groupe au stade floraison (BBCH65).

En détaillant un peu plus les résultats obtenus pour une variété de type précoce-précoce, le Tableau 6 permet là encore d'éliminer le facteur « année » comme source de variation importante. En revanche, contrairement à des variétés de type tardive-tardive, pour des variétés de type précoce-précoce, le modèle est beaucoup plus précis sur les stades tardifs (seulement 2 jours d'écart pour la floraison) et un peu moins sur les stades précoces (entre 15 et 20 jours d'écart pour le stade épi 1cm).

Tableau 6 : Synthèse des médianes des dates de stades phénologiques en jours juliens (numéro du jour de l'année) observés (Epiphyt) et simulés (Siclima) pour 3 années et pour 3 stades pour une variété de type précoce-précoce.

	Epi 1cm		BBCH39		BBCH65	
	Siclima	Epiphyt	Siclima	Epiphyt	Siclima	Epiphyt
2014	75	97	119	125	145	147
2017	83	94	126	129	148	149
2019	79	98	123	127	150	154

Pour l'ensemble des 2 idéotypes étudiés, les résultats sur les stades BBCH39 et BBCH65 sont satisfaisants. A l'inverse, les écarts sont plus importants pour le stade épi 1cm. Afin d'essayer de réduire cet écart, les calculs ont été réitérés de manière plus localisée selon l'idéotype considéré. En effet, dans le sud de la France, ce sont majoritairement des variétés précoces qui sont cultivées à l'inverse de la moitié Nord où les variétés tardives constituent la majorité des surfaces cultivées. Les calculs ont donc été affinés en considérant l'idéotype PP sur les régions Occitanie et Nouvelle-Aquitaine et l'idéotype TT sur les régions Hauts de France et Grand-Est. Les résultats sont beaucoup plus satisfaisants puisque comme l'indique le Tableau 7, l'écart pour épi 1cm est réduit à 2 jours en moyenne pour les 2 idéotypes.

Tableau 7 : Simulation (Siclima) et observation (Epiphyt) de la date du stade épi 1cm pour l'idéotype PP (à gauche) et TT (à droite)

Variété précoce-précoce		
	Siclima	Epiphyt
Min	65	50
Max	105	102
Med	81	84
Moy	80	82

Variété tardive-tardive		
	Siclima	Epiphyt
Min	85	77
Max	118	126
Med	99	105
Moy	99	101

III.2. Les résultats des tests des indicateurs déjà présents dans Siclima

III.2.1. L'indicateur de la somme des pluies en excès

L'année 2016 étant une année marquée par des mois de mai et juin très pluvieux ayant eu des répercussions notables sur les rendements en blé tendre, il s'agit d'une année référence pour tester les 3 indicateurs d'excès d'eau proposés par Siclima, à savoir :

- La somme des précipitations en excès : il s'agit de la somme des P-ETP journaliers. Si cette différence est positive, alors les précipitations sont comptabilisées en excès (apports > besoins). Les résultats simulés par Siclima sont comparables au bilan de campagne d'Arvalis. Sur la Figure 20, les cumuls calculés par la plateforme Siclima sont comparables à ceux du bilan de campagne d'Arvalis. L'indicateur associé est donc pertinent pour être utilisé.

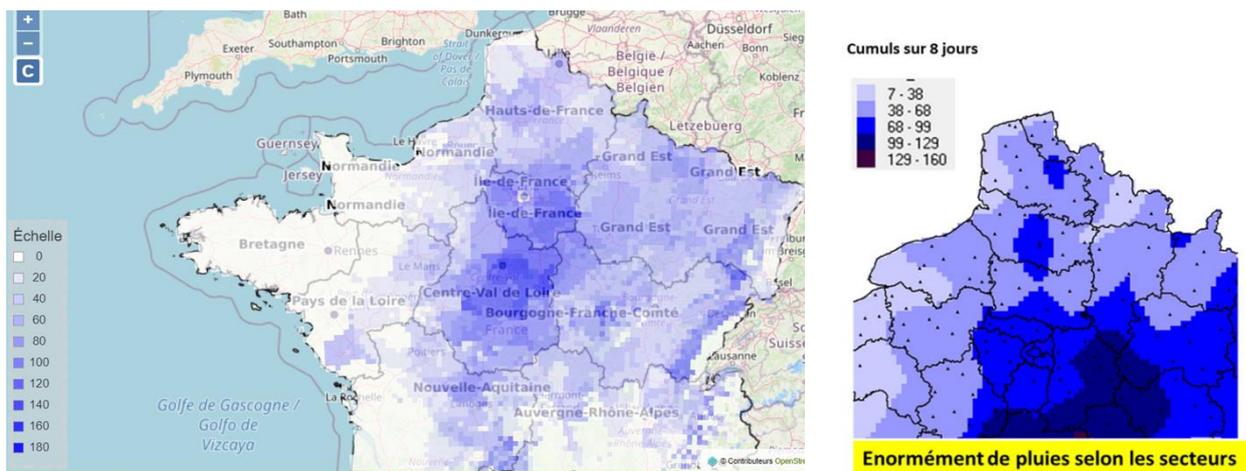


Figure 20 : Simulation des excès en eau observés pendant la phase de remplissage en 2016 (à gauche) et observations de la somme de précipitations issues du bilan de campagne d'Arvalis sur la même période (à droite) (Arvalis Institut du végétal, 2016)

III.2.2. Les indicateurs de rayonnement et plus particulièrement l'indicateur du nombre de jours de faible rayonnement

Nous avons confronté l'indicateur du nombre de jours de faible rayonnement à des résultats de campagne pour voir si la valeur seuil de 200 W/m^2 est adaptée, sur l'année 2016. Sur la Figure 21, le nombre de jours à faible rayonnement semble corrélé avec les pertes de rendements observés. Le seuil fixé à 200 W/m^2 semble donc adapté. Il ressort d'ailleurs dans de nombreuses publications (de Los Campos *et al.*, 2020). Cependant, le Sud-Ouest ne semble pas suivre la même tendance que le Centre. En effet, le déficit de rayonnement est tout aussi marqué mais le rendement n'est pas impacté. Il s'avère que dans le lauragais, les variétés cultivées sont plutôt précoces et donc elles n'ont pas été impactées de la même manière que les variétés tardives cultivées dans le Nord.

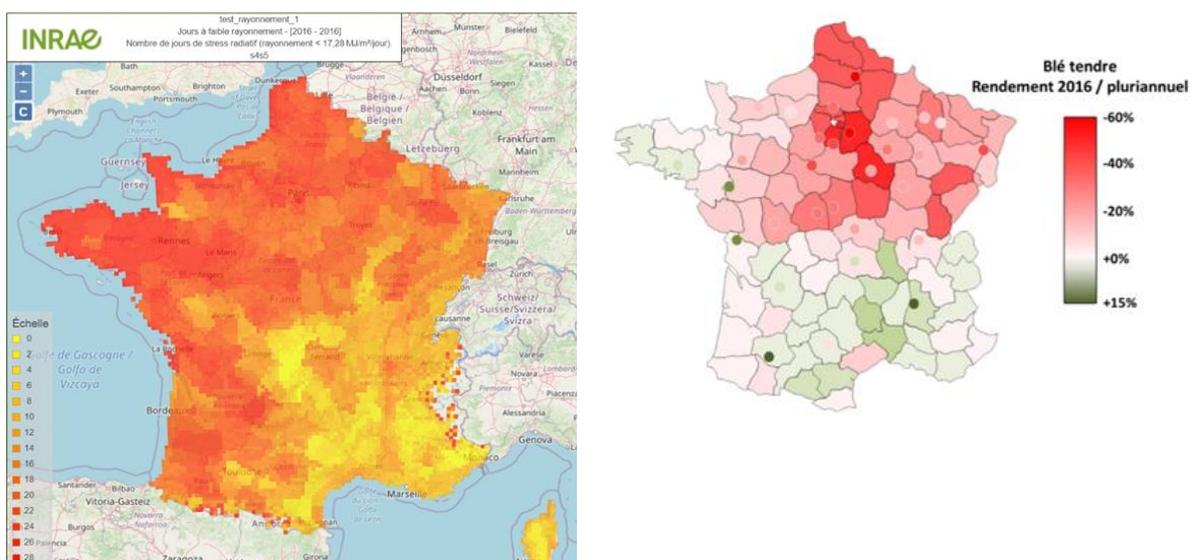


Figure 21 : Simulation du nombre de jours de faible rayonnement pendant la phase de remplissage sur l'année 2016 (à gauche) et pertes de rendements observées sur la même année (à droite) (Arvalis, institut du végétal, 2016)

III.2. Analyse de l'évolution de la durée des phases phénologiques

Dans cette partie, l'analyse de l'évolution de la durée des phases phénologiques fait appel à la correspondance jour julien/jour calendaire. Le tableau des correspondances figure en Annexe 3. Aussi, les résultats peuvent paraître décalés en ce qui concerne la station de Clermont (notamment pour le stade épi 1cm). Cela est normal car la station est située à Clermont-Theix, et se trouve à une altitude de 890m, ce qui en fait la station la plus froide des 12 sites. Par conséquent, les dates d'apparition des stades ou la durée des phases sur Clermont-Theix sont bien supérieures à l'ensemble des 11 autres sites. La Figure 22 ci-dessous permet de visualiser la durée de l'ensemble des phases du cycle physiologique sur 4 sites, pour les deux variétés de précocités les plus contrastées (PP et TT), et les 3 périodes, passé récent (RP), futur proche (NF) et futur lointain (FF).

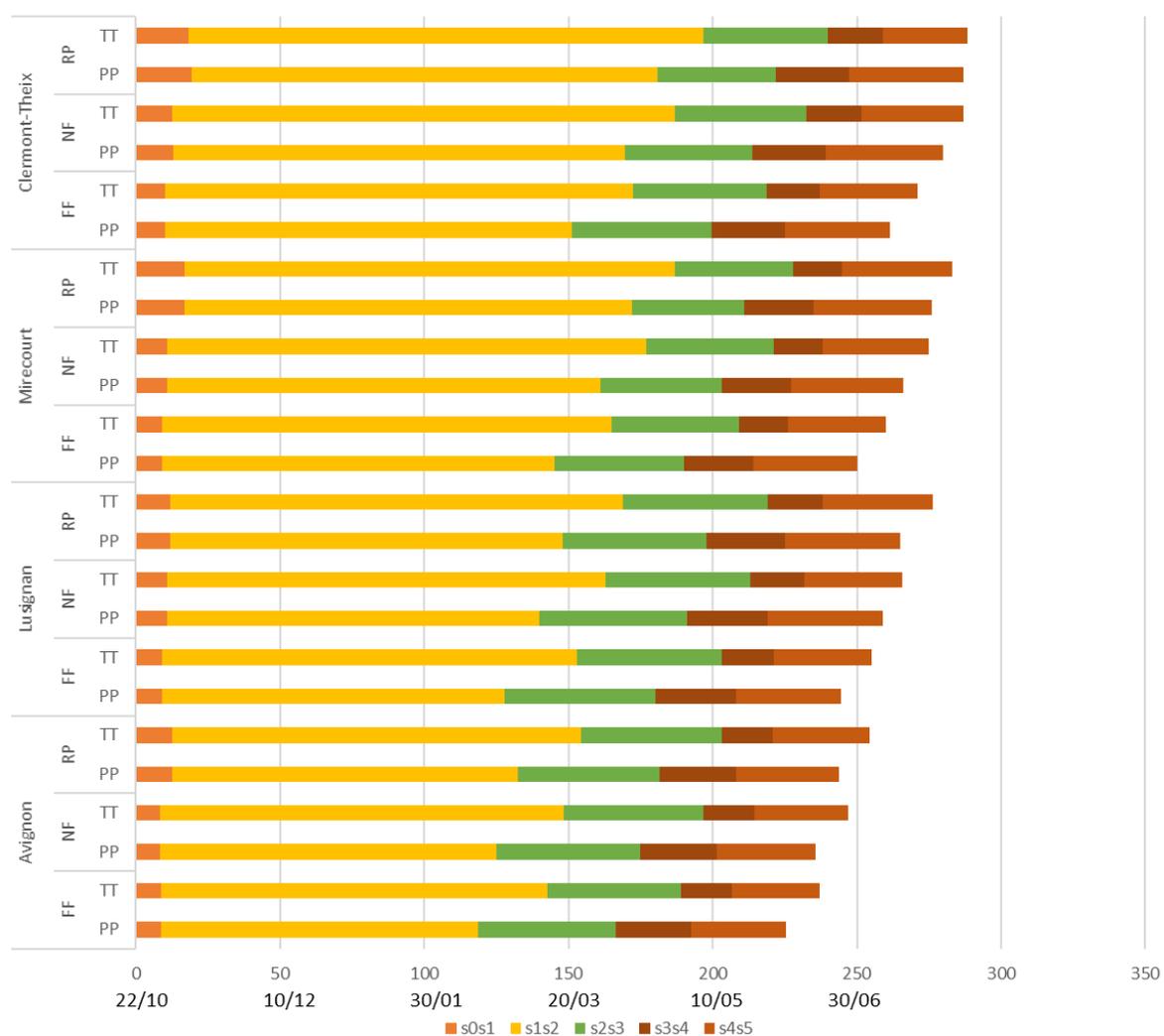


Figure 22 : Représentation de la durée des différentes phases phénologiques pour 4 sites et pour les 2 idéotypes extrêmes dans le passé récent (RP), le futur proche (NF) et le futur lointain (FF). s0s1 correspondant à la phase entre le semis et la levée ; s1s2 la phase entre la levée et le stade épi 1 cm ; s2s3 comprise entre le stade épi 1 cm et la fin du tallage ; s3s4 la phase entre la fin du tallage et la floraison et s4s5 la phase de remplissage.

Tout d'abord, la phase entre la levée et le stade épi 1cm se raccourcit sensiblement quelque soit l'idéotype considéré. Ainsi, pour un site chaud tel qu'Avignon pour une variété précoce, le stade épi 1cm pourrait être atteint mi-février dans le futur lointain. Cette avancée du stade épi 1cm est très problématique puisque cela expose la culture à des gelées plus marquées à cette période ce qui risque d'entraîner une perte importante de plantes si les gelées $< -7^{\circ}\text{C}$ se répètent.

Ensuite, la deuxième information importante est la durée de la phase de remplissage. En effet, celle-ci conditionne le PMG final. Plus elle est courte et plus le PMG final sera faible vu que le taux de remplissage reste identique. De plus, le fait que cette phase soit avancée de 3 semaines à Avignon par exemple, permet de contourner les très fortes chaleurs. En effet, d'une maturité atteinte aux alentours du 5 juillet pour une variété tardive, celle-ci pourrait être avancée au 5 juin, ce qui limite le risque d'exposition à de très fortes chaleurs dans le futur.

III.3. Les résultats du calcul des indicateurs écoclimatiques

Cette partie décrit les principaux résultats obtenus suite au calcul des indicateurs écoclimatiques élémentaires. Plusieurs niveaux d'analyse sont utilisés, de l'ensemble des indicateurs tous paramètres confondus (paragraphe III.3.1.1) à une analyse plus spécifique par sol (paragraphe III.3.1.2). De plus, une analyse du profil d'évolution par site est présentée dans le paragraphe III.3.2.

