



HAL
open science

Plafonnement des rendements de blé en France : mise en place d'une méthodologie d'analyse rétrospective des données météorologiques

Marine Marjou

► To cite this version:

Marine Marjou. Plafonnement des rendements de blé en France : mise en place d'une méthodologie d'analyse rétrospective des données météorologiques. Statistiques [stat]. 2018. hal-03138644

HAL Id: hal-03138644

<https://hal.inrae.fr/hal-03138644>

Submitted on 11 Feb 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.

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2017-2018

Spécialité :

Data science pour la biologie

Spécialisation (et option éventuelle) :

.....

Mémoire de fin d'études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Plafonnement des rendements de blé en France : mise en place d'une méthodologie d'analyse rétrospective des données météorologiques

Par : Marine MARJOU



Soutenu à Rennes le 04/09/2018

Devant le jury composé de :

Enseignant référent : David CAUSEUR

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : Mathieu EMILY

Maîtres de stage : Patrick BERTUZZI et Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce stage.

Mes premiers remerciements vont à Patrick BERTUZZI et Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI, mes maîtres de stage, qui m'ont accueilli au sein de leur unité. Leurs conseils, leurs confiances et leurs bienveillances à mon égard ont permis le bon déroulement de ce stage. Leurs connaissances métier est grande et se fut un réel plaisir d'approfondir avec eux le contexte hautement sensible du réchauffement climatique.

Merci à Olivier MAURY qui a su faire preuve de réactivité et de patience pour résoudre rapidement et efficacement les problèmes informatiques rencontrés.

Merci également à Augustin pour son extravagance, et qui, j'espère deviendra un jour châtelain.

Je désire aussi remercier l'ensemble des personnes travaillant au sein des unités Agroclim et Emmah-Climat pour leur accueil dans leurs locaux.

Merci à l'ensemble des personnes que j'ai pu rencontrer en dehors du stage. Ce séjour à Avignon n'aurait pas eu le même goût sans eux.

Merci également à l'ensemble de l'équipe pédagogique du master Data Science à Agrocampus Ouest Rennes.

Table des matières

I.	Introduction	1
A.	Contexte générale de l'étude.....	1
B.	Le plafonnement des rendements du blé en France.....	1
C.	Utilisation d'indicateurs pour étudier l'impact du climat sur l'évolution du rendement du blé .	2
D.	Le différents stades phénologiques du blé tendre.....	3
E.	Les variables météorologiques d'intérêt.....	5
F.	Objectifs du travail	5
II.	Matériels et méthodes	6
A.	Données disponibles	6
1.	Données climatiques SAFRAN.....	6
2.	Données de rendements	6
B.	Méthodologie de l'étude	6
1.	Définition de la zone d'étude	7
2.	Sélection des indicateurs.....	7
3.	Calcul des indicateurs	7
4.	Vérification des résultats	9
C.	Méthodes statistiques mobilisées pour l'analyse des données.....	9
1.	Tests statistiques de comparaison d'échantillons	10
2.	Analyse des séries temporelles.....	10
3.	Analyse spatiale des dates phénologiques	11
4.	Significativité et tendances des résultats	12
5.	Corrélation	12
III.	Résultats et discussions	13
A.	Analyse de la phénologie	13
1.	Un avancement des dates phénologiques	13
2.	Un zonage climatique	14
B.	Analyse des rendements	16
1.	Une rupture tendancielle à l'échelle nationale de la France	16
2.	Détection d'années extrêmes à l'échelle nationale	17
3.	Une rupture tendancielle à l'échelle des départements	19
C.	Analyse des indicateurs climatiques.....	22
1.	Evolution temporelle à l'échelle annuelle	23
2.	Evolution temporelle à l'échelle décennale	24
3.	Comparaison d'échantillon	26
4.	Evaluation de la corrélation entre les indicateurs et le rendement.....	27
D.	Mise en relation des résultats	28
IV.	Bilan et perspectives	29
V.	Bibliographie	31
VI.	Annexes.....	33

Liste des Figures :

<i>Figure 1 : Rendements médians depuis 1951 en France métropolitaine.</i>	2
<i>Figure 2 : Calendrier des stades phénologiques du blé tendre (source Arvalis - Institut du Végétal).</i>	4
<i>Figure 3 : Cycle phénologique du blé tendre.</i>	4
<i>Figure 4 : Représentation des mailles sélectionnées.</i>	7
<i>Figure 5 : Evolution des dates des stades phénologiques.</i>	13
<i>Figure 6 : Evolution des durées des phases phénologiques.</i>	14
<i>Figure 7 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S2 : épi à 1 cm.</i>	15
<i>Figure 8 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S4 : floraison.</i>	15
<i>Figure 9 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S5 : maturité.</i>	15
<i>Figure 10 : Evolution des rendements médians du blé français et représentation de la rupture temporelle.</i>	17
<i>Figure 11 : Distribution des résidus issues de deux régressions linéaires.</i>	17
<i>Figure 12 : Représentation des années extrêmes.</i>	18
<i>Figure 13 : Détection d'une rupture temporelle par département.</i>	21
<i>Figure 14 : Histogramme du nombre de ruptures détectées par années.</i>	22
<i>Figure 15 : Evolution de la médiane des indicateurs par année.</i>	23
<i>Figure 16 : Représentation des indicateurs par décennies.</i>	25
<i>Figure 17 : Distribution des indicateurs continus deux sous-séries.</i>	26
<i>Figure 18 : Corrélation entre les indicateurs et les rendements.</i>	27

Liste des Tableaux :

<i>Tableau 1 : Choix et justification agronomique des indicateurs.</i>	8
<i>Tableau 2 : Tableau récapitulatif des événements météorologiques connus pour les années extrêmes détectées.</i>	20
<i>Tableau 3 : Liste des indicateurs continus et discrets.</i>	23
<i>Tableau 4 : Récapitulatif des indicateurs significatifs (tendance générale).</i>	24
<i>Tableau 5 : Récapitulatif des indicateurs significatifs au pas de temps de la décennie.</i>	26
<i>Tableau 6 : Récapitulatif des indicateurs significatifs au test de Kolmogorov Smirnov et Wilcoxon.</i>	27
<i>Tableau 7 : Indicateurs significatifs au test de corrélation.</i>	28
<i>Tableau 8 : Récapitulatif des indicateurs significatifs pour l'ensemble des analyses.</i>	28

I. Introduction

A. Contexte générale de l'étude

Le changement climatique s'observe depuis le début du 20^{ème} siècle. La Terre a connu une hausse significative des températures à hauteur de 1.4°C depuis 1900 avec une accentuation sensible du réchauffement depuis les années 1970. Le changement climatique ne se définit pas seulement par la hausse globale des températures, mais c'est également l'apparition de nouveaux événements extrêmes comme des vagues de chaleurs ou des périodes de sécheresse, des hivers moins rigoureux et la présence d'événements extrêmes (canicules, pluies intenses tempêtes, etc.) plus fréquents qu'auparavant (en ANNEXE I, le résumé par Météo-France de la situation actuelle pour la France). Ces changements vont nécessairement avoir un impact sur les productions agricoles.