III.3.1. Les risques climatiques les plus à craindre dans le futur

III.3.1.1. Tous sols et variétés confondus

Les graphiques violons, dont un exemple se trouve Figure 23, permettent d'apporter une information cruciale pour effectuer le choix des indicateurs qui évoluent fortement, c'est-à-dire les indicateurs pour lesquels la p-value résultant du test de comparaison de moyennes de Wilcoxon est très significative (< 0.01) ou significative ($0.01 < \text{p-value} < 0.05$)

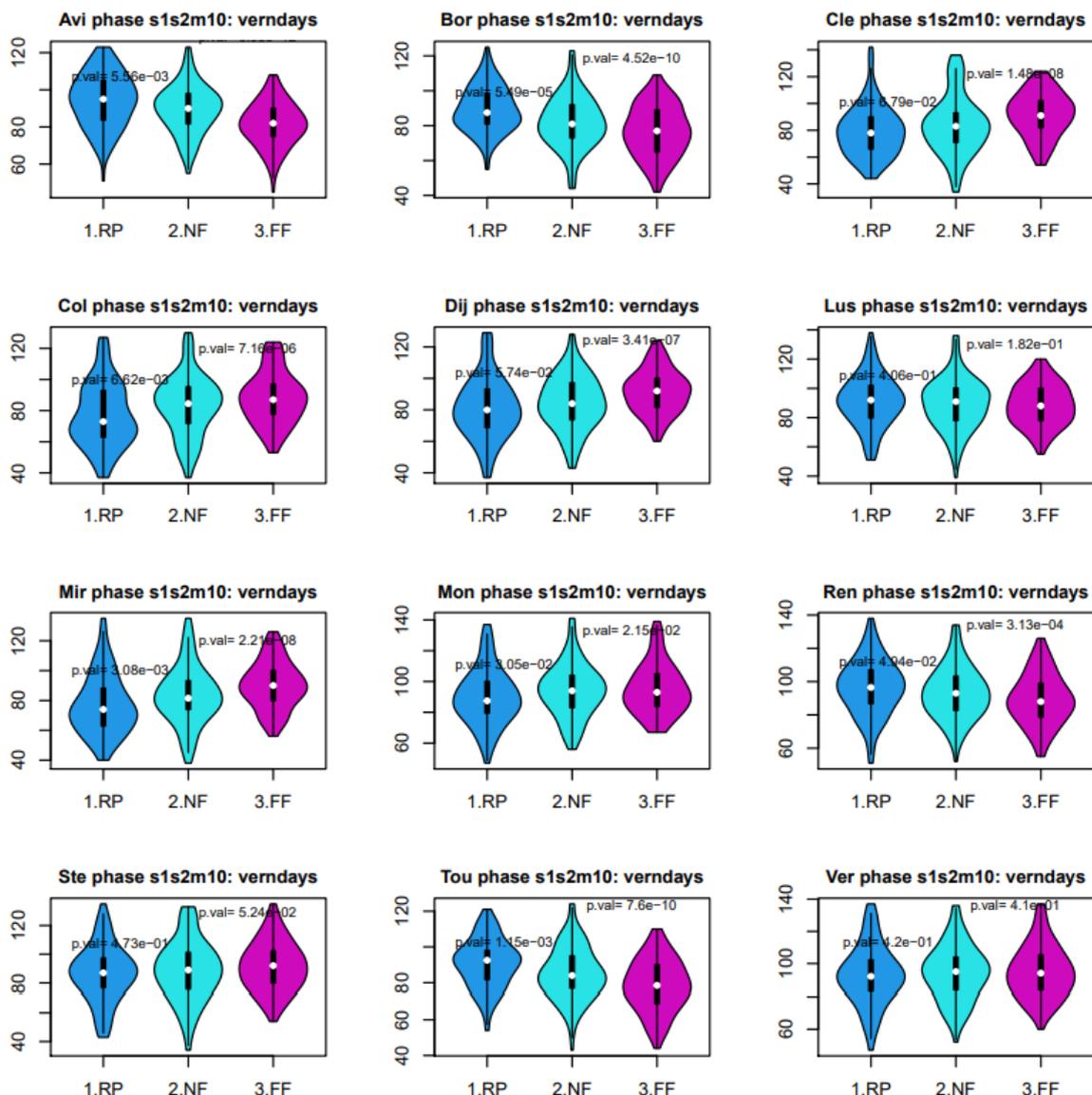


Figure 23 : Représentation de graphiques violons (ici pour le nombre de jours vernalisants) avec les valeurs de p-value concernant l'évolution des moyennes trentenaires

C'est ainsi qu'une liste d'indicateurs élémentaires évoluant fortement a été retenue. Il s'agit de :

- L'évolution des précipitations entre le semis et la levée et entre la levée et le stade épi 1cm ;
- Le nombre de jours vernalisants entre la levée et le stade épi 1cm ;
- Le quotient photothermique entre la levée et le stade épi 1 cm puis entre le stade épi 1 cm et la fin du tallage ;
- Le nombre de jours chauds 20 jours autour du stade épi 1cm ;
- La durée de la phase de remplissage ;

Ceux ne présentant pas de grands changements n'ont pas fait l'objet d'analyses plus détaillées, à savoir :

- Nombre de jours froids au stade épi 1 cm ;

- Températures moyenne minimale et maximale durant la phase entre la fin tallage et la floraison.

Les histogrammes de la Figure 24 ci-dessous, illustrent les évolutions pour les 7 indicateurs évoluant fortement dans le futur, et non dépendants du type de sol.

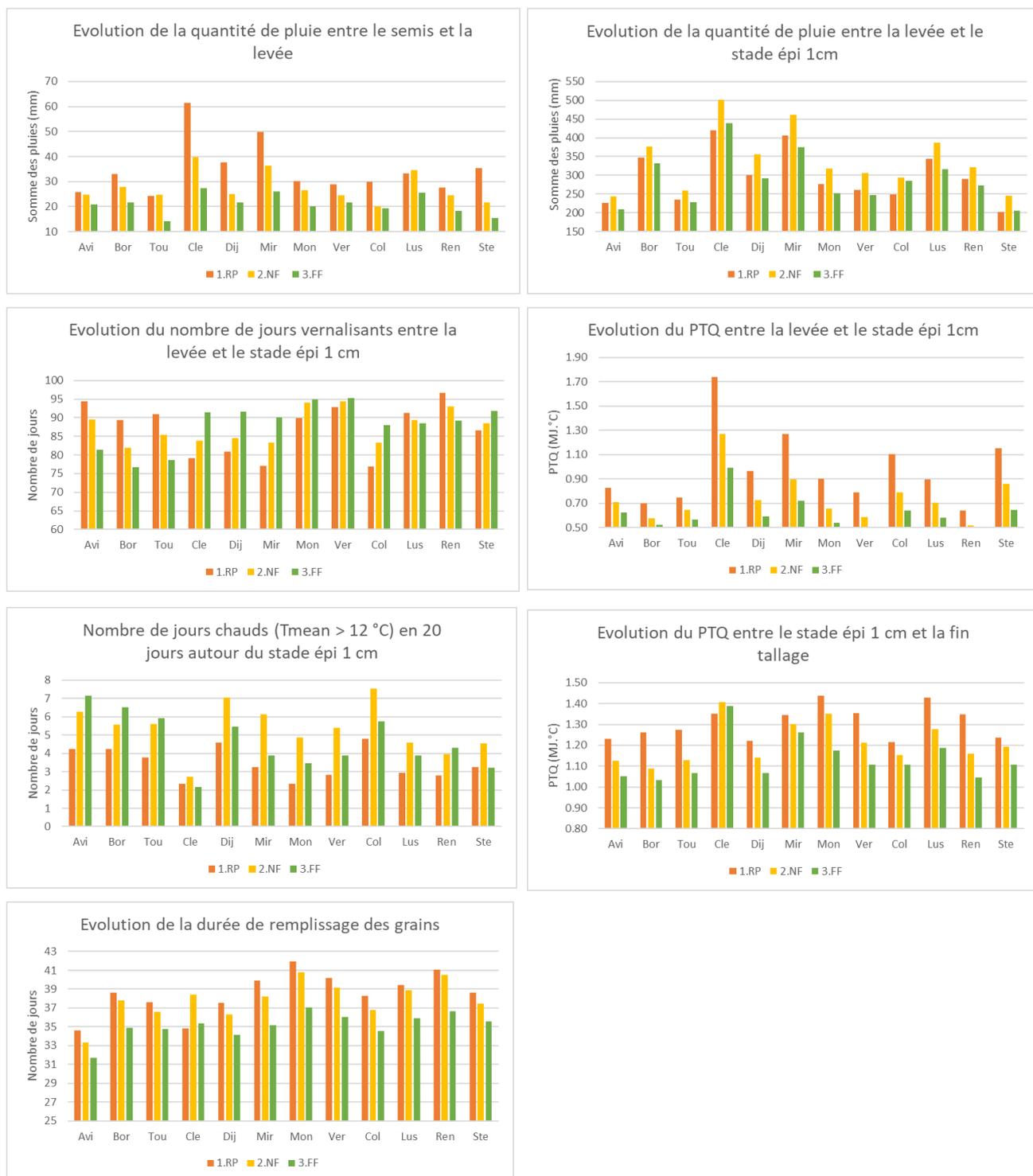


Figure 24 : Histogrammes de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les indicateurs évoluant fortement, c'est à dire avec une p-value très significative (<0.01) ou significative (0.01 < p-value <0.05)

Par lecture de ces graphiques, il apparaît pour la totalité des indicateurs que les évolutions sont plus fortes dans le futur lointain (la période 2071-2100) que dans le futur proche. Certains indicateurs ne présentant pas d'évolution majeure à court terme peuvent très bien devenir une menace à la fin du siècle. C'est le cas pour les indicateurs suivants :

- Les températures maximales moyennes durant la phase de remplissage, augmentant le risque d'échaudage ;
- Les températures maximales moyennes durant la phase de fin tallage à floraison ;
- Le déficit hydrique, qu'il soit approché via la méthode simple (Pluies – ETP) ou via la méthode incluant la SWC. Le déficit hydrique évolue peu mais présente une dangerosité surtout en partie terminale du cycle cultural.

Tout d'abord, la diminution marquée de la quantité de précipitations entre le semis et la levée peut retarder la levée et ainsi provoquer des pertes à la levée car plus elle est longue et plus la graine va épuiser ses réserves pour son métabolisme. La première composante du rendement risque donc d'être sensiblement affectée.

Ensuite, durant la phase séparant la levée et le stade épi 1cm, la culture doit remplir ses besoins vernalisants pour passer du stade végétatif au stade reproductif. Le nombre de jours vernalisants est donc important à analyser. Pour le blé, un jour est compté vernalisant si sa température moyenne est comprise entre 3 et 12°C. Dans le futur proche comme dans le futur lointain, une tendance apparaît. En effet, certains sites comptabilisent moins de jours vernalisants et d'autres plus. En analysant cette opposition, nous pouvons remarquer que les sites « chauds » tels qu'Avignon ou Toulouse se positionnent dans la première catégorie. En effet, avec l'élévation des températures, la température moyenne journalière excède plus facilement 12°C et donc le nombre de jours vernalisants diminue. A l'inverse, des sites au climat plus froid tels que Clermont ou Mirecourt connaissent une augmentation du nombre de jours vernalisants. Ce phénomène est lié à l'augmentation des températures minimales moyennes qui, d'origine trop fraîches (<3°C), se radoucissent pour se situer dans la plage de vernalisation. Cette double analyse permet donc de faire sortir du lot des territoires qui potentiellement pourraient accueillir cette culture et d'autres où cette dernière deviendrait plus compliquée. Cependant, après une analyse complémentaire, il s'est avéré que les besoins vernalisants pour chaque idéotype variétal seront remplis même dans le futur lointain.

Durant cette même phase et plus particulièrement autour du stade épi 1cm, les excès de chaleur entraînent la régression des talles si la température moyenne journalière excède 12°C pendant 15 jours autour de ce stade. Après analyse de cet indicateur, il ressort que les sites du Sud connaissent une forte augmentation du nombre de jours chauds et sont donc plus exposés à des problèmes de qualité du tallage, affectant directement la deuxième composante du rendement.

Le quotient photothermique (PTQ) renseigne sur l'efficacité de la photosynthèse. En effet, celle-ci est dépendante du rayonnement et de la température. Or, si l'on repart de la formule du quotient photothermique ($PTQ = \text{Rayonnement global} / T_{\text{moy}}$), plus la température moyenne de la phase sera élevée et plus le PTQ sera faible. Le PTQ devrait diminuer modérément dans le futur proche et de manière plus franche dans le futur lointain sur les 2 phases phénologiques pour lesquelles cet indicateur présente une évolution notable. Vu que la température moyenne augmente, la respiration de la culture va elle aussi augmenter ce qui se traduira par une quantité de photo-assimilats dédiée au métabolisme plus importante et donc une quantité moindre pour la mise en réserve. La photosynthèse étant moins efficace, le rendement s'en voit directement impacté.

Enfin, la durée de la phase de remplissage est cruciale pour obtenir un PMG et un remplissage optimaux. Dans le futur lointain, la durée de la phase de remplissage pourrait être raccourcie de 20% environ, ce qui représente 3 à 5 jours en moins pour les sites les plus chauds.

III.3.1.2. L'évolution des indicateurs de sol

Ayant décidé de travailler sur 2 sols aux caractéristiques différentes pour déterminer 2 niveaux de stress contrastés, il est nécessaire d'analyser les indicateurs élémentaires faisant appel aux données de sol pour voir si une différence est notable. 2 indicateurs élémentaires sont basés sur les propriétés du sol : l'indicateur « wetsoildays » et l'indicateur « swccc ». Le premier étant le nombre de jours d'enneigement de la phase considérée (défini comme le nombre de jours où la SWC > CC²) et le deuxième étant le rapport SWC/CC de la phase considérée. Après la réalisation du test de comparaison de moyennes, il s'est avéré que l'indicateur « swccc » ne présentait pas de grands changements entre les périodes. L'analyse porte donc sur l'indicateur du nombre de jours d'enneigement calculé sur 2 phases phénologiques. Sur la Figure 25, nous pouvons voir que les problèmes d'enneigement diminuent entre la levée et le stade épi 1cm mais se renforcent nettement entre le stade épi 1cm et la fin du tallage. De plus, les évolutions sont bien plus marquées sur le sol S2 (à faible RU) ce qui est normal vu que le seuil d'enneigement est plus vite atteint. C'est donc sur ce type de sol que les problèmes liés à l'enneigement risquent de se manifester (anoxie, blocage dans l'assimilation des minéraux ...).

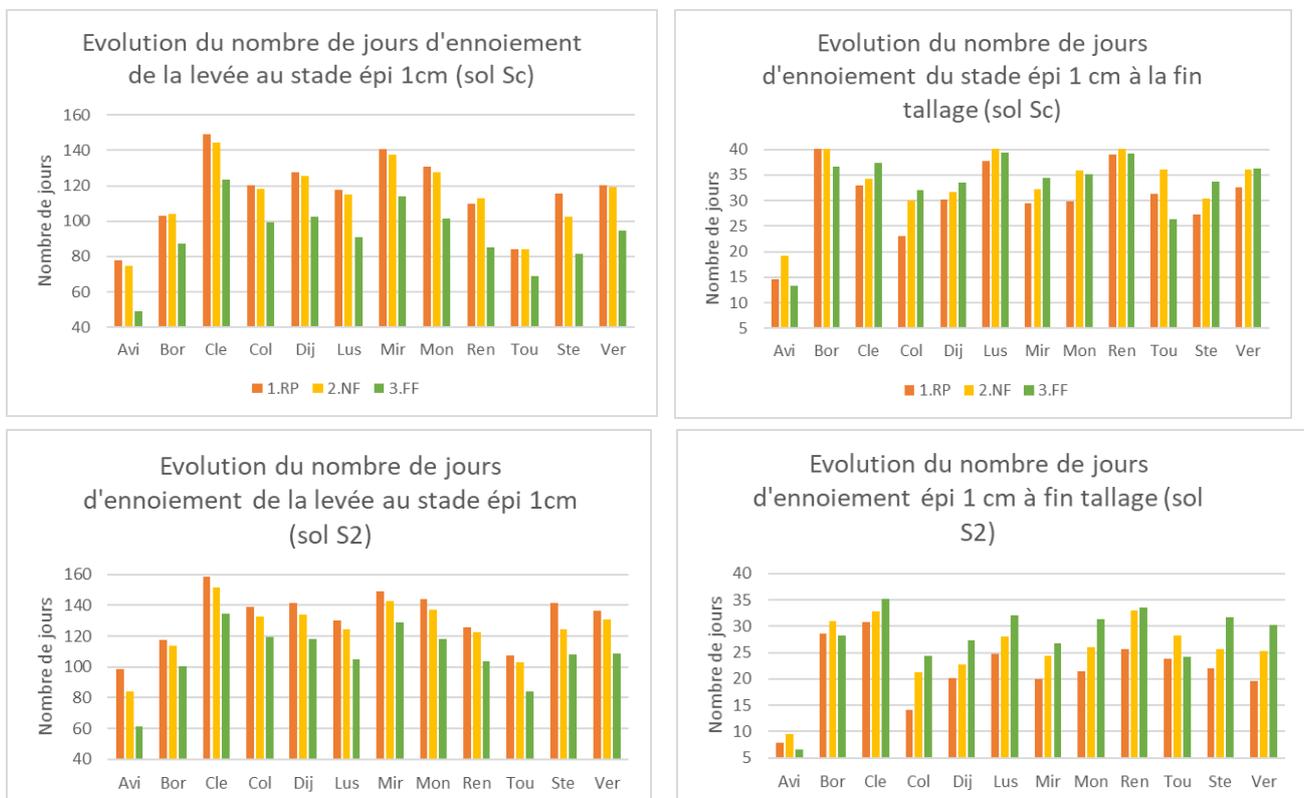


Figure 25 : Histogrammes de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les indicateurs sol-dépendant.

² SWC : teneur en eau du sol à un instant donné et CC : capacité au champ du sol.

Le Tableau 8 ci-dessous permet d'obtenir les valeurs des moyennes des indicateurs sur les 3 périodes, ce qui permet d'avoir des valeurs précises, apportant une information complémentaire à celle apportée par les graphiques d'évolution. Ce tableau permet de corréler les anomalies précédentes avec des valeurs. Ainsi, la double tendance de l'évolution du nombre de jours vernalisants est mise en évidence par exemple.

Tableau 8 : Moyennes des différents indicateurs écoclimatiques sur les 12 sites et pour les 3 périodes (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain). Les nombres en gras représentent les évolutions associées à une p-value très significative (<0.01) et les nombres soulignés représentent les évolutions associées à une p-value significative (0.01 < p-value <0.05).

Indicateurs météorologiques		Avi	Bor	Cle	Col	Dij	Lus	Mir	Mon	Ren	Ste	Tou	Ver
Semis - levée rainsum Somme pluies (mm)	1.RP	26	33	61	30	38	33	50	30	28	35	24	29
	2.NF	<u>25</u>	<u>28</u>	40	20	25	35	36	<u>27</u>	<u>25</u>	22	25	<u>25</u>
	3.FF	21	22	27	19	22	26	26	20	18	15	14	22
Levée - épi 1cm verndays Jours vernalisants	1.RP	94	89	79	77	81	91	77	90	97	87	91	93
	2.NF	<u>89</u>	82	84	83	85	89	83	<u>94</u>	<u>93</u>	89	85	94
	3.FF	81	77	91	88	92	89	90	95	<u>89</u>	92	79	95
Levée - épi 1cm PTQ Quotient photothermique (MJ.°C)	1.RP	0,83	0,70	1,74	1,10	0,97	0,90	1,27	0,90	0,64	1,15	0,75	0,79
	2.NF	0,71	0,57	1,27	0,79	0,73	0,70	0,90	0,65	0,52	0,86	0,64	0,59
	3.FF	0,62	0,52	0,99	0,64	0,59	0,58	0,72	0,54	0,43	0,64	0,57	0,48
Levée - épi 1cm rainsum Somme pluies (mm)	1.RP	225	346	420	248	301	343	406	277	291	203	236	261
	2.NF	<u>243</u>	376	501	293	355	387	462	319	322	245	260	306
	3.FF	<u>209</u>	331	440	285	293	<u>316</u>	375	252	273	205	227	247
Autour épi 1 cm hdaystmean Nombre de jours chauds (Tmean > 12°C)	1.RP	4	4	2	5	5	3	3	2	3	3	4	3
	2.NF	6	<u>6</u>	3	8	7	5	6	5	<u>4</u>	<u>5</u>	6	5
	3.FF	7	7	2	6	5	4	4	3	4	3	6	4
Epi 1 cm - fin tallage PTQ Quotient photothermique (MJ.°C)	1.RP	1,23	1,26	1,35	1,21	1,22	1,43	1,34	1,44	1,35	1,24	1,27	1,35
	2.NF	1,13	1,09	1,41	1,15	1,14	1,28	1,30	1,35	1,16	1,19	1,13	1,21
	3.FF	1,05	1,03	1,39	1,11	1,07	1,19	1,26	1,17	1,05	1,11	1,07	1,11
Remplissage phalen Durée de la phase (jours)	1.RP	35	39	35	38	38	39	40	42	41	39	38	40
	2.NF	33	38	38	37	36	39	38	41	41	37	37	39
	3.FF	32	35	35	35	34	<u>36</u>	35	<u>37</u>	37	36	35	<u>36</u>
Indicateurs sol-dépendant pour Sc													
Levée - épi 1 cm wetsoildays	1.RP	78	103	149	120	128	118	141	131	110	116	84	121
	2.NF	75	104	145	118	125	115	138	128	113	102	84	119
	3.FF	49	87	124	99	103	91	114	101	85	81	69	95
Epi 1cm - Fin tallage wetsoildays	1.RP	15	40	33	23	30	38	29	30	39	27	31	33
	2.NF	19	43	34	30	32	41	32	36	41	30	36	36
	3.FF	13	37	37	32	34	39	34	35	39	34	26	36
Indicateurs sol-dépendant pour S2													
Levée - épi 1 cm wetsoildays	1.RP	98	117	158	139	141	130	149	144	126	142	108	136
	2.NF	84	114	152	132	134	124	143	137	122	125	103	131
	3.FF	62	101	135	119	118	105	129	118	104	108	84	109
Epi 1cm - Fin tallage wetsoildays	1.RP	8	29	31	14	20	25	20	21	26	22	24	20
	2.NF	9	31	33	21	23	28	24	26	33	26	28	25
	3.FF	7	28	35	24	27	32	27	31	34	32	24	30

III.3.1.3. Les indicateurs à faible évolution mais présentant un risque majeur pour la culture

Certains indicateurs écoclimatiques évoluent peu dans le futur (c'est-à-dire moyennes trentenaires ne présentant pas d'évolution significative) mais présentent un risque avéré pour la culture. Comme l'illustre le Tableau 9 ci-dessous, il s'agit des indicateurs présentés en 3^{ème} colonne. Les risques de déficit hydrique apparaissent comme notables durant les périodes sensibles, à partir du stade épi 1 cm. Ils se concentrent essentiellement sur les sites du Sud et sont plus importants sur les sols à faible réserve utile.

Tableau 9 : Synthèse de l'évolution des indicateurs (à forte et faible évolution) par site et par période. NF étant le futur proche et FF le futur lointain.

Phase	Indicateurs à forte évolution		Indicateurs à faible évolution		Site	Période
Semis-levée	Somme précipitations	↘			Tous	NF - FF
			Ennoiement	↗	Bor, Lus	FF
Levée - épi 1 cm	Somme précipitations	↗ puis ↘			Tous	NF (↗) puis FF (↘)
	Ennoiement (sols S2 et Sc)	↘			Tous	NF - FF
	Nombre jours vernalisants	↗ ou ↘			Avi, Bor, Lus, Ren, Tou (↘) Cle, Col, Dij, Lus, Mir, Mon, Ste (↗)	NF - FF
Epi 1 cm	Nombre jours chauds	↗ puis ↘			Tous	NF (↗) puis FF (↘)
Epi 1 cm - fin tallage			Déficit hydrique	↗	Avi	NF - FF
	Ennoiement (sol S2)	↗↗			Tous	NF - FF
	Ennoiement (sol Sc)	↗ puis →			Bor, Cle, Col, Dij, Lus, Mir, Mon, Ren, Ste	NF (↗) puis FF (→)
			Déficit hydrique (P - ETP)	↗	Tous	NF - FF
Fin tallage - floraison			Déficit hydrique (SWC/CC)	↗↗ (sol S2) - ↗ (sol Sc)	Avi, Bor, Lus, Ver	NF - FF
Floraison - maturité	Durée remplissage	↘			Tous	NF - FF
			Echaudage	↗	Avi	FF
			Déficit hydrique (P - ETP)	↗	Tous	NF - FF
			Déficit hydrique (SWC/CC)	↗ (sols Sc et S2)	Avi	NF - FF

III.3.2. Les sites présentant une évolution climatique commune

L'analyse des sites au profil similaire est très pertinente puisqu'elle permet de mettre en évidence les territoires à tendance climatique commune et ainsi adapter le choix variétal en fonction des risques climatiques les plus à craindre. Voici les principales tendances issues de la réalisation des graphiques vecteurs, comparant les indicateurs 2 à 2.

La Figure 26 reprend les résultats pour les indicateurs indépendants du type de sol. Tout d'abord, sur la Figure 26.a, la quantité de précipitations entre le semis et la levée diminue fortement que ce soit dans le futur proche ou lointain. En revanche, on observe sur la phase entre la levée et le stade épi 1 cm, une augmentation de la quantité de précipitations dans le futur proche, puis une diminution dans le futur lointain pour revenir à des niveaux généralement similaires à ceux du passé récent. Sur cette phase-là, le déficit hydrique n'est donc pas à craindre. Au contraire, des problèmes d'enneiement peuvent rapidement apparaître.

Globalement, le quotient photothermique diminue entre la levée et la fin du tallage dans le futur (Figure 26.c), seul le site de Clermont montre une diminution jusqu'à épi 1 cm, puis un maintien du quotient photothermique jusqu'à fin tallage.

Ensuite, si l'on analyse l'évolution des journées chaudes en lien avec le quotient photothermique (Figure 26.d) le lien entre ces 2 indicateurs peut rapidement s'établir. En effet,

de manière générale, le quotient photothermique diminue dans le futur et le nombre de journées chaudes autour du stade épi 1 cm tend à augmenter de manière très significative. Une progression est constatée du Sud au Nord. En effet, après lecture de la Figure 26.d, le nombre de journées chaudes actuellement rencontré dans les sites du Sud (Avignon, Bordeaux par exemple) pourrait devenir celui rencontré à la fin du siècle dans des sites plus froids tel que Mirecourt par exemple. Cela laisse donc présager d'une part que le tallage sera moins efficace par une régression des tiges plus importante, due à l'augmentation des journées chaudes et que la diminution du quotient photothermique, liée à l'augmentation de la température moyenne, va accentuer l'utilisation des assimilats de la photosynthèse par la plante pour son propre métabolisme ce qui se traduit par une moindre efficacité de mise en réserve et donc une plus faible biomasse végétale.

De plus, l'augmentation des températures joue sur le processus de vernalisation. C'est ainsi qu'en analysant la Figure 26.b, 2 tendances se dégagent quant à l'évolution du nombre de jours vernalisants. Les sites du Sud connaissent une forte diminution tels qu'Avignon, Bordeaux ou Toulouse alors que les sites d'origine froids connaissent une forte progression tels que Mirecourt, Mons ou Colmar. Par exemple, le nombre de jours vernalisants rencontré à Avignon dans le futur proche sera similaire à celui rencontré à Mirecourt dans le futur lointain. Quant au quotient photothermique sur cette même période, il diminue quel que soit le site, traduisant là encore le réchauffement hivernal.

Pour résumer sur les indicateurs indépendants du type de sol, voici les principaux points clés issus de cette analyse :

- Une diminution marquée des précipitations entre le semis et la levée risquant d'entraîner des pertes à la levée notamment dans les sites secs tels qu'Avignon ou Toulouse.
- Une évolution opposée des sites chauds par rapport aux sites froids en ce qui concerne le nombre de jours vernalisants. Une forte diminution pour les sites d'Avignon, Bordeaux et Toulouse et une augmentation pour les sites plus au Nord pour arriver dans ces sites là à des niveaux que nous rencontrons aujourd'hui dans le Sud.
- Une diminution généralisée du quotient photothermique sur l'ensemble des sites.

- Une augmentation du nombre de journées chaudes autour du stade épi 1 cm rendant le tallage moins efficace, notamment dans les sites du Sud. Le gradient Nord/Sud est encore assez net, puisque les sites du Nord pourrait connaître un nombre de journées chaudes dans le futur lointain similaire à celui rencontré aujourd'hui dans les sites du Sud.

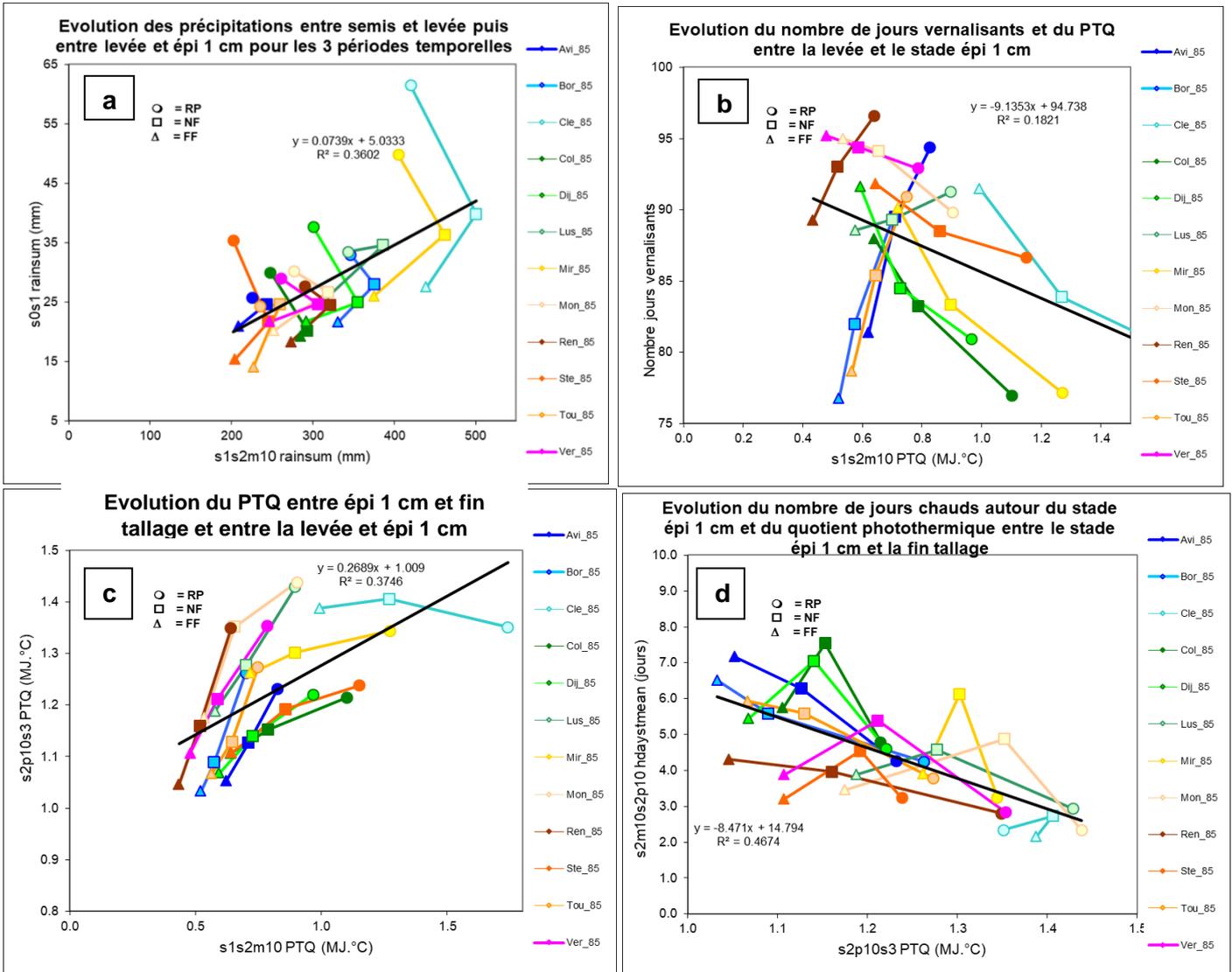


Figure 26 : Graphiques vecteurs de l'évolution des moyennes trentennaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les couples d'indicateurs d'intérêt.

La Figure 27 met en évidence l'évolution des indicateurs sol-dépendant. Tout d'abord, l'enneigement étant une source importante d'altération de la culture, l'évolution du nombre de jours d'enneigement est donc importante à analyser. C'est l'objet de La Figure 27.b et 27.d. La tendance générale met en avant une diminution du nombre de jours d'enneigement entre la levée et le stade épi 1 cm et une augmentation entre le stade épi 1 cm et la fin du tallage dans le futur proche puis une diminution dans le futur lointain, quelque soit le type de sol considéré. Cependant, les niveaux d'enneigement restent toutefois plus modérés pour le sol Sc (le sol commun) qui présente une RU supérieure au sol S2. En effet, pour Avignon, environ 100 jours d'enneigement sont constatés dans le passé récent pour le sol à faible RU et 80 jours avec le sol commun. Cependant, le rapprochement entre sites reste délicat.

De plus, en analysant le nombre de jours d'enneigement entre la levée et le stade épi 1 cm en fonction de la quantité de précipitations sur cette même phase (Figure 27.a et 27.c) la variable précipitations est directement corrélée au nombre de jours d'enneigement. Ainsi, quelque soit le site considéré, les précipitations augmentant dans le futur proche, alors le nombre de jours d'enneigement reste quasiment identique à celui rencontré dans le passé récent sur la plupart des sites. A l'inverse, les précipitations diminuant fortement dans le futur lointain, le nombre de jours d'enneigement chute lui aussi, avec une diminution plus marquée pour le sol à faible RU.