Parmi les différentes cultures présentes en France, le blé est la céréale la plus cultivée. Le blé tendre d'hiver représente, à lui tout seul, près de 50% des cultures céréalières. Il est cultivé en partie pour son amidon et sa teneur en protéine et est largement utilisé dans l'alimentation humaine et animale. En 2015, la France était le premier producteur de blé en Europe, et le 5^{ème} producteur mondial derrière la Chine, l'Inde, la Russie et les Etats-Unis.

B. Le plafonnement des rendements du blé en France

Des années 1950 jusqu'à la fin des années 1990, sur la base d'une estimation au niveau national, les rendements du blé tendre d'hiver français n'ont fait que croître avant d'atteindre un véritable plafonnement dès les années 2000 (Figure 1).

Depuis le début des années 1950 et jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle, l'accroissement des rendements est linéaire avec une progression d'environ 1 quintal par hectare et par an. Cette croissance peut être expliquée par le progrès de la sélection génétique et l'amélioration des techniques culturales (Brisson et al., 2010).

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la croissance du rendement est stoppée. Les rendements du blé tendre d'hiver français connaissent un véritable plafonnement autour de 62 quintaux/ha/an avec une variabilité interannuelle plus forte qu'antérieurement.

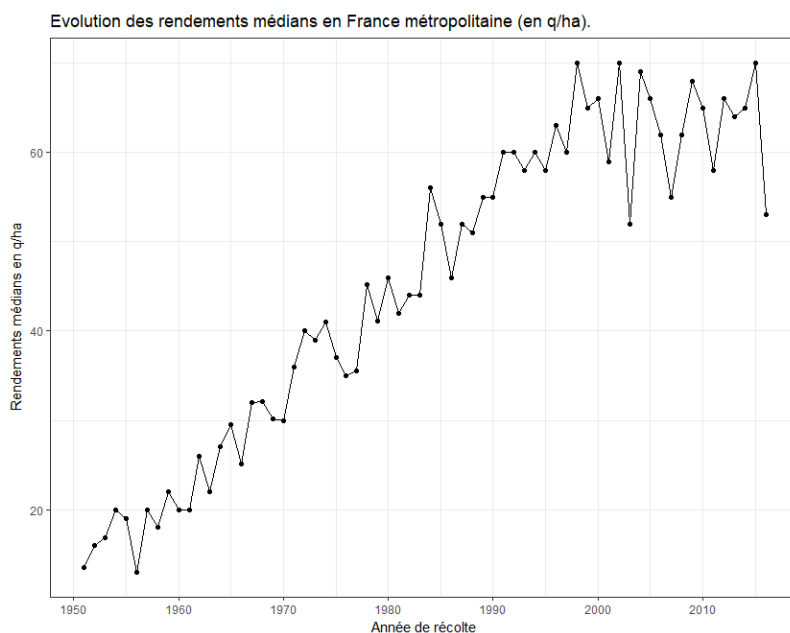


Figure 1 : Rendements médians depuis 1951 en France métropolitaine.

La valeur montrée sur la figure correspond à la médiane du rendement annuel laquelle est calculée à partir de la distribution des rendements départementaux constatés chaque année (source FranceAgrimer).

Pour expliquer ce plafonnement, on ne peut pas négliger un potentiel effet dépressif des politiques agri-environnementales mises en place dès les années 1990 dans les exploitations agricoles (diminution de l'apport en azote, réduction de l'usage des pesticides, etc...), mais ce plafonnement des rendements aurait aussi une explication causale par les premiers impacts du changement climatique que connaît la France (Brisson et al., 2010). L'hypothèse est qu'un des effets du changement climatique serait de produire des situations météorologiques atypiques voir inhabituelles, de différentes origines et globalement plus défavorables à la croissance et au développement de la culture. Par exemple les conditions météorologiques extrêmes du printemps 2016 (surabondance de pluie au printemps, un manque de luminosité en mai et juin couplé à une recrudescence importante des maladies fongiques) ont conduit à une forte diminution des rendements pour toute la moitié nord de la France (Ben-Ari et al. 2018).

C. Utilisation d'indicateurs pour étudier l'impact du climat sur l'évolution du rendement du blé

Afin d'analyser l'impact des variables météorologiques sur l'évolution du rendement nous avons utilisé des indicateurs climatiques (Holzkämper et al. 2011; Trnka et al., 2011, Holzkämper et al., 2013).

Un indicateur climatique est un outil d'évaluation grâce auquel on peut mesurer une situation ou une tendance à un instant donné, ou une évolution dans le temps et/ou l'espace d'un système (en l'occurrence une culture de blé). Il peut être aussi caractérisé comme un signal qui transmet un message émanant de plusieurs sources et dont le rôle principal est de caractériser l'état actuel d'un système et de mettre en évidence ou prédire un changement notable (Caubel et al. 2014).

Caubel et al., (2014) ont proposé un type d'indicateur, les indicateurs « écoclimatiques », lesquels sont calculés en prenant en compte les stades de développement de la plante. Contrairement aux indicateurs agroclimatiques classiques, qui calculent les conditions climatiques en utilisant des périodes calendaires fixées à l'avance, les indicateurs

éoclimatiques sont calculés sur des périodes variables d'une année sur l'autre qui prennent en compte l'influence des conditions météorologiques rencontrés chaque sur la croissance et le développement de la culture. Certains de ces indicateurs vont nous renseigner, d'une part, sur l'évolution climatique des rendements, et d'autre part, nous aurons des indicateurs spécifiques qui répondent à un besoin de la plante au moment de la phase phénologique en question ou qui expriment des seuils à ne pas dépasser pour la bonne croissance du blé.

Néanmoins, pour pouvoir déterminer les principaux stades phénologiques de chaque culture (ici le blé), il est nécessaire de les identifier par l'utilisation d'un modèle de phénologie (Chuine et al., 2013).

D. Le différents stades phénologiques du blé tendre

La phénologie d'une plante est l'étude de l'apparition d'événements déterminés par les variations saisonnières du climat. Pour le blé tendre, son cycle s'étale depuis son semis à l'automne, jusqu'à la récolte l'été de l'année suivante (Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le calendrier phénologique (date d'apparition des stades) est variable chaque année, dépendant des conditions météorologiques rencontrées durant le cycle cultural.