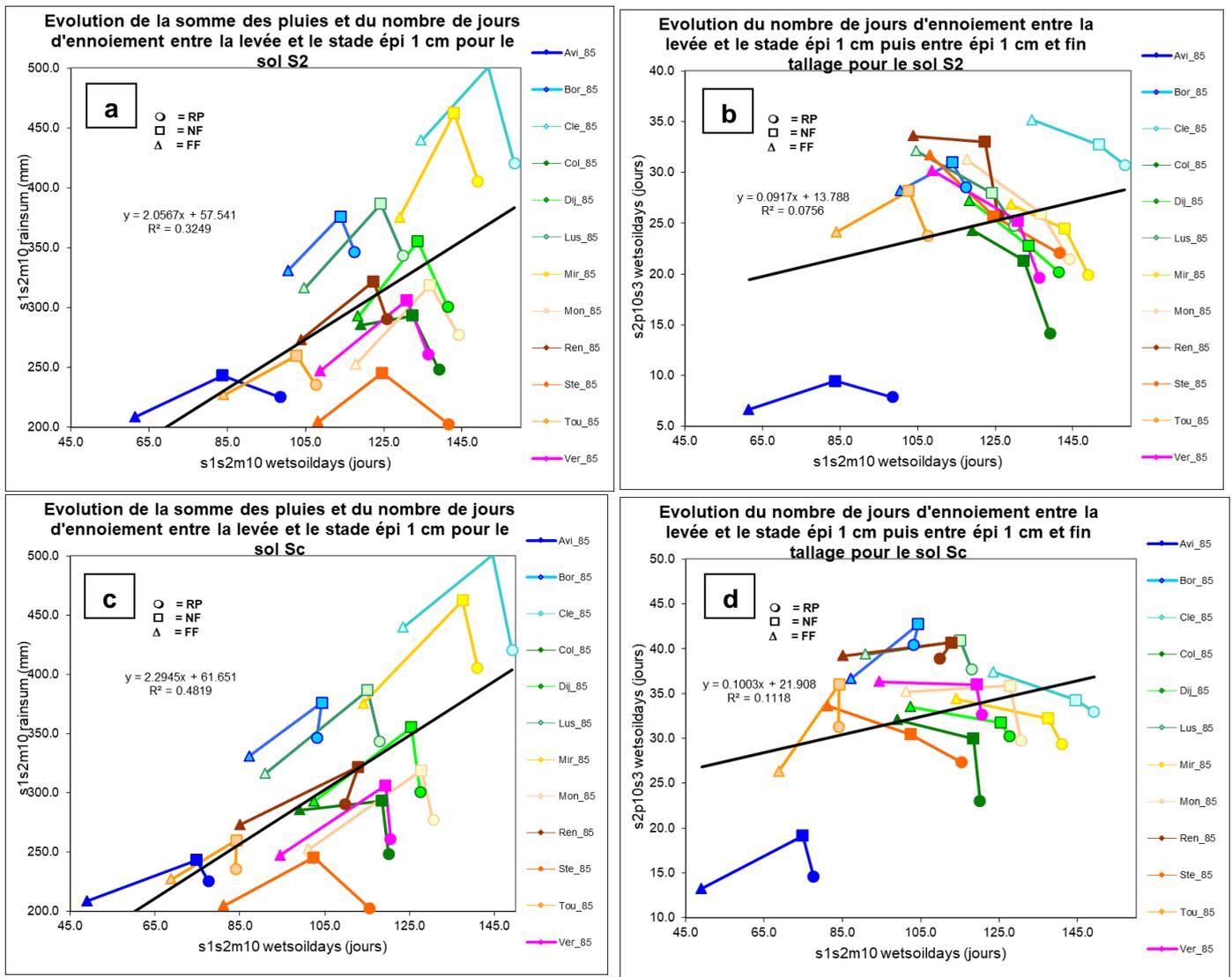


Figure 27 : Graphiques vecteur de l'évolution des moyennes trentennaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les couples d'indicateurs sol-dépendant.

III.3. La spatialisation des indicateurs d'intérêt

Pour rendre compte de l'évolution de la distribution géographique d'un risque climatique donné à plus grande échelle, nous avons représenté ces indicateurs de manière spatialisée. En effet, l'analyse statistique effectuée n'est basée que sur les 12 sites retenus pour l'étude alors que la spatialisation rend compte du comportement de l'indicateur sur l'ensemble de la métropole. C'est ainsi que de plus larges bassins/zones de production à l'évolution commune peuvent être mis en évidence. Pour ce travail, le logiciel SICLIMA a été utilisé (démarche identique à celle effectuée pour les tests préliminaires concernant les indicateurs d'excès d'eau et de rayonnement). Les indicateurs ayant un intérêt de spatialisation sont les mêmes que ceux analysés dans le paragraphe II.1.1 à l'exception de « rainsum s1s2m10 » (cumul des précipitations entre levée et épi 1 cm moins 10 jours) car cet indicateur ne présente pas de risque pour la culture.

Tout d'abord, la Figure 28 ci-dessous permet de visualiser les zones qui sont potentiellement exposées à des problèmes de germination liés à un défaut de précipitations. Nous pouvons remarquer que la somme des précipitations est de plus en plus faible au fil du temps. En effet, dans les grands bassins de production de blé tendre, la quantité de précipitations entre semis et levée dans le passé récent se situe aux alentours de 80 mm ce qui est suffisant pour la germination. A horizon 2100, cette quantité diminue brusquement sur l'ensemble du territoire avec en grande moyenne moins de 40 mm sur la phase. Les cartes étant établies via une moyenne trentenaire par période, cela laisse présager des années avec un déficit important et donc une germination potentiellement délicate. Cette tendance s'applique également aux autres idéotypes.

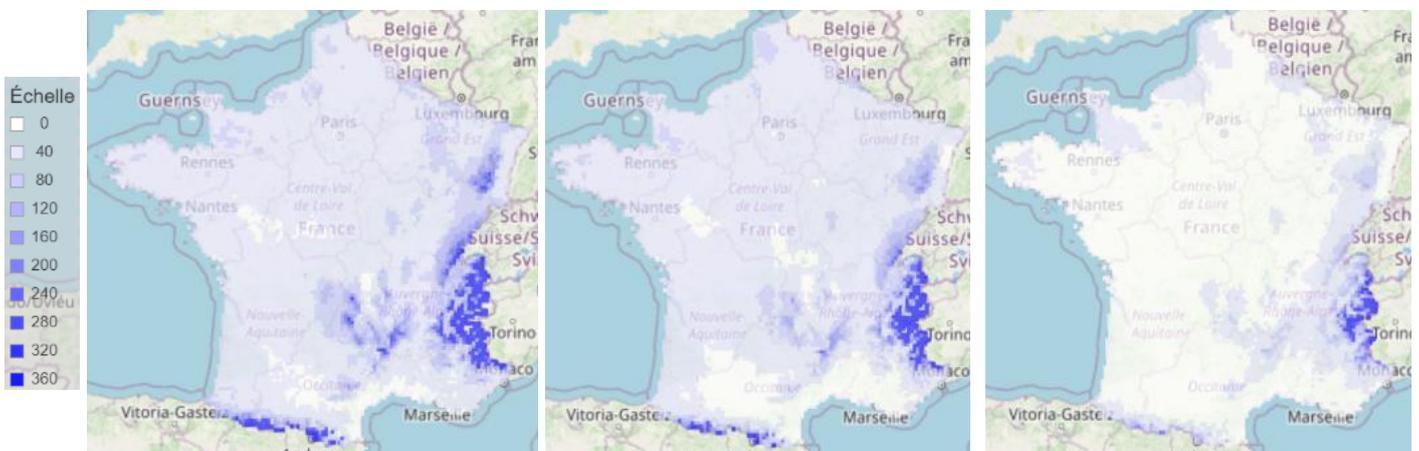


Figure 28 : Spatialisation de la quantité de précipitations entre le semis et la levée (en mm). Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.

Ensuite, en ce qui concerne le nombre de jours vernalisants, la tendance reste la même pour les 4 idéotypes. Sur la Figure 29, nous pouvons remarquer que dans le futur lointain, le nombre de jours vernalisants diminue fortement dans les zones de plaine (pourtour méditerranéen, Lauragais ...) mais augmente en zone de moyenne altitude (Massif Central par exemple) là où ce nombre était faible dans le passé récent. Cela est très intéressant à analyser car c'est bel et bien un signe de l'augmentation des températures sur cette période. En effet, dans les zones de plaine, les températures maximales deviennent trop élevées et donc les jours de vernalisation nette diminuent. A l'inverse, dans les zones à températures minimales froides dans le passé récent, le nombre de jours vernalisants augmente car les températures

minimales se radoucissent au-delà du seuil minimal nécessaire pour cette culture. Cela laisse donc présager une culture possible dans de nouvelles zones plus en altitude.

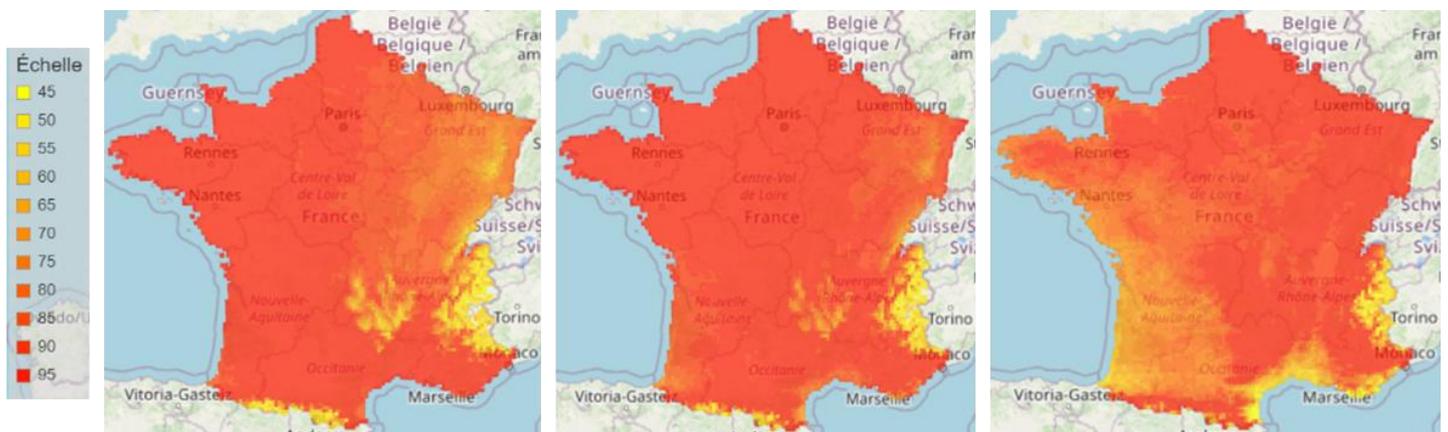


Figure 29 : Spatialisation du nombre de jours vernalisants entre la levée et le stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.

Le quotient photothermique diminue sensiblement dans le futur lointain que ce soit sur la phase entre la levée et épi 1cm ou bien sur la phase entre épi 1 cm et méiose. La Figure 30 ci-dessous illustre l'évolution de ce dernier entre la levée et le stade épi 1 cm. Sa diminution marquée en toutes zones résulte d'une hausse de la température moyenne. En effet, en se basant sur sa formule de calcul (rayonnement / température moyenne), si le quotient diminue, c'est bel et bien du à une hausse de la température moyenne. Au niveau écophysiole, cela se traduit par une transpiration plus élevée et donc à une utilisation plus importante des métabolites pour le métabolisme primaire de la culture et donc une moindre quantité dédiée à la mise en réserve.

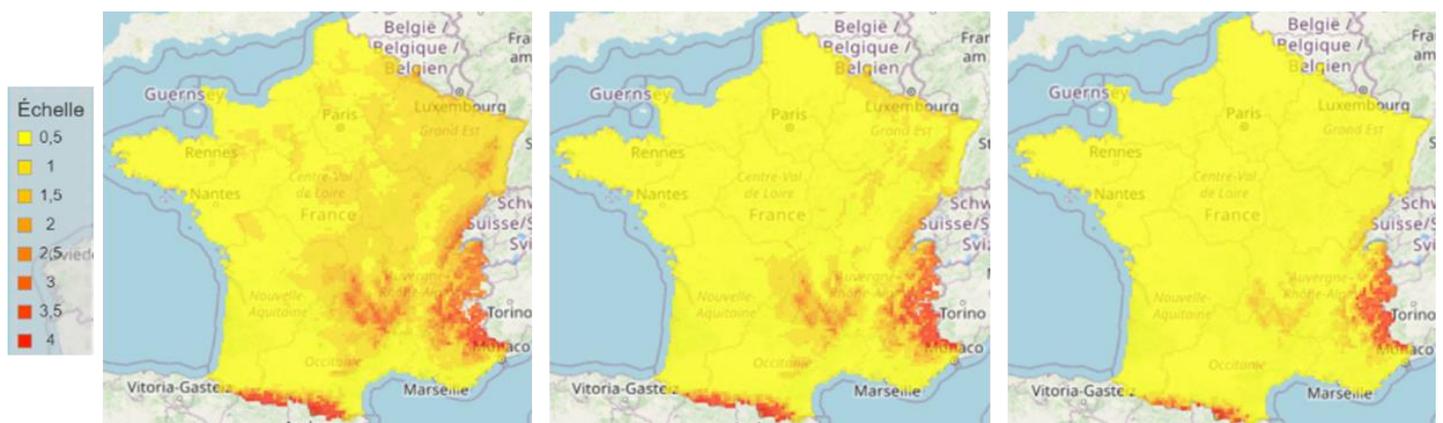


Figure 30 : Spatialisation du quotient photothermique (en MJ.°C) entre la levée et le stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.

En ce qui concerne les jours chauds autour du stade épi 1 cm et favorisant la régression des talles, l'effet variétal peut s'avérer utile pour éviter ce risque. En effet, comme l'illustre la Figure 31, les variétés tardives sont plus exposées à des températures moyennes > 12°C durant cette phase, notamment dans la vallée du Rhône, le pourtour méditerranéen et le Lauragais. En implantant des variétés précoces, ce risque semble évité puisque les plus hautes valeurs rencontrées à horizon 2100 n'excèdent pas 11°C. Le choix variétal apparaît donc primordial pour contourner ce risque.

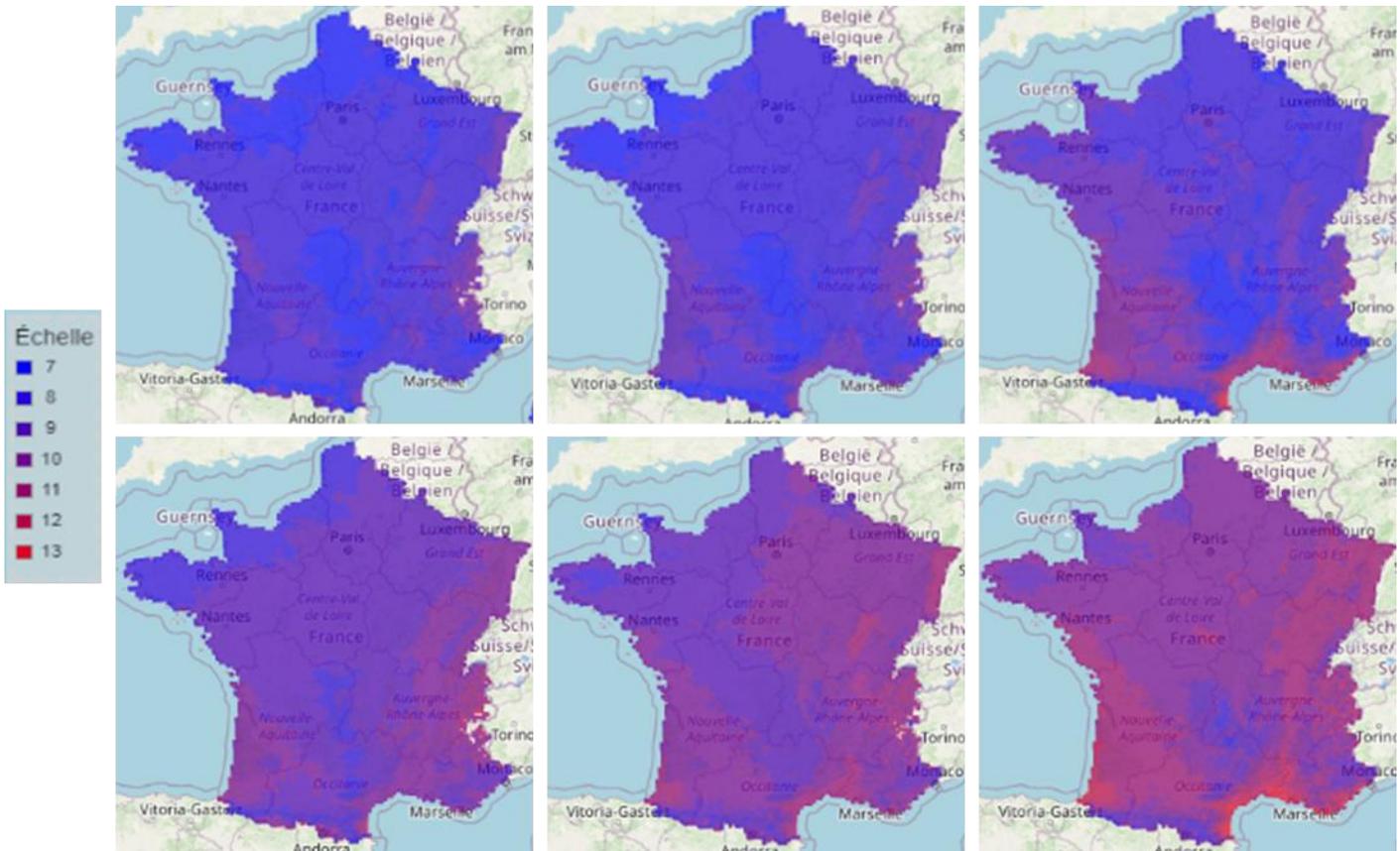


Figure 31 : Spatialisation de la moyenne des températures moyennes (en °C) sur la phase de 20 jours autour du stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la colonne de gauche, le futur proche par la colonne du milieu et le futur lointain par la colonne de droite. La ligne du haut représente l'idéotype précoce-précoce et la ligne du bas l'idéotype tardif-tardif.

Partie 4. Discussion, perspectives et limites de l'étude

L'objectif de la présente étude était de connaître l'évolution des principaux risques climatiques auxquels sera confrontée la culture de blé tendre à horizon 2100 en France dans un contexte de changement climatique. Ensuite, grâce au calcul d'indicateurs écoclimatiques sur différents sites du territoire, l'objectif était également de déterminer si certaines zones géographiques présenteront des conditions climatiques trop défavorables pour cette culture, et à l'inverse, savoir si certains territoires aux conditions climatiques aujourd'hui trop défavorables à la culture pourrait devenir producteur de blé tendre dans le futur.

IV.1. Bilan de l'évolution des risques climatiques pour la culture de blé tendre en France

Les résultats présentés précédemment ont montré que les conditions climatiques durant le cycle cultural du blé tendre seraient largement modifiées d'ici la fin du siècle. Ainsi, la culture de blé tendre sera de plus en plus exposée à des événements climatiques nuisant à son bon développement et affectant ainsi son rendement.

La modification des conditions climatiques apparaît dès le début du cycle cultural, avec une diminution marquée de la quantité de précipitations entre le semis et la levée. Celle-ci peut se révéler problématique car la graine, restée dans un lit de semence sec trop longtemps, risque par être détruite par de multiples ravageurs du sol, occasionnant ainsi des pertes importantes à la levée.

Ensuite, lors de la phase de tallage, les résultats ont montré que le nombre de jours d'enneigement des sols augmentera sensiblement dans le futur proche tout d'abord, mais de manière plus marquée dans le futur lointain. Les résultats sont d'autant plus flagrants sur des sols à réserve utile élevée. En effet, un sol à plus grande réserve utile aura la capacité d'emmagasiner une plus grande quantité d'eau avant d'arriver à saturation. Sur ce type de sol, l'enneigement est donc à craindre, exposant la culture au risque d'anoxie de manière prolongée. Le seuil établi à 35 jours d'enneigement par Marti (2015) sera largement dépassé dans une grande partie du pays, en particulier dans les zones à climat océanique, caractérisé par une pluviométrie marquée durant cette phase de culture. La façade atlantique sera donc plus exposée (sites de Bordeaux, Lusignan ou encore Rennes).

La phase de tallage est marquée par un stade très sensible aux conditions thermiques, le stade épi 1 cm. En effet, selon Gate (1995), une température moyenne supérieure à 12°C sur les 20 jours entourant ce stade peut entraîner une régression des talles allant jusqu'à 20%, affectant ainsi une autre composante du rendement final. Au vu des résultats obtenus pour ce risque climatique, il en ressort qu'il ne présente pas de menace immédiate. En effet, bien que le nombre de jours chauds autour du stade épi 1 cm augmente de manière significative dans le futur (Figure 24), celui-ci reste inférieur au seuil critique de 20 jours fixé par Gate (1995). Cependant, l'effet variétal peut permettre d'atténuer ce risque en utilisant des variétés précoces. En effet, pour ce type de variété, le stade épi 1 cm est atteint plus tôt dans la saison et le risque de journées chaudes est donc moindre. C'est l'objet des résultats présentés sur la Figure 31.

Le blé, pour passer de la phase végétative à la phase reproductive, a besoin de remplir ses besoins en froid, appelés besoins en vernalisation. Un jour vernalisant est considéré comme net si la température moyenne de la journée est comprise entre 3 et 12°C (Porter et Gawith, 1999). Les résultats à la suite du calcul du nombre de jours de vernalisation nette permettent de dégager 2 tendances majeures au sein des différents sites. Une augmentation du nombre

de jours vernalisants dans les sites d'origine froide, qui, à l'heure actuelle, présente des températures minimales trop fraîches pour rendre la vernalisation efficace. C'est par exemple le cas du Centre de la France (représenté par Clermont-Theix) ou du quart Nord-Est (représenté par Mirecourt). Ces zones présenteront donc dans le futur des conditions plus favorables à la vernalisation de la culture. A l'inverse, les zones plutôt douces (telles que le Sud-Est représenté par Avignon) verront leur nombre de jours de vernalisation nette diminuer sensiblement dans le futur lointain. Cela est dû à la hausse des températures qui font que la température moyenne journalière ne se retrouve pas dans les bornes fixées par Porter et Gawith, 1999. Cependant, bien qu'il s'agisse d'un indicateur qui évolue de manière très significative, il ne présente pas de danger imminent. En effet, après une petite analyse complémentaire, il en ressort que les besoins vernalisants semblent être remplis dans le futur lointain pour l'ensemble des 12 sites étudiés puisque le rapport entre le nombre de jours vernalisants et le nombre de jours vernalisants nécessaires à chaque idéotype est toujours supérieur à 1.

Tableau 10 : Rapport du nombre de jours vernalisants sur le nombre de jours vernalisants nécessaires pour chaque idéotype (PP : précoce-précoce ; PT : précoce-tardive ; TP : tardive-précoce et TT : tardive-tardive) à horizon 2100.

	PP	PT	TP	TT
Avi	2.3	1.6	1.6	1.3
Bor	2.2	1.5	1.5	1.2
Cle	2.6	1.8	1.8	1.5
Col	2.5	1.7	1.7	1.4
Dij	2.6	1.8	1.8	1.5
Lus	2.5	1.7	1.7	1.4
Mir	2.6	1.8	1.8	1.5
Mon	2.7	1.9	1.9	1.5
Ren	2.6	1.8	1.8	1.4
Ste	2.6	1.8	1.8	1.5
Tou	2.2	1.5	1.5	1.3
Ver	2.7	1.9	1.9	1.5

D'autres risques climatiques se manifestent en période terminale du cycle cultural. Les fortes chaleurs menacent directement le bon déroulement de la phase de remplissage par un risque d'échaudage plus important. Le seuil d'échaudage fixé à 25°C par Arvalis, Institut du végétal (2015) est de plus en plus probable durant cette phase dans le quart Sud-Est du pays (représenté par Avignon). Cela se traduit par une concentration en sucre dans les grains qui est diminué de 50mg/g à 20mg/g si le seuil des 25°C est dépassé pendant les 3 semaines suivant la floraison (Shah et Paulsen, 2003).

L'évolution la plus notable est le raccourcissement de la durée de la phase de remplissage. Comme cela est illustré sur la Figure 24, cette phase semble être de plus en plus courte dans le futur proche et dans le futur lointain. Plus cette dernière est courte et moins efficace est le remplissage car le taux de remplissage (exprimé en mg/jour) reste fixe. Elle est ainsi raccourcie de 3 à 5 jours en moyenne (Figure 24 et Tableau 8).

Enfin, le déficit hydrique représente une menace majeure pour les zones de production de la moitié Sud. Celui-ci se manifeste tôt en saison pour persister jusqu'à la phase de remplissage. Il est notamment plus marqué sur des sols à faible réserve utile comme en témoigne le Tableau 9.

I.2. Une répartition géographique des bassins de production modifiée

En analysant l'exposition des différents sites en fonction des risques climatiques, le quart Sud-Est, représenté par Avignon, semble présenter des conditions climatiques de plus en plus défavorables à la culture de blé tendre, que ce soit en termes de températures mais aussi de précipitations. Le quart Sud-Ouest est quant à lui aussi exposé à des déficits hydriques importants. Dans ces zones, la culture pourrait donc devenir très problématique d'ici la fin du siècle. A l'inverse, des zones ne cultivant pas de blé tendre à l'heure actuelle pourraient présenter des conditions climatiques favorables à son expansion. C'est par exemple le cas des zones de moyenne altitude (proche du Massif-Central et contreforts des chaînes de montagne alpestres et pyrénéennes) qui connaîtront une augmentation des températures leur permettant d'avoir des conditions de vernalisation en adéquation avec les besoins du blé tendre (Figure 29) sans présenter des températures de fin de cycle excessives, l'altitude permettant de limiter la hausse de ces dernières. Le quart Nord-Est apparaît comme la zone où les conditions climatiques évolueront le moins défavorablement à la culture.

Cette présente étude n'est pas la seule à avoir été menée. D'autres travaux ont été effectués sur le maïs notamment en 2015, au sein de l'unité Agroclim. Cependant, lors de ces travaux, l'aboutissement du calcul de l'indicateur global de faisabilité (GICS) avait permis d'avoir une représentation détaillée de la faisabilité culturale au sein du territoire. Ainsi, il est ressorti que certaines zones actuelles de production où 100% du cycle cultural peut être réalisé sans risque climatique, pourraient présenter des risques climatiques avérés faisant diminuer sensiblement ce pourcentage. C'est par exemple le cas du Sud-Ouest.

II. Les limites de la présente étude et les propositions d'évolution

II.1. Les principales limites du travail

II.1.1. Du prévisionnel au réel

Les résultats présentés dans ce mémoire sont issus d'un travail qui a nécessité beaucoup de changements, ce qui a eu pour conséquence l'éloignement entre le travail prévu et le travail qui a pu être réalisé. Les divergences reposent sur plusieurs points.

Le changement majeur repose dans l'élaboration d'un indicateur global de faisabilité (GICS) de la culture, résultant de la normalisation et l'agrégation des indicateurs élémentaires. Au départ programmé pour ce stage, cet indicateur global n'a pas pu être élaboré pour diverses raisons. Tout d'abord, il nécessite la normalisation et l'agrégation des indicateurs élémentaires, tâche extrêmement chronophage car elle demande beaucoup d'échanges avec les écophysiolgistes pour déterminer les différentes fonctions d'agrégation à utiliser. De plus, l'indicateur global apporte une information beaucoup plus diffuse que les indicateurs élémentaires car en est tiré seulement le % du cycle cultural qui peut être réalisé sans entrave climatique. Or, pour sélectionner le blé de demain, les sélectionneurs doivent connaître les traits phénotypiques qui doivent être modifiés comme par exemple la tolérance à la sécheresse, à l'échaudage ... et ces informations sont essentiellement délivrées par les indicateurs élémentaires que l'on a choisi de calculer et qui reposent chacun sur un risque climatique à part entière. C'est pour cela que ce choix a été fait afin de bien analyser en

profondeur les indicateurs élémentaires plutôt que de s'engager sur l'élaboration de l'indicateur global au risque de n'analyser que partiellement les indicateurs élémentaires et ainsi passer à côté d'informations importantes.

Ensuite, le calcul des indicateurs devant à l'origine être réalisé sur l'ensemble du territoire métropolitain, a été réduit à 12 sites susceptibles de représenter les tendances au niveau national. Cette décision a été prise par souci de volume de données et de temps de traitements extrêmement importants.

De plus, les résultats analysés ne portent que sur le RCP8.5. Bien que les calculs aient été effectués pour les RCPs 4.5 et 8.5, les résultats ne reposent que sur le scénario le plus pessimiste afin d'éviter de doubler la quantité d'informations. Cependant une analyse intermédiaire (non montrée) a permis de vérifier que les tendances étaient les mêmes pour les 2 scénarios et ne s'opposaient pas, le scénario RCP 8.5 permettant de mettre en évidence le risque maximal.

En plus des changements précédents, la spatialisation des indicateurs a été aussi modifiée. L'ensemble des indicateurs devait être spatialisé pour étendre les résultats obtenus sur les 12 sites à l'ensemble du territoire métropolitain. Plusieurs contraintes techniques se sont manifestées empêchant cette représentation. S'effectuant sous le logiciel SICLIMA, la principale contrainte repose sur le fondement même du logiciel. En effet, ne pouvant pas y importer des données externes, en l'occurrence les valeurs brutes des indicateurs obtenues après calcul, tous les indicateurs n'ont pas pu être spatialisés. De plus, les seuils des indicateurs ne pouvant pas être modifiés sous SICLIMA, les indicateurs qui ont été spatialisés l'ont été avec les seuils déjà établis. C'est pourquoi la spatialisation, bien qu'elle permette d'analyser la sensibilité variétale, n'est pas tout à fait réalisée avec les valeurs propres du blé tendre pour des raisons techniques. En effet, les seuils des indicateurs programmés sous SICLIMA ne sont pas modifiables facilement par l'utilisateur, cela nécessite un travail en profondeur de programmation qui demande beaucoup de temps. L'option choisie a donc été de spatialiser les indicateurs même si les seuils sont 1 à 2°C différents, ce qui laisse quand même un niveau de précision et de représentabilité acceptables.

II.1.2. Les limites des outils utilisés

Les 2 principaux outils utilisés, à savoir GETARI pour le calcul des indicateurs et SICLIMA pour l'extraction des données et la spatialisation, rencontrent tous deux des limites techniques qui ont freiné le travail. Tout d'abord, concernant GETARI, la principale limite réside dans le format des fichiers de résultats qui nécessite de la programmation sous R pour pouvoir les transformer en fichiers prêts à être traités. Ensuite, concernant SICLIMA, la principale limite réside dans le manque de souplesse pour l'utilisateur sur un certain nombre de points. En effet, les valeurs seuils des indicateurs présents dans la bibliothèque de SICLIMA ne sont pas modifiables par l'utilisateur de manière interactive. Cela doit passer par l'équipe technique gérant le logiciel. Cette limite freine donc l'avancée du travail puisque les échanges nécessitent plusieurs jours. L'outil étant récent, il est en cours de développement et de nombreux points de blocage ont ainsi pu être résolus via ce stage.

II.2. Les perspectives d'évolution

II.2.1. L'intégration de variables supplémentaires

La présente étude, pour la construction des indicateurs écoclimatiques, s'est basée sur des variables météorologiques ainsi que 2 variables sol-dépendantes (la capacité au champ et le point de flétrissement). Or, l'analyse pourrait être plus complète via l'intégration d'autres paramètres influençant grandement l'écophysiologie de la culture. Tout d'abord, les résultats concernant le quotient photothermique pourraient être complétés via l'analyse de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. En effet, la production de biomasse perdue via la chute du quotient photothermique pourrait être compensée par l'augmentation de la concentration en CO₂. Cependant, pour vérifier cette possible corrélation, d'autres analyses doivent être menées mettant en œuvre des modèles de culture (travail prévu dans le cadre du projet REGARD).

Ensuite, en ce qui concerne les indicateurs relatifs au confort hydrique, une analyse plus fine permettrait une meilleure modélisation. En effet, se baser sur 2 sols uniquement est très partiel car il existe une infinité de sols différents. Les valeurs de réserve utile, capacité au champ et point de flétrissement varient donc d'un sol à l'autre. Ainsi, les indicateurs construits avec ces variables sont susceptibles de varier aussi. Pour améliorer leur utilisation et la rendre ainsi plus précise et juste, le travail pourrait être approfondi en utilisant des caractéristiques de sols propres à chaque vallée de production. Par exemple, une analyse de sol pourrait être effectuée sur une exploitation produisant du blé tendre, représentant une vallée entière. Ainsi, les indicateurs seraient adaptés localement puisque leur calcul serait basé sur les résultats de l'analyse de sol propre à chaque vallée.

II.2.2. Le calcul de l'indicateur global de faisabilité (le GICS)

Le GICS n'ayant pas pu être calculé durant ce stage, son élaboration apporterait un niveau d'analyse supplémentaire au niveau global. En effet, étant la résultante de la normalisation et de l'agrégation des indicateurs élémentaires, il traduit la faisabilité globale de la culture (en % du cycle cultural) en un lieu donné. Cette tâche doit s'effectuer grâce au logiciel GETARI et à partir des indicateurs élémentaires déjà programmés en y intégrant les fonctions de normalisation et d'agrégation. Pour cela, à partir des indicateurs écoclimatiques élémentaires déjà construits, il faut rajouter les étapes de normalisation et d'agrégation pour aboutir au GICS (Figure 13). La principale tâche consiste à programmer, pour chaque indicateur élémentaire, une fonction de réponse traduisant le comportement de la culture face à l'évolution des valeurs de l'indicateur. Concrètement, grâce à une analyse bibliographique poussée, il est possible de connaître les réponses de la culture vis-à-vis d'un stress climatique donné. Ce sont ces informations qui permettront ainsi de construire la fonction réponse, appelée fonction de normalisation. Une fois les fonctions de normalisation programmées pour chacun des indicateurs élémentaires, il faut les agréger entre eux. Pour cela, l'analyse bibliographique doit porter sur les effets cumulatifs de différents stress climatiques. L'agrégation peut donc se traduire par une multiplication d'indicateurs (si par exemple l'effet de fortes températures est associé à une augmentation de l'ETP, alors les indicateurs de températures et d'ETP seront multipliés). La résultante de l'agrégation aboutira à un arbre d'indicateur avec une valeur de GICS pour chaque site étudié.

II.2.3. La construction d'analogues climatiques

Dans une logique de sélection variétale, il est nécessaire d'implanter dès aujourd'hui des sites de sélection dans des zones possédant aujourd'hui les conditions climatiques que pourraient connaître les bassins de production français dans le futur, en termes de températures, de précipitations, d'ensoleillement. La sélection variétale nécessitant plusieurs années pour l'obtention de variétés aux caractères génétiques modifiés, ce travail doit débuter dès à présent pour prendre un temps d'avance sur la modification climatique.