Pour le blé, les principaux stades phénologiques qui sont couramment observés sont (Gate, 1995) :

- **Semis** (S0)
- **Levée** (S1) ou apparition de la première feuille hors de terre, qui succède à la germination de la graine.
- **Epi à 1 cm** (S2) qui symbolise le passage entre la phase de tallage (émergence et développement des feuilles) et celle de la montaison (début du développement de l'épi). Ce stade est déterminant pour la suite de la production, la date d'apparition de ce stade peut varier fortement d'une année sur l'autre à cause des conditions thermiques. Par ailleurs, la plante doit satisfaire ses besoins en vernalisation¹ et en photopériode², notamment en sortie d'hiver.
- **Floraison** (S4) qui se matérialise par l'apparition des étamines (appareil mâle de la fleur) sur les épis.
- **Maturité physiologique** (S5) (à ne pas confondre avec la maturité récolte), qui correspond au moment où la graine atteint son poids sec maximal.

Dans le calendrier d'étude, le stade S3 correspond à la méiose pollinique. Ce stade ne sera pas étudié dans la suite de notre étude.

¹ Vernalisation : La vernalisation est la période de froid subie (température comprise entre 3°C et 10°C) par le blé nécessaire pour la faire passer du stade végétatif au stade reproductif, c'est-à-dire pour enclencher la floraison.

² Photopériode : Le photopériode est le rapport entre la durée du jour et de la nuit. Ce paramètre est un facteur écophysique qui joue un rôle prépondérant pour certaines plantes, comme le blé d'hiver, dans le mécanisme de déclenchement de la floraison.

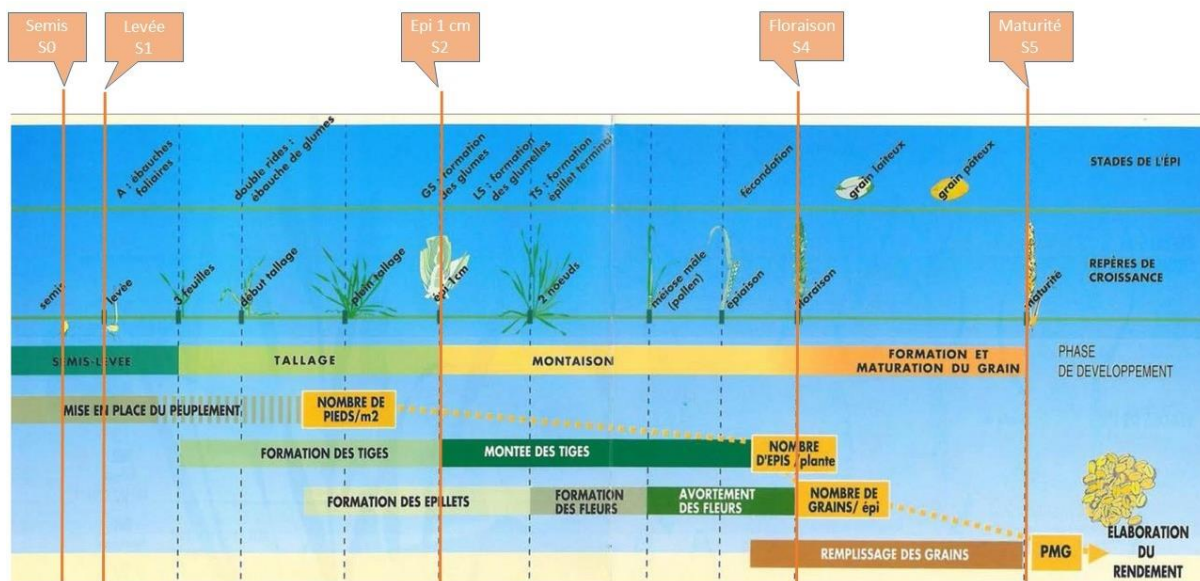


Figure 2 : Calendrier des stades phénologiques du blé tendre (source Arvalis - Institut du Végétal).

À partir de ces stades, et en prenant en compte les stades qui sont classiquement observés et modélisés, nous avons défini quatre phases phénologiques (Figure 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- phase de « semis-levée » (**S0S1**) qui correspond à la période de germination de la graine.
- phase de « tallage » (**S1S2**) qui correspond à l'émission et au développement des feuilles.
- phase de « montaison » de l'épi (**S2S4**).
- phase de « formation et maturité du grain » (**S4S5**) qui correspond à la phase de croissance de l'épi et du remplissage du grain.

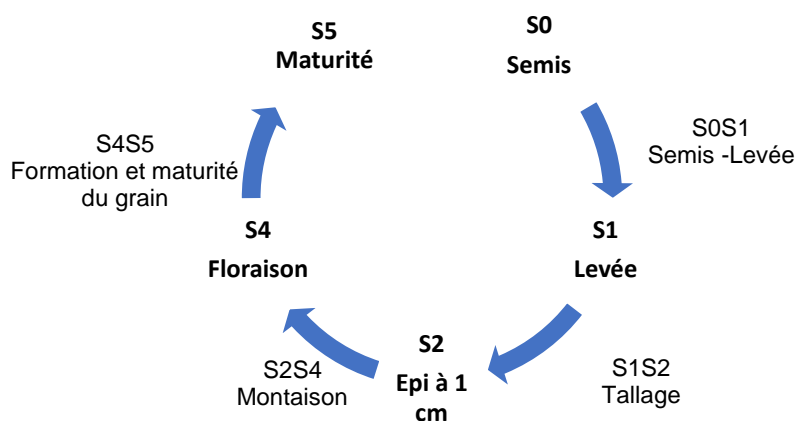


Figure 3 : Cycle phénologique du blé tendre.

Pour déterminer ces stades qui seront ensuite utilisés pour calculer les indicateurs écoclimatiques, nous allons utiliser un modèle phénologique. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé un modèle mécaniste basé sur le modèle phénologique du modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998 ; Brisson et al., 2003 ; Coucheney et al., 2015). Ce modèle permet de simuler les quatre phases sélectionnées de l'étude (S1, S2, S4 et S5). Il décrit le lien entre les processus physiologiques et les paramètres météorologiques à savoir la température de

l'air et/ou la photopériode solaire lors des différentes phases et il tient compte des effets de la vernalisation et de la photopériode.

E. Les variables météorologiques d'intérêt

Selon Gate (1995), le rendement s'élabore progressivement à chaque moment du cycle cultural en fonction des conditions météorologiques rencontrées et de la disponibilité en eau et en éléments minéraux nutritifs.

Nous avons retenu cinq variables météorologiques pouvant être citées comme étant importantes pour le développement du blé : la température, le rayonnement global, la pluviométrie, l'humidité de l'air et enfin la vitesse du vent.

La température est une variable clé et déterminante de la phénologie du blé et donc *a fortiori* du calendrier de développement de la culture. De trop faibles températures après le semis du blé peuvent entraîner la mort de la culture, et *a contrario*, de trop fortes températures en période de vernalisation peut allonger la phase S1S2 tallage et donc retarder l'apparition du stade S2 épi à 1 cm. C'est aussi un facteur déterminant des conditions physiologiques de la croissance du blé caractérisées par l'existence d'une plage de températures optimales et des seuils de températures minimaux ou maximaux défavorables voir létaux. Ainsi on sait que les fortes températures lors de la phase S4S5 ont une mauvaise influence sur la formation des grains en quantité et en qualité.