Pour parvenir à implanter les stations de sélection variétale à l'endroit idéal, la poursuite de la présente étude doit déboucher sur la construction d'analogues climatiques. Un analogue climatique est défini comme un lieu qui possède actuellement le climat que pourrait posséder un autre lieu dans le futur. Par exemple, si Toulouse possède aujourd'hui le climat que pourrait posséder Paris dans le futur, alors Toulouse et Paris sont 2 analogues climatiques. Dans ce cas, pour un blé tendre cultivé en région parisienne, la station de sélection variétale a tout intérêt à être implantée à Toulouse. Ainsi, en inventoriant les climats futurs (via les projections climatiques) des différents bassins de production de blé tendre rencontrés sur le territoire métropolitain, il est possible de trouver des zones au climat similaire à l'heure actuelle, pour implanter des stations de sélection variétale adaptées le plus localement possible. Ce travail, très chronophage, sera effectué par le LSCE de Paris. Ce laboratoire possède tous les logiciels permettant d'extraire les projections climatiques à l'échelle locale et surtout les outils nécessaires pour la comparaison de climats et ainsi établir les analogues climatiques, qui seront ensuite transmis aux sélectionneurs.

Conclusion générale

Les travaux réalisés ont permis de mettre en avant l'évolution des risques climatiques pour la culture de blé tendre dans le futur. Les résultats ont montré que le changement climatique devrait fortement impacter cette culture d'ici la fin du siècle. En effet, la variabilité climatique étant grandissante dans le futur, les extrêmes seront de plus en plus récurrents. Plus spécifiquement, les extrêmes chauds et secs risquent de se multiplier à des stades sensibles de la culture, impactant directement la suite du cycle cultural et par conséquent le rendement final. Cependant, l'analyse spatialisée a démontré que l'évolution des risques climatiques est hétérogène au niveau national et donc que la culture de blé tendre ne sera pas impactée de manière identique en tout point du pays. Ainsi, le quart Sud-Est semble le plus touché avec des conditions climatiques devenant très problématiques pour le développement de cette culture (excès de chaleur plus fréquents et violents et déficit hydrique de plus en plus important). A l'inverse, les zones de moyenne altitude où la culture y est impossible à l'heure actuelle car ces régions de moyenne montagne sont trop froides voient le changement climatique comme une opportunité pour l'implantation de cette céréale. De manière générale, les conditions climatiques ne deviennent pas limitantes dans le futur proche (période 2021-2050) mais plutôt dans le futur lointain (période 2071-2100). Afin d'adapter les variétés au climat de demain, il est nécessaire de commencer la sélection dès aujourd'hui. Pour cela, la construction d'analogues climatiques s'avère cruciale pour savoir où planter les stations de sélection variétale. C'est ainsi que cette tâche est la suite directe de la présente étude. D'autres paramètres peuvent être également pris en compte pour une analyse plus fine au niveau du territoire. C'est le cas des paramètres de sol, adaptés localement, ce qui permettrait d'être beaucoup plus précis sur l'évolution du stress hydrique, très limitant.

La culture de blé tendre dans l'agriculture de demain risque d'être très bouleversée que ce soit au niveau de son rendement et de sa répartition sur le territoire. Pour s'adapter au mieux à la menace climatique, la sélection variétale apparaît donc comme le principal levier. C'est pourquoi cette présente étude laisse de nombreux points d'approfondissement. A terme, l'objectif étant de modifier les traits phénotypiques d'une variété pour la rendre adaptée à son milieu de culture.

Bibliographie

- Arvalis. 2018. « Résistance au froid des céréales : un processus long et progressif ». Disponible sur : < <https://www.arvalis-infos.fr/l-endurcissement-determine-la-tolerance-au-gel-des-cereales-@/view-17790-arvarticle.html> > (Consulté le 8 février 2021).
- Arvalis, Institut du végétal. 2015. *Irriguer les céréales à paille pour régulariser les rendements*.
- Arvalis. 2016. *Récolte des blés 2016 : une année complètement atypique* [En ligne]. Disponible sur : < https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/file/galleryelement/pj/e6/14/4a/69/doss_press_e_recolte_bles7728213614823161969.pdf > (Consulté le 26 février 2021).
- Barlow, Christy, O'Leary, Riffkin, et Nuttall. 2015. « Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production ». p. 109-119.
- Barnabas, Beata, Katalin Jaeger, et Attila Feher. 2008. « The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals ». *Plant Cell Environ.* Vol. 31, n°1, p. 11-38.
- Brisson Nadine, Philippe Gate, David Gouche, Gilles Charmet, François-Xavier Oury, et Frédéric Huard. 2010. « Why are wheat yields stagnation in Europe ? A comprehensive data analysis for France. » p. 201-212.
- Brisson Nadine, et Frédéric Levrault. 2010. *Livre vert du projet CLIMATOR* [En ligne]. Disponible sur : < http://www.cerfacs.fr/~page/publications/livre_vert_climator/livre_vert_climator.pdf > (Consulté le 25 février 2021).
- Calzadilla, Alvaro, Katrin Rehdanz, Richard Betts, Pete Falloon, Andy Wiltshire, et Richard S. J. Tol. 2013. « Climate change impacts on global agriculture ». *Clim. Change.* Vol. 120, n°1-2, p. 357-374.
- Canadell, Josep G., Corinne Le Quéré, Michael R. Raupach, Christopher B. Field, Erik T. Buitenhuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, Nathan P. Gillett, R. A. Houghton, et Gregg Marland. 2007. « Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks ». *Proc Natl Acad Sci U S A.* Vol. 104, n°47, p. 18866-18870.
- Caubel Julie, Inaki Garcia de Cortazar-Atauri, Marie Launay, Nathalie de Noblet-Ducoudre, Frederic Huard, Patrick Bertuzzi, et Anne-Isabelle Graux. 2015. « Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria ». *Agric. For. Meteorol.* Vol. 207, p. 94-106.
- Chakraborty, S., et A. C. Newton. 2011. « Climate change, plant diseases and food security: an overview ». *Plant Pathol.* Vol. 60, n°1, p. 2-14.
- Colart, Anne-Sophie, Thierry Denis, et Elodie Gagliardi. 2016. *Rendements catastrophiques du blé en 2016 : la pluie, seule responsable ?* [En ligne]. Disponible sur : < <https://www.semencesdefrance.com/actualite-semences-de-france/rendements-catastrophiques-ble-2016-pluie-seule-responsable/> > (Consulté le 26 février 2021).

- De los Campos, Gustavo, Paulino Perez-Rodriguez, Matthieu Bogard, David Gouache, et Jose Crossa. 2020. « A data-driven simulation platform to predict cultivars' performances under uncertain weather conditions ». *Nat. Commun.* Vol. 11, n°1, p. 4876.
- Djanaguiraman, M., S. Narayanan, E. Erdayani, et P. V. V. Prasad. 2020. « Effects of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat ». *BMC Plant Biol.* Vol. 20, n°1, p. 268.
- Ferris, R., R. H. Ellis, T. R. Wheeler, et P. Hadley. 1998. « Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat ». *Ann. Bot.* Vol. 82, n°5, p. 631-639.
- Fischer, Ra. 1985. « NUMBER OF KERNELS IN WHEAT CROPS AND THE INFLUENCE OF SOLAR-RADIATION AND TEMPERATURE ». *J. Agric. Sci.* Vol. 105, n°OCT, p. 447-461.
- FSOV. 2020. *FSOV Appel à propositions 2020*.
- Garcia de Cortazar-Atauri, Inaki, et Olivier Maury. 2019. *GETARI : Generic Evaluation Tool of AgRoClimatic Indicators* [En ligne]. Disponible sur : < 10.15454/IZUFAP, >
- Gate, Philippe. 1995. *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*. Lavoisier.429 p.
- Ghobadi, Mohammad Eghbal, Mokhtar Ghobadi, et Alireza Zebarjadi. 2017. « Effect of waterlogging at different growth stages on some morphological traits of wheat varieties ». *Int. J. Biometeorol.* Vol. 61, n°4, p. 635-645.
- Hunt, La, et S. Pararajasingham. 1995. « Cropsim-Wheat - a Model Describing the Growth and Development of Wheat ». *Can. J. Plant Sci.* Vol. 75, n°3, p. 619-632.
- IPCC. 2013. *IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change*. GIEC.
- IPCC. 2018. *Réchauffement planétaire de 1,5°C* [En ligne]. GIEC, Disponible sur : < https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf > (Consulté le 26 février 2021).
- Jouzel, Jean, OUZEAU, DEQUE, JOUINI, PLANTON, et VAUTARD. 2014. *Le climat de la France au XXIe siècle Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer* [En ligne]. Direction Générale de l'Energie et du Climat,
- Le Gouis, Jacques, Francois-Xavier Oury, et Gilles Charmet. 2020. « How changes in climate and agricultural practices influenced wheat production in Western Europe ». *J. Cereal Sci.* Vol. 93, p. 102960.
- Lobell, David B., et Christopher B. Field. 2007. « Global scale climate - crop yield relationships and the impacts of recent warming ». *Environ. Res. Lett.* Vol. 2, n°1, p. 014002.
- Marti, Savin, et Slafer. 2015. « Wheat Yield as Affected by Length of Exposure to Waterlogging During Stem Elongation ». *J. Agron. Crop Sci.* Vol. 201, n°6, p.473-486.
- Météo France. 2020a. *Le réchauffement climatique observé à l'échelle du globe et en France* [En ligne]. Disponible sur : < <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france> > (Consulté le 12 janvier 2021).
- Météo France. 2019a. *Vagues de chaleur en France métropolitaine : observations et*

- simulations climatiques pour deux horizons temporels d'après le scénario d'évolution RCP 8.5. Remarque : seuls les épisodes de chaleur de durée supérieure ou égale à 4 jours sont représentés* [En ligne]. Disponible sur : < <http://www.grec-sud.fr/article-cahier/article-du-cahier-sante/les-impacts-directs-du-changement-climatique-sur-la-sante/> > (Consulté le 25 février 2021).
- Ministère de la transition écologique. 2018. « Évolution de la concentration en carbone de l'atmosphère (niveau mondial) , Observation et statistiques ». Dans : *Ministère de la transition écologique* [En ligne]. Disponible sur : < <http://www.donnees.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lesessentiels/indicateurs/e14.html> > (Consulté le 9 février 2021).
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2015. *Tout savoir sur le processus de sélection du blé !* [En ligne]. Disponible sur : < <https://agriculture.gouv.fr/tout-savoir-sur-le-processus-de-selection-du-ble> > (Consulté le 1 avril 2021).
- NASA. 2019. *Concentrations de CO2 et températures de l'Antarctique des 800 000 dernières années* [En ligne]. Disponible sur : < <https://global-climat.com/2019/11/05/des-archives-glaciaires-devoient-les-niveaux-de-co2-sur-les-deux-derniers-millions-dannees/> > (Consulté le 25 février 2021).
- Pelce, Luc, et Diane Chavassieux. 2020. *Céréales d'hiver en stress hydrique : quelles capacités de compensation ?* [En ligne]. Disponible sur : < <https://www.arvalis-infos.fr/cereales-d-hiver-en-stress-hydrique-queelles-sont-leurs-capacites-de-compensation--@/view-32581-arvarticle.html> > (Consulté le 26 février 2021).
- Pons-Thévenot, Viviane. 2014. *Rendements en grandes cultures : une stagnation fortement influencée par le climat* [En ligne]. Disponible sur : < https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Revue_Chambres-agriculture_1031_2014_Rendements_Grandes_Cultures.pdf > (Consulté le 25 février 2021).
- Porter, J. R., et M. Gawith. 1999. « Temperatures and the growth and development of wheat: a review ». *Eur. J. Agron.* Vol. 10, n°1, p. 23-36.
- Ray, Deepak K., James S. Gerber, Graham K. MacDonald, et Paul C. West. 2015. « Climate variation explains a third of global crop yield variability ». *Nat. Commun.* Vol. 6, p. 5989.
- Ray, Deepak K., Nathaniel D. Mueller, Paul C. West, et Jonathan A. Foley. 2013. « Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050 ». *PLoS One.* Vol. 8, n°6, p. e66428.
- Schittenhelm, Siegfried, Tina Langkamp-Wedde, Martin Kraft, Lorenz Kottmann, et Katja Matschiner. 2020. « Effect of two-week heat stress during grain filling on stem reserves, senescence, and grain yield of European winter wheat cultivars ». *J. Agron. Crop Sci.* Vol. 206, n°6, p. 722-733.
- Shah, N. H., et G. M. Paulsen. 2003. « Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat ». *Plant Soil.* Vol. 257, n°1, p. 219-226.
- University of Minnesota's Institute on the Environment. 2012. « La Révolution verte s'essouffle ». Dans : *Canaux* [En ligne]. Disponible sur : < <https://www.mcgill.ca/channels/fr/news/la-r%C3%A9volution-verte-s%E2%80%99essouffle-219620> > (Consulté le 24 février 2021).

- Van der Velde, Marijn, Francesco N. Tubiello, Anton Vrieling, et Faycal Bouraoui. 2012. « Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: evaluating regional crop simulations against observed data ». *Clim. Change*. Vol. 113, n°3-4, p. 751-765.
- Waters, Colin N., Jan Zalasiewicz, Colin Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Clément Poirier, Agnieszka Gałuszka, Alejandro Cearreta, Matt Edgeworth, Erle C. Ellis, Michael Ellis, Catherine Jeandel, Reinhold Leinfelder, J. R. McNeill, Daniel deB Richter, Will Steffen, James Syvitski, Davor Vidas, Michael Wagreich, Mark Williams, An Zhisheng, Jacques Grinevald, Eric Odada, Naomi Oreskes, et Alexander P. Wolfe. 2016. « The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene ». *Science* [En ligne]. Vol. 351, n°6269,. Disponible sur : < <https://science.sciencemag.org/content/351/6269/aad2622> > (Consulté le 9 février 2021).
- Wollmer, Anna-Catharina, Britta Pitann, et Karl Hermann Muehling. 2018. « Grain storage protein concentration and composition of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by waterlogging events during stem elongation or ear emergence ». *J. Cereal Sci.* Vol. 83, p. 9-15.

Table des figures

Figure 1. Evolution de la concentration en CO ₂ et des températures en Antarctique les 800 000 dernières années (NASA, 2019).....	8
Figure 4 : Evolution des températures à la surface du globe entre 1860 et 2020 selon la source de perturbation du climat. La courbe noire représente les observations de température, la courbe bleue les modifications de température causées par les seuls facteurs naturels et la courbe orange les modifications de température causées par les activités humaines en plus des facteurs naturels (IPCC 2018).....	9
Figure 3 : Evolution de la concentration (en ppm et ppb) de 3 principaux GES (CO ₂ à gauche, CH ₄ au centre et NO ₂ à droite depuis 10 000 ans (IPCC, 2013).....	10
Figure 4 : Projections de l'évolution des températures au niveau mondial pour le RCP2.6 (à gauche) et 8.5 (à droite) à horizon 2100 (IPCC, 2013).....	11
Figure 5 : Projections de l'évolution des précipitations moyennes à horizon 2100 pour le RCP2.6 (à gauche) et 8.5 (à droite) (IPCC, 2013).....	12
Figure 6 : Projections de l'évolution des vagues de chaleur en France à horizon 2100. Les bulles grises représentent les vagues de chaleur passées, les bulles jaunes celles simulées par le RCP8.5 pour la période 2021-2050 et les bulles rouges pour la période 2071-2100 (Météo France, 2019a).....	13
Figure 7 : Evolution des rendements de 1961 à 2008 pour le riz (gauche) et le blé (droite) (University of Minnesota's Institute on the Environment, 2012).....	14
Figure 8 : Evolution des rendements (t/ha) de blé tendre en France depuis 1960 (Pons-Thévenot, 2014).....	15
Figure 9 : La notion d'élaboration du rendement en blé (Arvalis, Institut du végétal 2018)....	16
Figure 10 : Anticipation de la date de floraison du blé (en jours) en fonction de l'évolution de la température moyenne pour différents horizons temporels et différentes méthodes de régionalisation du climat (Brisson et Levrault, 2010).....	17
Figure 11 : Illustration schématique des 2 grandes familles d'indicateurs : agroclimatique à gauche et écoclimatique à droite (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019).....	20
Figure 12 : Illustration de la construction des indicateurs écoclimatiques (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019).....	21
Figure 13 : Illustration de la construction de l'indicateur écoclimatique global (Garcia de Cortazar-Atauri et Maury, 2019).....	21
Figure 14 : Présentation des différentes phases du projet REGARD : durée et objectifs (FSOV, 2020).....	23
Figure 15 : Schéma méthodologique.....	27
Figure 16 : Cartographie des 12 sites retenus pour l'étude avec les valeurs de températures moyennes (Tm) et de pluviométrie annuelle (RR). Source : Brisson et Levrault (2010).....	28
Figure 17 : Processus de programmation des indicateurs écoclimatiques sous GETARI.....	32
Figure 18 : Résultats de l'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique pour une variété de type tardive-tardive.....	35
Figure 19 : Résultats de l'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique pour une variété de type précoce-précoce.....	36
Figure 20 : Simulation des excès en eau observés pendant la phase de remplissage en 2016 (à gauche) et observations de la somme de précipitations issues du bilan de campagne d'Arvalis sur la même période (à droite) (Arvalis Institut du végétal, 2016).....	38
Figure 21 : Simulation du nombre de jours de faible rayonnement pendant la phase de remplissage sur l'année 2016 (à gauche) et pertes de rendements observées sur la même année (à droite) (Arvalis, institut du végétal, 2016).....	38
Figure 22 : Représentation de la durée des différentes phases phénologiques pour 4 sites et pour les 2 idéotypes extrêmes.....	39
Figure 25 : Représentation de graphiques violons (ici pour le nombre de jours vernalisants) avec les valeurs de p-value concernant l'évolution des moyennes trentenaires.....	41

Figure 24 : Histogrammes de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les indicateurs évoluant fortement, c'est à dire avec une p-value très significative (<0.01) ou significative (0.01 < p-value <0.05).....	42
Figure 25 : Histogrammes de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les indicateurs sol-dépendant.....	44
Figure 26 : Graphiques vecteurs de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les couples d'indicateurs d'intérêt.....	48
Figure 27 : Graphiques vecteur de l'évolution des moyennes trentenaires (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain) pour les couples d'indicateurs sol-dépendant.....	49
Figure 28 : Spatialisation de la quantité de précipitations entre le semis et la levée (en mm). Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.....	50
Figure 29 : Spatialisation du nombre de jours vernalisants entre la levée et le stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.....	51
Figure 30 : Spatialisation du quotient photothermique (en MJ.°C) entre la levée et le stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la carte de gauche, le futur proche par la carte du milieu et le futur lointain par la carte de droite.....	51
Figure 31 : Spatialisation de la moyenne des températures moyennes (en °C) sur la phase de 20 jours autour du stade épi 1 cm. Le passé récent est simulé par la colonne de gauche, le futur proche par la colonne du milieu et le futur lointain par la colonne de droite. La ligne du haut représente l'idéotype précoce-précoce et la ligne du bas l'idéotype tardif-tardif.....	52

Table des tableaux

Tableau 3 : Les 4 RCPs et leurs caractéristiques : la valeur de forçage radiatif à horizon 2100 ; la concentration en CO ₂ (en ppm) équivalente et le profil d'évolution (Jouzel et al., 2014).....	11
Tableau 4 : Projections climatiques pour le RCP8.5 en France pour le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100) pour plusieurs paramètres : les températures, les précipitations et les événements extrêmes (Jouzel et al., 2014).....	12
Tableau 3 : Liste des indicateurs choisis pour l'étude.....	25
Tableau 4 : Caractéristiques des 2 sols choisis pour l'étude.....	29
Tableau 5 : Synthèse des médianes des dates de stades phénologiques en jours juliens (numéro du jour de l'année) observés (Epiphyt) et simulés (Siclina) pour 3 années et pour 3 stades pour une variété de type tardive-tardive.....	36
Tableau 6 : Synthèse des médianes des dates de stades phénologiques en jours juliens (numéro du jour de l'année) observés (Epiphyt) et simulés (Siclina) pour 3 années et pour 3 stades pour une variété de type précoce-précoce.....	37
Tableau 7 : Simulation (Siclina) et observation (Epiphyt) de la date du stade épi 1cm pour l'idéotype PP (à gauche) et TT (à droite).....	37
Tableau 8 : Moyennes des différents indicateurs écoclimatiques sur les 12 sites et pour les 3 périodes (RP = passé récent ; NF = futur proche et FF = futur lointain). Les nombres en gras représentent les évolutions associées à une p-value très significative (<0.01) et les nombres soulignés représentent les évolutions associées à une p-value significative (0.01 < p-value <0.05).....	46
Tableau 9 : Synthèse de l'évolution des indicateurs (à forte et faible évolution) par site et par période. NF étant le futur proche et FF le futur lointain.....	47
Tableau 10 : Rapport du nombre de jours vernalisants sur le nombre de jours vernalisants nécessaires pour chaque idéotype à horizon 2100.....	55

Table des matières

Résumé.....	2
Abstract.....	2
Remerciements.....	3
Table des sigles et abréviations.....	4
Sommaire.....	6
Introduction.....	7
Partie 1 : Le changement climatique et ses impacts en agriculture.....	8
I.1 Le changement climatique : causes anthropiques et projections climatiques futures.....	8
I.1.1. Les activités humaines et l'effet de serre : un fort impact sur le changement climatique.....	8
I.1.1.1 Du paléoclimat au climat récent.....	8
I.1.1.2. L'effet de serre, moteur du climat sur Terre.....	9
I.1.2. Les projections climatiques au niveau mondial et métropolitain.....	10
I.1.2.1. La construction des scénarios climatiques.....	10
I.1.2.2. Les projections climatiques au niveau mondial.....	11
I.1.2.3 Les projections climatiques au niveau national.....	12
I.2. Le changement climatique et ses impacts en agriculture.....	14
I.2.1.L'évolution des rendements, facteur d'incertitude sur la sécurité alimentaire et traceur de l'évolution du climat.....	14
I.2.2. Les impacts du changement climatique sur la culture de blé au niveau du rendement.....	15
I.2.3. Le climat et l'écophysiologie du blé : quelles hypothèses sur les conséquences du climat futur ?.....	16
I.3. Les indicateurs écoclimatiques : un outil d'analyse des effets du climat sur une culture.....	20
I.3.1. Définition et description.....	20
I.3.1.1. Qu'est-ce qu'un indicateur écoclimatique ?.....	20
I.3.1.2. La construction d'indicateurs écoclimatiques pour étudier la « faisabilité climatique » d'une culture sur un territoire.....	20
.....	21
I.3.2. Travaux antérieurs sur les indicateurs climatiques : exemple sur blé.....	21
I.3.3. La mise en application dans le projet REGARD (RechErche d'analogues climAtiques pour sélectionneR Demain).....	22
I.3.3.1 Le projet REGARD : les enjeux posés par le changement climatique aux sélectionneurs.....	22
I.3.3.2. Les acteurs du projet.....	23
I.3.3.3. Zoom sur l'unité Agroclim de l'INRAE d'Avignon.....	23
I.4. Problématique.....	24

Partie 2 : Matériels et méthodes.....	25
II.1. Les indicateurs écoclimatiques retenus pour caractériser l'effet du climat sur le blé tendre.....	25
II.2. Le protocole d'expérimentation <i>in silico</i> pour le calcul des indicateurs écoclimatiques ..	26
II.2.1. Les données d'entrées nécessaires au calcul des indicateurs écoclimatiques.....	28
II.2.1.1. Les données climatiques.....	28
II.2.1.2. Les variétés de précocités différentes.....	29
II.2.1.3. Les données de sol.....	29
II.2.1.4. La base de données Epiphyt.....	29
II.2.1.5. Les bilans de campagne d'Arvalis.....	29
II.2.2. Les outils de calcul des indicateurs écoclimatiques élémentaires.....	30
II.2.2.1. Siclima.....	30
II.2.2.2. Getari.....	30
II.2.2.3. RStudio	30
II.2.3. Les tests préliminaires de validation des indicateurs.....	30
II.2.3.1. Le test des indicateurs d'excès d'eau, de déficit hydrique et de rayonnement ..	30
II.2.3.2. L'étude de la qualité prédictive du modèle phénologique.....	31
II.2.4. Le calcul des indicateurs sous GETARI.....	32
II.3. La méthodologie d'analyse des résultats	33
II.3.1. L'analyse statistique.....	33
II.3.1.1. L'analyse des dates d'apparition et des durées de phases.....	33
II.3.1.2. L'analyse de l'évolution des indicateurs écoclimatiques.....	33
II.3.1.3. Le regroupement des sites	34
II.3.2. L'analyse cartographique	34
Partie 3. Résultats	35
III.1 Les résultats des tests préliminaires.....	35
III.1.1. La qualité prédictive du modèle phénologique.....	35
III.2. Les résultats des tests des indicateurs déjà présents dans Siclima.....	37
III.2.1. L'indicateur de la somme des pluies en excès	37
III.2.2. Les indicateurs de rayonnement et plus particulièrement l'indicateur du nombre de jours de faible rayonnement	38
III.2. Analyse de l'évolution de la durée des phases phénologiques.....	39
III.3. Les résultats du calcul des indicateurs écoclimatiques	40
III.3.1. Les risques climatiques les plus à craindre dans le futur.....	40
III.3.1.1. Tous sols et variétés confondus	40
III.3.1.2. L'évolution des indicateurs de sol.....	44

III.3.1.3. Les indicateurs à faible évolution mais présentant un risque majeur pour la culture	46
III.3.2. Les sites présentant une évolution climatique commune.....	46
.....	49
III.3. La spatialisation des indicateurs d'intérêt	50
Partie 4. Discussion, perspectives et limites de l'étude.....	53
IV.1. Bilan de l'évolution des risques climatiques pour la culture de blé tendre en France	53
I.2. Une répartition géographique des bassins de production modifiée	55
II. Les limites de la présente étude et les propositions d'évolution.....	55
II.1. Les principales limites du travail.....	55
II.1.1. Du prévisionnel au réel	55
II.1.2. Les limites des outils utilisés.....	56
II.2. Les perspectives d'évolution	57
II.2.1. L'intégration de variables supplémentaires	57
II.2.2. Le calcul de l'indicateur global de faisabilité (le GICS).....	57
II.2.3. La construction d'analogues climatiques	58
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	60
Table des figures	64
Figure 1. Evolution de la concentration en CO ₂ et des températures en Antarctique les 800 000 dernières années (NASA, 2019).....	8
.....	64
Table des tableaux	66
Table des matières.....	67
Annexe 1. Echelle BBCH des céréales.....	70
Annexe 2. Arbre des indicateurs écoclimatiques.....	74
.....	77
Annexe 3. Correspondance jours calendaires / jours juliens.....	79
Correspondance jours calendaires / jours juliens année 1.....	79
Correspondance jours calendaires / jours juliens année 2.....	80
Annexe 4. Liste des différentes réunions et présentations effectuées durant le stage	81

Annexe 1. Echelle BBCH des céréales

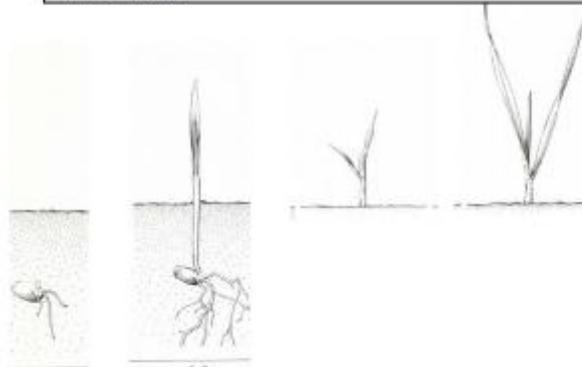
Stades repères

PRINCIPAUX STADES REPERES DE LA VEGETATION EN CEREALES

Echelle BBCH améliorée, les échelles individuelles
Céréales Witzemberger et al., 1989; Lancashire et al., 1991
Echelle BBCH des stades phénologiques des céréales
(froment, blé = *Triticum* sp. L., orge = *Hordeum vulgare* L., avoine = *Avena sativa* L., seigle = *Secale cereale* L.)

Stade principal 0: germination, levée

- 00 semence sèche (caryopse sec)
- 01 début de l'imbibition de la graine
- 03 imbibition complète
- 05 la radicule sort de la graine
- 06 elongation de la radicule, apparition de poils absorbants et développement des racines secondaires
- 07 le coléoptile sort de la graine
- 09 levée: le coléoptile perce la surface du sol



Stade principal 1: développement des feuilles 1, 2

- 10 la première feuille sort du coléoptile
- 11 première feuille étalée
- 12 2 feuilles étalées
- 13 3 feuilles étalées
- 1. et ainsi de suite ...
- 19 9 ou davantage de feuilles étalées

	Levée ²	Une feuille	Deux feuilles	Trois feuilles
Zadoks	10	11	12	13
Keller et Baggioloni	A	B	C	D
Feekes et Large	1	1	1	1

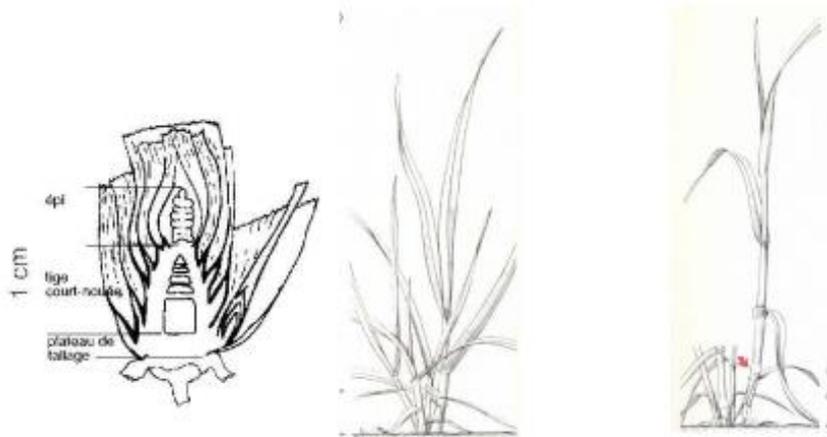
Stade principal 2: le tallage³

- 20 aucune talle visible
- 21 début tallage: la première talle est visible
- 22 2 talles visibles
- 23 3 talles visibles
- 2. et ainsi de suite ...
- 29 fin tallage
- 1 Une feuille est étalée si sa ligule est visible ou si l'extrémité de la prochaine feuille est visible
- 2 Le tallage ou l'élongation de la tige principale peut intervenir avant le stade 13, dans ce cas continuez avec le stade 21
- 3 Si l'élongation de la tige principale commence avant la fin du tallage alors continuez au stade 30.



	Début tallage	Plein tallage	Fin tallage
Zadoks	21	26	30
Keller et Baggioloni	E	F	H
Feekes et Large	2	3	4

2008



	Redressement	Premier nœud
Zadoks	30	31
Keller et Baggioloni	H	I
Feekes et Large	5	6

Stade principal 3: élongation de la tige principale

30 début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage.

31 le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage

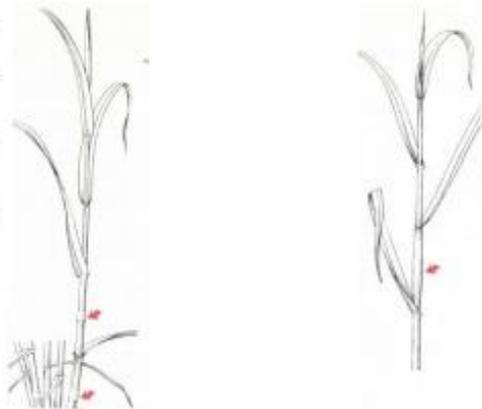
32 le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud

33 le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud

3 . et ainsi de suite ...