Le rayonnement global mesure la quantité d'énergie venant du soleil. Il intervient directement dans le processus de photosynthèse (production de la matière verte des plantes).

La pluviométrie constitue la première ressource en eau disponible pour satisfaire les besoins en eau de la culture. Un déficit pluviométrique est toujours défavorable à la culture. À l'inverse, une pluviométrie excédentaire ou de forte intensité peut occasionner des dégâts sur la culture (ennoisement ou destruction de la plante). De trop longues séquences de pluies peuvent aussi perturber les travaux agricoles notamment en période de récolte.

L'humidité de l'air, la vitesse du vent en relation avec le rayonnement global sont les déterminants majeurs de la demande en eau potentielle faite à la culture par le climat et de la capacité qu'à la culture à répondre à cette demande en fonction de l'eau disponible dans le sol. L'humidité de l'air, lorsqu'elle est élevée peut être aussi considérée comme un indicateur de risque biotique de maladies fongiques. Des séquences de vent trop importantes peuvent entraîner des effets mécaniques destructeurs sur la culture et rendre plus difficile la réalisation d'interventions techniques comme les épandages d'engrais et des produits phytosanitaires qui permettent un rendement optimal et de qualité.

F. Objectifs du travail

L'objectif de ce travail est donc de contribuer :

- À la mise en place d'une chaîne d'analyse de l'impact des données météorologiques (rayonnement solaire, température, humidité de l'air et précipitations) depuis le début des années 1960, jusqu'à nos jours, exprimé sous la forme de calcul d'indicateurs pouvant être relié à la croissance et au développement de la culture du blé,
- D'analyser les évolutions temporelles de ces indicateurs,
- D'analyser les relations existantes entre ces indicateurs et les rendements observés.

Ce travail devra nous permettre aussi de mieux appréhender, selon la phase de la culture, les différents zonages climatiques de production du blé en France et d'identifier les facteurs climatiques tendanciels ou ponctuels qui ont un impact sur le rendement de la culture du blé.

II. Matériels et méthodes

A. Données disponibles

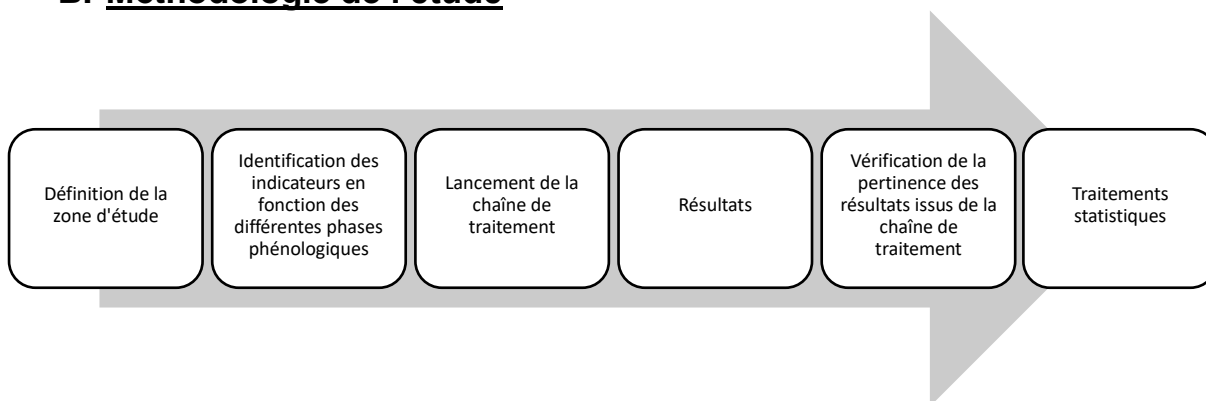
1. Données climatiques SAFRAN

Dans notre cas d'étude, nous utilisons les données météorologiques du système de ré-analyse SAFRAN couvrant l'ensemble du territoire national (Vidal et al., 2010). SAFRAN est un système d'analyse de paramètres météorologiques. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire au pas de temps horaire et journalier les paramètres température, humidité, vent, précipitations rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km) Cela représente plus de 8600 mailles pour le territoire français métropolitain pour lesquels nous avons un suivi journalier des paramètres météorologiques depuis 1958 et jusqu'à nos jours.

2. Données de rendements

Nous avons les données statistiques des rendements départementaux de blé en France métropolitaine (Source FranceAgriMer). La base de données démarre l'année 1951, jusqu'en 2016. Après exploration des données de rendement, nous nous sommes aperçus que pour certains départements nous manquons de données annuelles. Dans un souci d'homogénéité des données, nous avons supprimé de l'étude : les départements de la couronne parisienne (75, 91, 92, 93, 94, 95), la Corse (2A, 2B) et enfin le département des Alpes-Maritimes (06).

B. Méthodologie de l'étude



1. Définition de la zone d'étude

Les indicateurs climatiques vont être calculés sur une partie définie du territoire national. Notre but étant de définir une zone d'étude qui soit cohérente avec la production de blé français.

Nous nous sommes intéressés aux caractéristiques propres d'un territoire représenté par une maille. À partir des indications données par la base de données Corine-Land-Cover (base de données européenne recensant l'occupation biophysique des sols - Agence européenne de l'environnement), nous avons uniquement sélectionné les mailles pour lesquelles la proportion de terres arables³ sur la maille est strictement supérieure à 0%. Les mailles se trouvant à une altitude supérieure à 1000 mètres ont également été omises de l'étude. Enfin, les mailles se trouvant en partie sur les frontières territoriales et maritimes françaises ont également été supprimées.

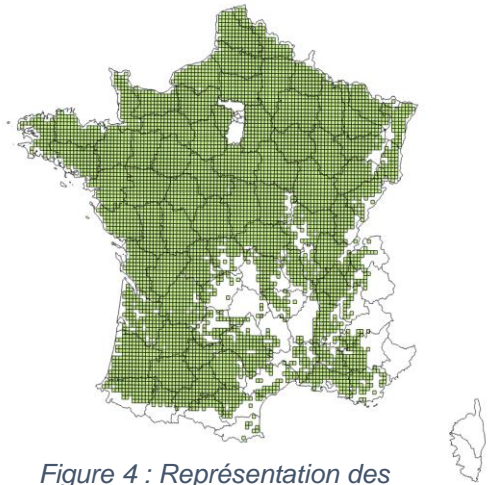


Figure 4 : Représentation des mailles sélectionnées.

2. Sélection des indicateurs

Nous avons identifié cinq stades d'intérêt (page 3) permettant de caractériser quatre phases phénologiques importantes pour la mise en place du rendement du blé (Figure 3). Le Tableau 1 présente et justifie le choix des indicateurs retenus pour chaque phase phénologique.

Les indicateurs sélectionnés répondent à deux objectifs :

- Donner une information sur les potentiels changements au cours de ces dernières décennies d'un indicateur sur une phase phénologique.
- Identifier les problèmes liés à des conditions climatiques défavorables pour la culture.

3. Calcul des indicateurs

Les indicateurs sont calculés pour chaque maille Safran et chaque cycle du blé, de 1960 à 2016. Les calculs sont réalisés à partir de la chaîne de traitement développée par Agroclim qui permet de mettre en relation les données climatiques avec le modèle phénologique sélectionné et les indicateurs prédéfinis (voir Tableau 1). La figure ci-dessous fait la synthèse des différentes étapes.

³ Terre arable : terre qui peut être cultivée.

Tableau 1 : Choix et justification agronomique des indicateurs.

PHASE	INDICATEUR	DEFINITION DE L'INDICATEUR	SEUIL	JUSTIFICATION AGRONOMIQUE
S0S1 semis-levée	cdaystmin	Nombre de jours de faible température	Tmin < -5°C	Risque de gel du coléoptile.
	cdaystmean	Nombre de jours où la température moyenne est inférieure à un seuil	Tmean < 0°C	Risque de non dégel dans la journée, correspond également à la température minimum pour la germination.
	meant	Température moyenne journalière		Caractérisation condition météorologique de la phase.
	excraidays	Nombre de jours de pluie	Rain > 15 mm	Risque d'ennoiement de la graine.
	rainsum	Somme des précipitations		Caractérisation condition météorologique de la phase.
	raidays	Nombre de jours de pluie	Rain > 0 mm	Permet de se renseigner les périodes de sécheresse. Il peut y avoir un risque de non germination s'il n'y a pas d'eau.
	sumsorad	Somme des radiations		Caractérisation condition météorologique de la phase.
S1S2 Tallage	cdaystmin	Nombre de jours de faible température	Tmin < -5°C	Gel destructeur, risque de voir disparaître la plante.
	vcdastmin	Nombre de jours de très faible température	Tmin < -8°C	
	hsdays	Nombre de jours de forte chaleur	Tmax > 20°C	Risque de préjudice sur la vernalisation (période de requises par la plante avec des températures aux alentours des 3-10°C).
	numbdroughtwav	Nombre de vague de sécheresse		Peut avoir une incidence sur la réduction du nombre de talles.
	meant	Température moyenne journalière		Caractérisation condition météorologique de la phase.
	Excraidays	Nombre de jours de forte pluie	Rain > 30 mm	Peu sensible à l'ennoiement mais il peut y avoir un risque pour la plante s'il y a ennoiement.
	raidays	Nombre de jours de pluie	Rain > 0 mm	Caractérisation condition météorologique de la phase.
	rainsum	Somme des précipitations		Caractérisation condition météorologique de la phase.
sumsorad	Somme des radiations		Caractérisation condition météorologique de la phase.	
S2S4 Montaison	cdaystmean	Nombre de jours où la température moyenne journalière est inférieure à un seuil	Tmean < 7°C	Ralentissement de la montaison. Grande sensibilité au gel à cette phase qui peut entraîner une perte de rendement voire la destruction des tiges.
	cdaystmin	Nombre de jours de faible température	Tmin < 0°C	
	vcdastmin	Nombre de jours de très faible température	Tmin < -4°C	
	hdaystmean	Nombre de jours de chaleur	Tmean > 15°C	Accélération de la montaison en relation avec le rayonnement solaire disponible.
	hsdays	Nombre de jours de fortes chaleur	Tmax > 25°C	Risque d'avortement des fleurs dû à l'échaudage.
	meant	Température moyenne journalière		Si température supérieure à 10-15°C risque de non fertilité des fleurs.
	excraidays	Nombre de jours de fortes pluies	Rain > 30 mm	Si ennoiement risque de carence en minéraux.
	raidays	Nombre de jours de pluie	Rain > 0mm	Durant la montaison, l'alimentation hydrique est un facteur climatique important.
	rainsum	Somme des précipitations		
	sumsorad	Somme des radiations		Caractérisation condition météorologique de la phase.
S4S5 Formation et maturité du grain	meant	Température moyenne journalière		Caractérisation condition météorologique de la phase.
	hdaystmean	Nombre de jours de forte chaleur	Tmean > 25°C	Diminution du poids des grains, risque d'échaudage.
	rainsum	Somme des précipitations		Caractérisation condition météorologique de la phase Trop de pluie peut pénaliser la maturation physiologique du blé, a contrario la sécheresse ne facilite pas le remplissage du grain.
	excraidays	Nombre de jours de fortes pluies	Rain > 20 mm	
	raidays	Nombre de jours de pluie	Rain > 0 mm	
	avsorad	Rayonnement moyen journalier		Caractérisation condition météorologique de la phase, le rayonnement est un déterminant majeur de la maturité.
	sumsorad	Somme des radiations		

Base de données SAFRAN

- Dans un premier temps la chaîne de calcul va faire appel à la base de données SAFRAN regroupant les informations météorologiques recensées par Météo France depuis 1959.

Modèle phénologique

- Le modèle phénologique requiert quelques propriétés. Nous étudierons la variété de blé Soisson (une variété considérée comme moyenne et adaptée à tout type de sol) avec un modèle linéaire pour une date de semis fixée au 1er octobre.
- Grâce aux données climatiques (température et rayonnement global journalier), le modèle phénologique va calculer les dates d'apparitions des stades pour chacune des mailles.

Calcul des indicateurs par mailles

- À partir des dates des stades phénologiques, les indicateurs vont pouvoir être calculés sur chacune des phases.

Au bout du compte, nous avons à notre disposition un jeu de données de plus de 12 millions de données (6478 mailles x 33 indicateurs x 57 cycles de cultures) sur lequel nous allons essayer de faire ressortir des changements notables du climat.

4. Vérification des résultats

Afin de vérifier la pertinence des calculs fournis par la chaîne de traitement, nous avons mis en place une méthodologie de vérification des résultats.

Dans un premier temps, nous avons vérifié que l'ensemble des calculs ont été correctement effectués sur l'ensemble de nos mailles pour tous nos indicateurs.

Dans un deuxième temps, nous avons vérifié la cohérence des calculs engendrés pour un indicateur. Par exemple, nous avons vérifié que le nombre de jours de pluie d'une phase ne dépassait pas la durée totale de jours de la phase.

Enfin, afin d'être certains de la cohérence des résultats obtenus, une visualisation graphique globale des résultats a été réalisée permettant ainsi d'évaluer les ordres de grandeurs.

Ce travail a permis d'assurer l'utilisation d'un jeu de données de qualité pour la suite d'analyses.

C. Méthodes statistiques mobilisées pour l'analyse des données

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé plusieurs types de test en fonction des analyses que nous devons réaliser pour comparer les échantillons de données. Ces échantillons pouvaient être des séries temporelles (deux sous séries de la série temporelle globale), des échantillons de données spatialisés ou des comparaisons statistiques entre séries de différentes variables. Voici les principaux tests utilisés et leurs caractéristiques.