37 la dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée sur elle-même

39 le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible



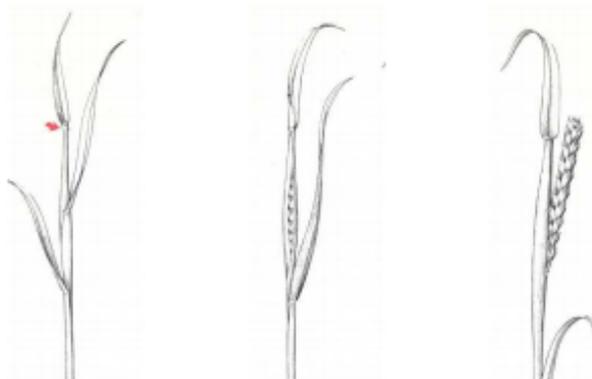
	Deuxième nœud	Apparition de la dernière feuille
Zadoks	32	37
Keller et Baggioloni	J	K
Feekes et Large	7	8

2008

Stades repères

Stade principal 4: gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison

- 41 début gonflement: élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille
 43 la gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée
 45 gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille
 47 la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre
 49 les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)



	Ligule visible	Gaine éclatée	Emergence de l'épi
Zadoks	39	45	50
Keller et Baglioloni	L	M	N
Feekes et Large	9	10	10.1

Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épisaison

- 51 début de l'épisaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
 52 20% de l'inflorescence est sortie
 53 30% de l'inflorescence est sortie
 54 40% de l'inflorescence est sortie
 55 mi-épisaison: 50% de l'inflorescence est sortie
 56 60% de l'inflorescence est sortie
 57 70% de l'inflorescence est sortie
 58 80% de l'inflorescence est sortie
 59 fin de l'épisaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine



	Epi dégagé	Début floraison
Zadoks	58	60
Keller et Baglioloni	O	P
Feekes et Large	10.5	10.5.1

Stade principal 6: floraison, anthèse

- 61 début floraison, les premières anthères sont visibles
 65 pleine floraison, 50% des anthères sont sorties
 69 fin floraison, tous les épillets ont fleuri, quelques anthères desséchées peuvent subsister

Stades repères

Stade principal 7: développement des graines

71 stade aqueux: les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale

73 début du stade laiteux

75 stade milaiteux: contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes

77 fin du stade laiteux

Stade principal 8: maturation des graines

83 début du stade pâteux

85 stade pâteux mou: contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible

87 stade pâteux dur: contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible

89 maturation complète: le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle

Stade principal 9: sénescence

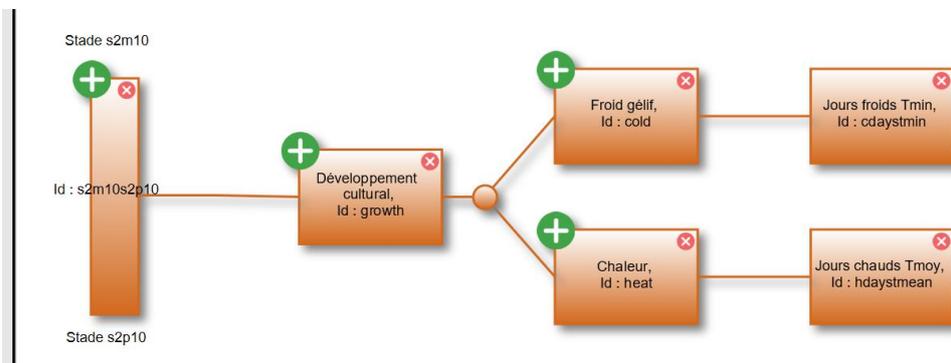
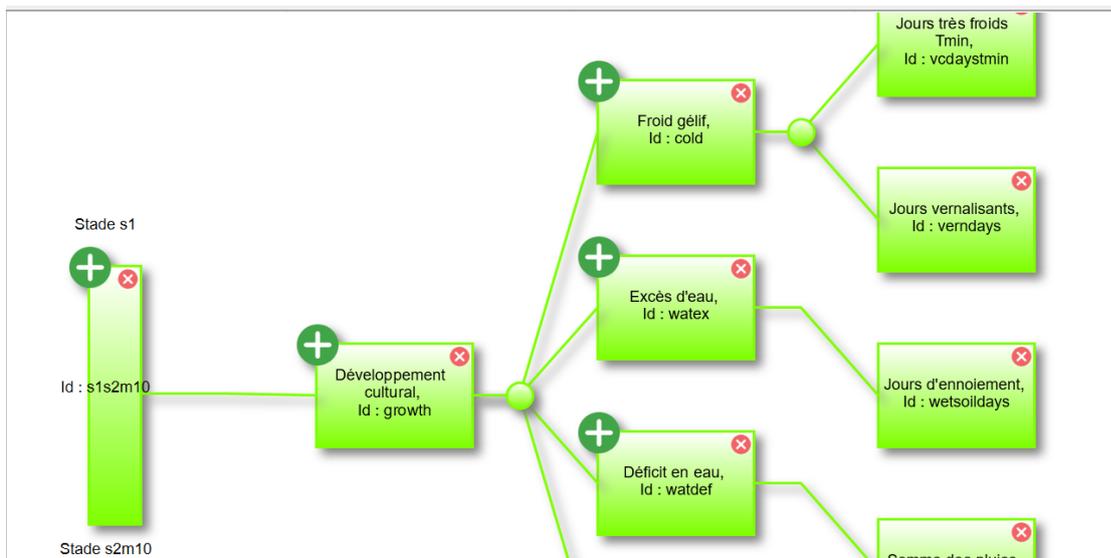
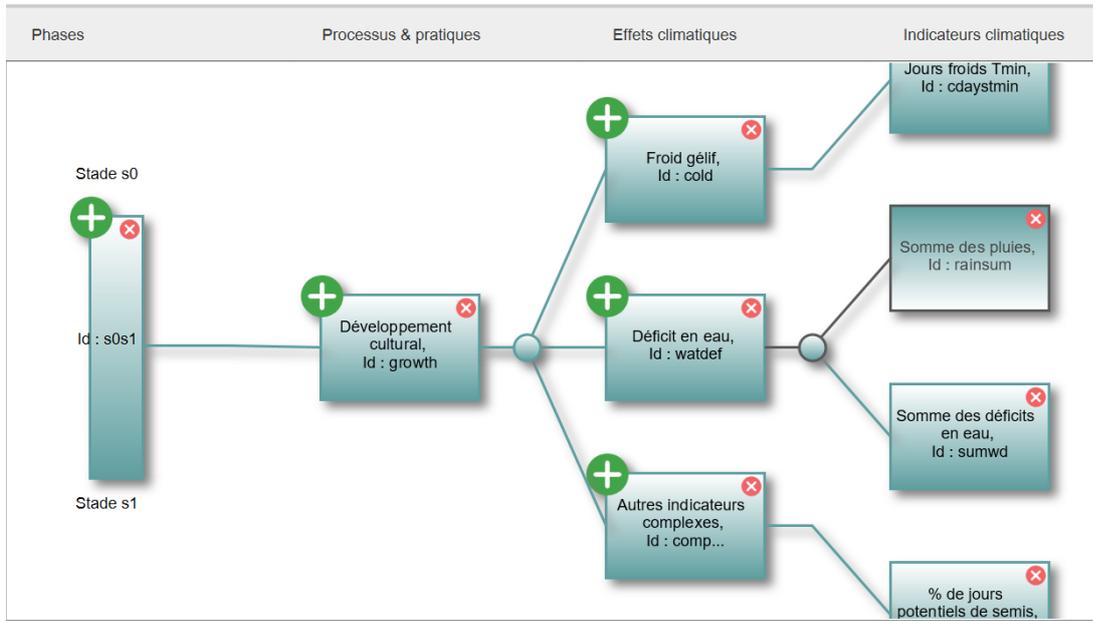
92 sur-maturité: le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle

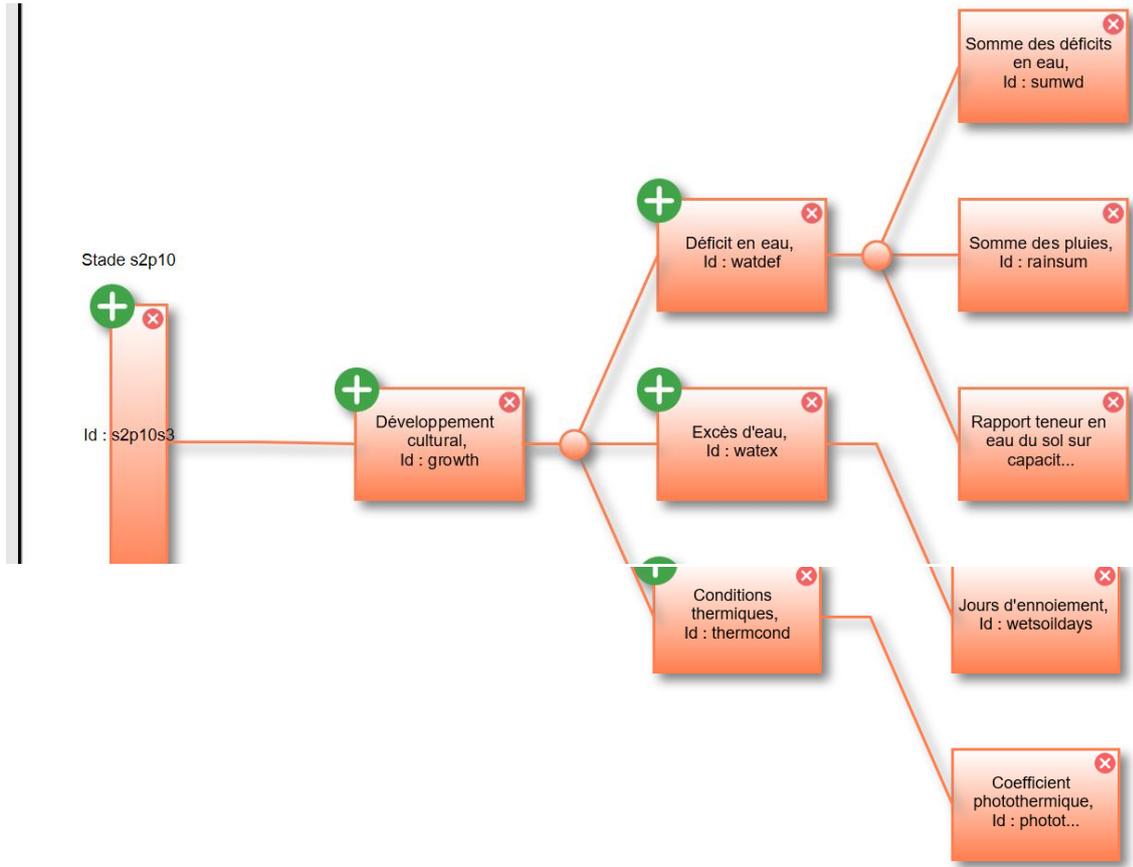
93 des graines se détachent

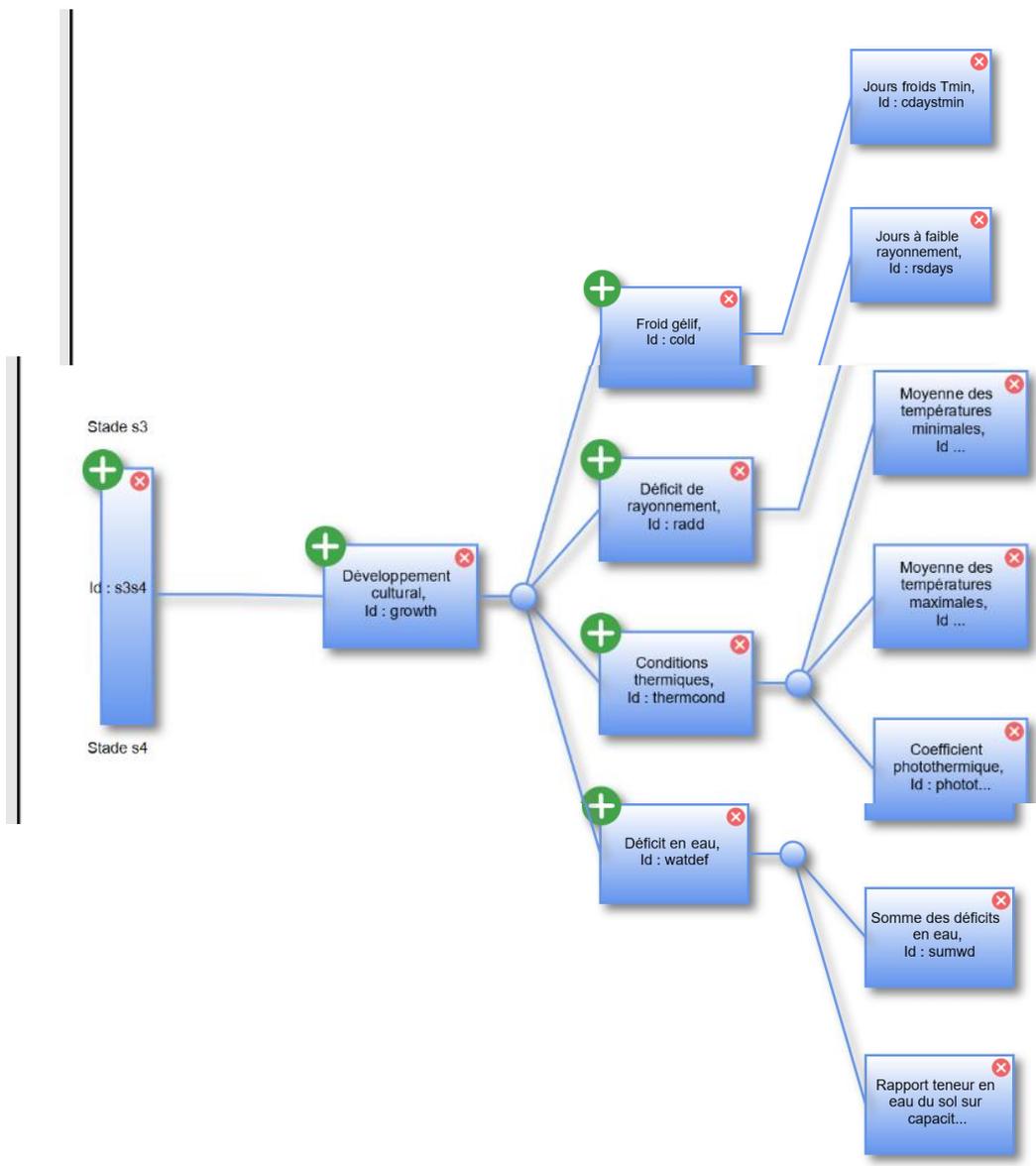
97 la plante meurt et s'affaisse

99 produit après récolte

Annexe 2. Arbre des indicateurs écoclimatiques







Annexe 3. Correspondance jours calendaires / jours juliens

Correspondance jours calendaires / jours juliens année 1

Jour	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

Correspondance jours calendaires / jours juliens année 2

Jour	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
1	366	397	425	456	486	517	547	578	609	639	670	700
2	367	398	426	457	487	518	548	579	610	640	671	701
3	368	399	427	458	488	519	549	580	611	641	672	702
4	369	400	428	459	489	520	550	581	612	642	673	703
5	370	401	429	460	490	521	551	582	613	643	674	704
6	371	402	430	461	491	522	552	583	614	644	675	705
7	372	403	431	462	492	523	553	584	615	645	676	706
8	373	404	432	463	493	524	554	585	616	646	677	707
9	374	405	433	464	494	525	555	586	617	647	678	708
10	375	406	434	465	495	526	556	587	618	648	679	709
11	376	407	435	466	496	527	557	588	619	649	680	710
12	377	408	436	467	497	528	558	589	620	650	681	711
13	378	409	437	468	498	529	559	590	621	651	682	712
14	379	410	438	469	499	530	560	591	622	652	683	713
15	380	411	439	470	500	531	561	592	623	653	684	714
16	381	412	440	471	501	532	562	593	624	654	685	715
17	382	413	441	472	502	533	563	594	625	655	686	716
18	383	414	442	473	503	534	564	595	626	656	687	717
19	384	415	443	474	504	535	565	596	627	657	688	718
20	385	416	444	475	505	536	566	597	628	658	689	719
21	386	417	445	476	506	537	567	598	629	659	690	720
22	387	418	446	477	507	538	568	599	630	660	691	721
23	388	419	447	478	508	539	569	600	631	661	692	722
24	389	420	448	479	509	540	570	601	632	662	693	723
25	390	421	449	480	510	541	571	602	633	663	694	724
26	391	422	450	481	511	542	572	603	634	664	695	725
27	392	423	451	482	512	543	573	604	635	665	696	726
28	393	424	452	483	513	544	574	605	636	666	697	727
29	394		453	484	514	545	575	606	637	667	698	728
30	395		454	485	515	546	576	607	638	668	699	729
31	396		455		516		577	608		669		730

Annexe 4. Liste des différentes réunions et présentations effectuées durant le stage

- Lundi 25 février 2021 (en amont du stage) : participation au cours de Nathalie de Noblet-Ducoudré (chercheuse au LSCE) sur le changement climatique et ses impacts en agriculture.
- Mercredi 10 février 2021 : Conférence d'Eric Duchêne, Pierre-Louis Fritzner et Maéva Po illustrant des applications concrètes de l'utilisation de GETARI, de projets en lien avec le changement climatique et l'agriculture (LACCAVE en particulier).
- Vendredi 12 février 2021 : participation à un Webinaire pour la prise en main du logiciel GETARI, utilisé pour le calcul d'indicateurs. Effectué par Inaki Garcia de Cortazar Atauri.
- Mercredi 24 février 2021 : réunion avec Nathalie de Noblet-Ducoudré pour une discussion sur les différents modèles climatiques de projections (leurs différences, les variables qu'ils présentent...) pour nous aider dans le choix d'un modèle en vue du calcul des indicateurs.
- Mardi 9 mars 2021 : réunion avec les écophysiologistes du projet pour échanger sur les informations tirées de la bibliographie et essayer d'arriver à une liste précise d'effets climatiques et leurs valeurs seuils associées.
- Vendredi 16 avril 2021 : réunion avec les écophysiologistes du projet afin d'arrêter la liste des indicateurs écoclimatiques.
- Lundi 19 avril 2021 : présentation des travaux intermédiaires (qualité du modèle phénologique, tests d'indicateurs) à l'ensemble de l'unité Agroclim.
- Vendredi 7 mai 2021 : réunion avec les écophysiologistes pour discuter des premiers résultats bruts après calcul des indicateurs et essayer d'établir une méthode d'analyse. Présence de Marie Launay, Jean-Charles Deswarte (ARVALIS), Karine Chenu (Queensland University), Marie-Odile Bancal (enseignant-chercheur à Agro ParisTech).
- Du 21 au 23 juin 2021 : formation à l'analyse multivariée avec application des principales méthodes statistiques sous R. Assurée par Jérôme-Philippe GARSJ (formateur en statistiques pour la société Arkesys formation à Lyon).
- Lundi 5 juillet 2021 : présentation des premiers résultats à l'ensemble de l'unité Agroclim.