1. Tests statistiques de comparaison d'échantillons

Test de Fisher

Le test de Fisher ou d'égalité des variances permet de tester si deux échantillons ont la même variance sous l'hypothèse que ces deux échantillons suivent une loi normale.

Test de Student

Le test de Student permet de comparer les moyennes de deux échantillons différents qui suivent une loi normale et qui ont des variances similaires.

Test t de Welch

Le test t de Welch permet de comparer les moyennes de deux échantillons qui ont des variances différentes (test de Fisher significatif). C'est une alternative au test de Student.

Test de Wilcoxon

Ce test non paramétrique permet de comparer les moyennes de deux échantillons qui ne suivent pas des lois normales.

Test de Kolmogorov Smirnov (KS)

Le test de KS permet de déterminer si deux échantillons suivent la même loi. Il permet de comparer les distributions.

2. Analyse des séries temporelles

Dans le cas de cette étude nous avons utilisé des séries temporelles de différentes variables (rendements, stades phénologiques, valeurs d'indicateurs). Deux analyses ont été réalisées : 1) d'une part, une analyse permettant la détection d'une rupture dans ces séries ; 2) d'autre part, nous avons essayé de proposer des modèles permettant de décrire les tendances de séries complètes ou après analyse de la rupture.

Détection d'une rupture temporelle :

Une rupture temporelle peut se définir comme étant un changement de tendance dans l'évolution des données. Le test de Chow est utilisé dans le cadre des séries temporelles afin de déterminer une cassure significative dans les données. Il s'appuie sur une comparaison de modèle et permet de déterminer sous l'hypothèse nulle que les coefficients de deux régressions linéaires sont égaux.

Le modèle général s'écrit : $y = ax + b + \varepsilon$

On sépare le modèle général en deux sous modèles :

$$\begin{cases} y_1 = a_1x + b_1 + \varepsilon \\ y_2 = a_2x + b_2 + \varepsilon \end{cases}$$

On considère les deux hypothèses suivantes :

$\begin{cases} H_0 : \text{le modèle est stable et } a_1 = a_2, b_1 = b_2 : \text{ il n'y a pas de rupture temporelle} \\ H_1 : \text{le modèle est instable et } a_1 \neq a_2, b_1 \neq b_2 : \text{ il y a une rupture temporelle} \end{cases}$

Soit C la statistique de test de Chow et sa loi :

$$C = \frac{SCR_0 - (SCR_1 + SCR_2)}{\frac{SCR_1 + SCR_2}{N_1 + N_2 - 2 * k}} \sim \mathcal{F}_{N_1 + N_2 + 2k}^k$$

Avec :

- $SCR0$: Somme des carrés des résidus du modèle général
- $SCR1$: Somme des carrés des résidus du premier sous modèle (y_1)
- $SCR2$: Somme des carrés des résidus du deuxième sous modèle (y_2)
- $N1$: le nombre d'observations total du premier sous modèle (y_1)
- $N2$: le nombre d'observations total de du deuxième sous modèle (y_2)
- k : le nombre de paramètres à estimer

On accepte H_0 si $C > \mathcal{F}_{N1+N2+2k}^k$.

Ce test s'appuie sur la loi de Fisher et fait donc référence aux hypothèses sous-jacente d'homoscédasticité et de normalité des résidus. Si ces hypothèses ne sont pas respectées, nous ne pouvons certifier l'exactitude des résultats obtenus par ce test. Or, d'après les recherches de Toyoda (1974), il est possible d'appliquer le test de Chow en présence d'hétéroscédasticité, c'est-à-dire en cas de variance différentes entre nos échantillons. Il suffit que la taille d'un des deux échantillons étudiés soit largement supérieure ou inférieure à la taille du deuxième échantillon (Toyoda démontre sa méthode en utilisant des échantillons de taille 50 et 20).

Choix du meilleur modèle :

Deux types de modèle peuvent être appliqués sur nos séries temporelles. Le modèle initial, qui s'appuie sur l'ensemble des données (régression non contrainte), et le second modèle qui, à partir d'une rupture temporelle significative divise notre série en deux sous-séries temporelles (régression contrainte). A ce stade, il est parfois bon de vérifier la pertinence de la rupture. En effet, bien que significative, cette rupture, peut dans certains cas, ne pas avoir une réelle explication causale.

Pour ce faire, un test de comparaison de l'erreur quadratique moyenne a été mis en place. L'erreur quadratique moyenne correspond à la somme des résidus au carré pondérée par le nombre d'années de la série étudiée.

Dans le cas d'une régression contrainte :

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N} = \frac{SCR}{N}$$

Dans le cas d'une séparation du jeu de données selon une rupture temporelle :

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^{N1} \varepsilon_{i1}^2 + \sum_{j=1}^{N2} \varepsilon_{j2}^2}{N}$$

Avec :

- N : le nombre total d'années
- ε : les résidus du modèle général
- $N1$: le nombre total d'années dans le sous modèle 1
- ε_1 : les résidus du sous modèle 1
- $N2$: le nombre total d'années dans le sous modèle 2
- ε_2 : les résidus du sous modèle 2

3. Analyse spatiale des dates phénologiques

Dans le cadre de cette étude nous avons produit des simulations des dates d'apparition des stades phénologique pour chaque maille. Dans ce contexte, et sachant que nous travaillons sur plus de 6000 mailles, nous avons voulu vérifier s'il était possible de déterminer des

secteurs géographiques homogènes du point de vue climatique à partir des dates d'apparitions des stades.

Pour cela, nous avons appliqué une méthode de partitionnement des données, les k-means. Cette méthode peut être appliquée aux séries temporelles et nous permet de classer le jeu de données en k classes disjointes.

Dans un premier temps il nous faut fixer le nombre de groupes k que l'on souhaite étudier. Ce choix peut être décidé à partir d'un *a priori* antérieur ou à partir d'une classification ascendante hiérarchique (CAH). La CAH va, dans notre cas, produire un arbre qui va mettre en évidence les liens hiérarchiques entre nos mailles. Elle va donc détecter un nombre de classes *naturel* au sens de la population étudiée.

Pour effectuer une CAH, il faut tout d'abord créer une matrice de distances nécessaire à l'identification des liens hiérarchiques. Nous avons utilisé la distance euclidienne pour construire la matrice. Ce choix se justifie par le fait que nous voulions regrouper les mailles les plus proches selon les dates d'apparition des différents stades. Ensuite afin de déterminer le nombre optimal de groupes que nous pouvons retenir nous avons utilisé l'indice de *Ward.D2* ou indice de l'accroissement de l'inertie. Cet indice permet de regrouper les classes d'effectif faible et dont les centres de gravités sont proches, de façon que l'inertie interclasse soit maximum. À partir de la représentation des sauts d'inertie du dendrogramme obtenu par la CAH, il suffit de regarder quelle est la perte d'inertie relative entre deux choix de classes maximale.

Dans un deuxième temps, nous appliquons la méthode des k-means sur nos données en renseignant le nombre de groupes k que nous avons retenus. Cette méthode va classer automatiquement nos mailles selon la variable que nous voulons (dans notre cas la date du stade phénologique).

4. Significativité et tendances des résultats

Afin d'évaluer une possible tendance dans nos données, nous allons utiliser le modèle de régression linéaire suivi d'une analyse des résidus.

Le modèle général s'écrit : $y = ax + b + \varepsilon$.

Ce modèle permettra en outre de déterminer s'il existe une véritable tendance à la hausse ou à la baisse de l'évolution de chaque variable étudiée.

5. Corrélation

Afin de vérifier de potentielles corrélations entre nos indicateurs et nos données de rendements nous avons calculé le test de corrélation de Pearson. Ce test sous-entend que les échantillons suivent une distribution normale. Si les échantillons ne suivent pas une loi normale, nous utiliserons le test de corrélation de Kendall.

L'utilisation de toutes ces méthodes et l'analyse des résultats obtenus à partir de ces tests, vont nous permettre d'identifier des changements et des évolutions des rendements du blé à l'échelle nationale et leur lien avec les évolutions et tendances des variables climatiques dans la même période et sur différentes régions.

III. Résultats et discussions

A. Analyse de la phénologie

La phénologie est un indicateur clé du changement climatique. Le processus de croissance des plantes étant dépendant de la température, l'évolution des dates d'apparition des stades peut être expliqué par les changements climatiques et plus précisément par la hausse des températures (Cleland et al., 2007).

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à l'évolution de la phénologie dans le temps à l'échelle de la France, puis nous caractériserons spatialement des zonages climatiques en fonction de la précocité d'apparition des différents stades.

Les dates qui suivent sont indiquées en jours julien (le jour 1 correspondant au 1^{er} janvier, le jour 200 correspondant au 19 juillet, en ANNEXE II, le calendrier des jours juliens d'une année non bissextile de 365 jours).

1. Un avancement des dates phénologiques

La Figure 5 représente l'évolution des dates d'apparition des différents stades phénologiques. Disposant de ses renseignements pour chacune des mailles, nous avons décidé dans un premier temps de ramener l'ensemble des valeurs à une valeur médiane annuelle. Cela permet d'avoir une vue d'ensemble à l'échelle de la France.

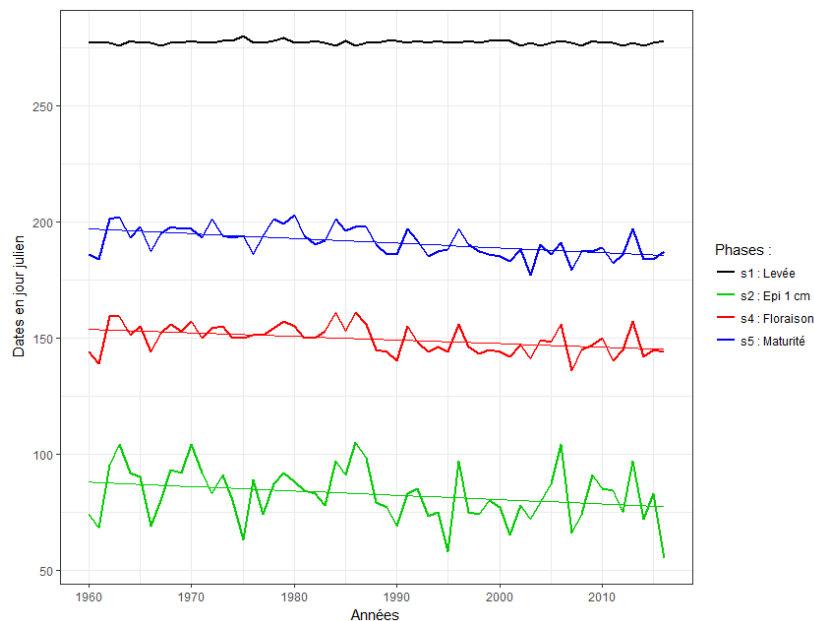


Figure 5 : Evolution des dates des stades phénologiques.

Après analyse de la tendance, nous pouvons voir qu'il y a une tendance significative à l'avancement des dates des stades S2 épi à 1 cm (pvalue = 0.04), S4 floraison (pvalue = 0.001) et S5 maturité (pvalue = 0). En moyenne, les trois stades phénologiques avancent de 1.5 à 2 jours tous les dix ans. Ce qui signifie un avancement moyen, sur la période de 1960 à 2016, de 10 jours pour le stade épi à 1 cm, de 8 jours pour le stade floraison et enfin de 11 jours pour le stade maturité. Il s'agit d'une estimation globale à l'échelle de la France qui masque les disparités en fonction des particularités climatiques régionales.

Cet avancement est en liaison direct avec le réchauffement climatique déjà constaté. Il n'y a que la hausse des températures qui peut entraîner un raccourcissement notable de la durée des phases, la plante reçoit aujourd'hui des apports thermiques journaliers plus importants qui accélèrent le processus de développement phénologique (Menzel et al., 2006).

Afin de certifier cette hypothèse, regardons l'évolution des durées des phases.

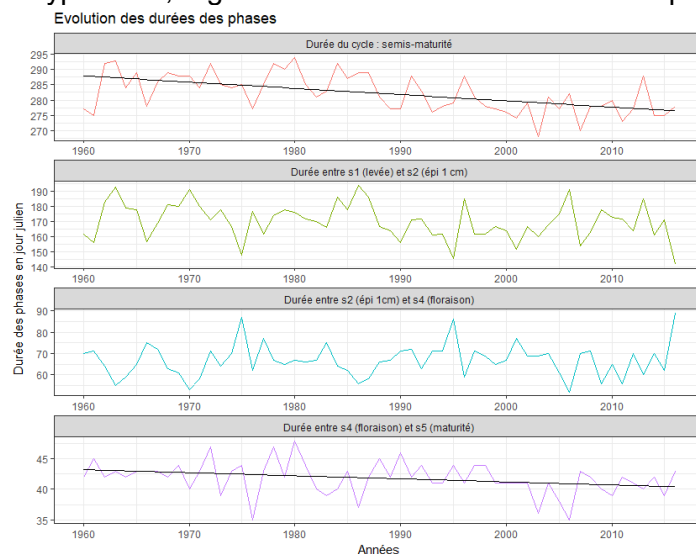


Figure 6 : Evolution des durées des phases phénologiques.

L'analyse des durées des phases (Figure 6) nous indique qu'il existe bien une tendance à la baisse pour la durée du cycle (S0S5 : semis à maturité) et pour la phase de formation et maturité du grain (S4S5). Le cycle complet de la culture dure en moyenne 10 jours de moins qu'il y a 56 ans.

Outre le fait qu'il existe une tendance à l'avancement des stades, nous pouvons voir qu'il existe également pour le stade S2 épi à 1 cm une plus forte variabilité (Figure 5), tant sur le plan de l'apparition de ce stade que sur la durée de la phase S1S2. Pour rappel, la phase S1S2 est la phase de tallage, cette phase ayant lieu principalement en hiver. C'est lors de cette phase que la plante rentre dans un processus de vernalisation, il lui faut une période de température relativement faible (entre 3°C et 10°C en moyenne) pour développer ces feuilles de talles pour *in fine*, à la fin de cette période, pouvoir épier. Cette variabilité de la réponse phénologique est directement la conséquence de la variabilité interannuelle existante dans l'intensité et la durée des séquences de température froide nécessaires à la vernalisation.

Concernant les stades S0 semis, S1 levée et la phase S0S1 on ne montre aucune tendance. Ce qui est tout à fait normale puisque la date de semis est fixée au 1^{er} octobre et la levée se produit généralement 2 à 3 jours après le semis.

2. Un zonage climatique

Par la suite, nous avons caractérisé l'évolution médiane des dates d'apparition des stades phénologiques à l'échelle de la France afin d'obtenir une représentation synthétique des conditions phénologiques et d'identifier des zonages homogènes climatiques d'apparition des stades.

Bien que nous travaillions sur cinq stades phénologiques nous avons décidé de seulement nous intéresser aux trois derniers stades (S2, S4 et S5). En effet, la date de semis est fixée au 1^{er} octobre et la date de levée se situant en général 2 à 3 jours après la date de semis, il n'est pas pertinent d'étudier l'évolution de ces deux stades.

L'application d'une CAH (décrit page 11) sur le premier stade étudié (S2 épi à 1 cm) a permis d'identifier un nombre de classe idéal de 4 (voir ANNEXE III). Pour la suite de l'étude de la spatialisation sur les autres stades, nous avons décidé de rester sur un a priori de 4 classes. Ce choix se justifie par la volonté d'étudier les potentiels déplacements des 4 secteurs étudiés en premier lieu sur le stade S2 épi à 1 cm.

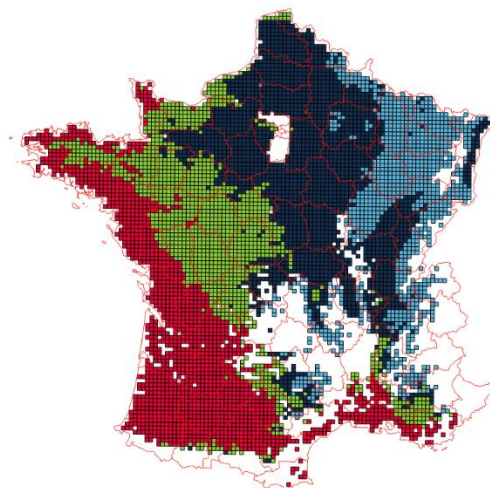
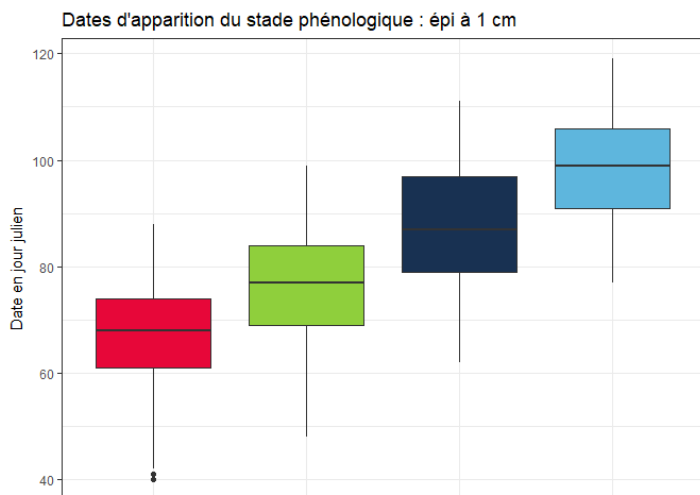


Figure 7 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S2 : épi à 1 cm.

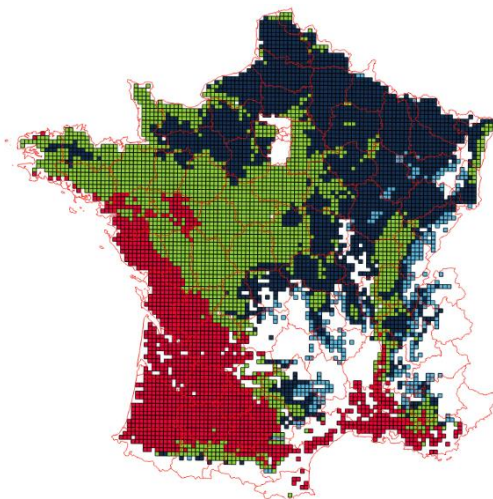
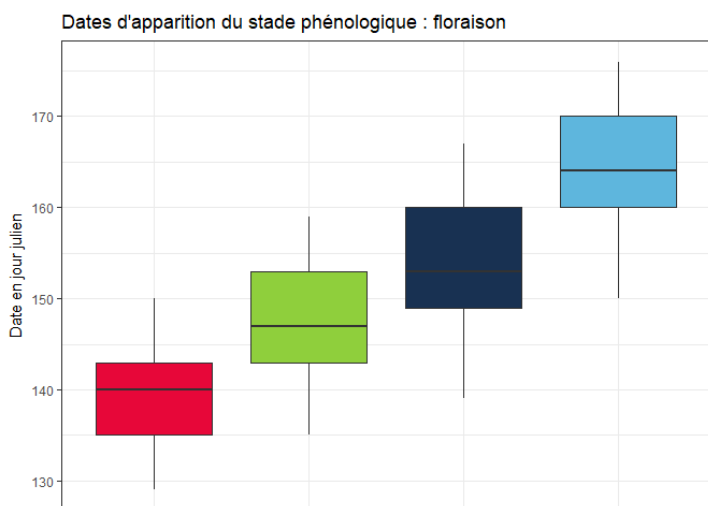


Figure 8 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S4 : floraison.

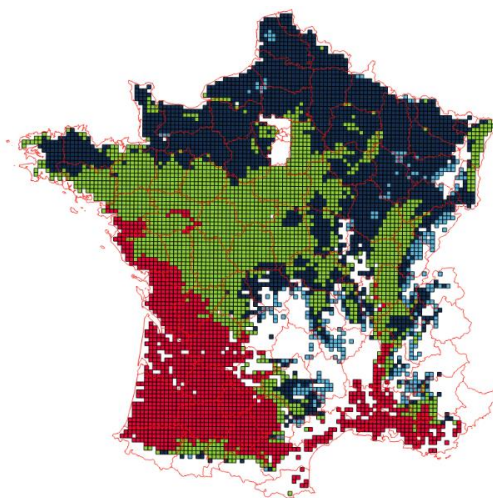
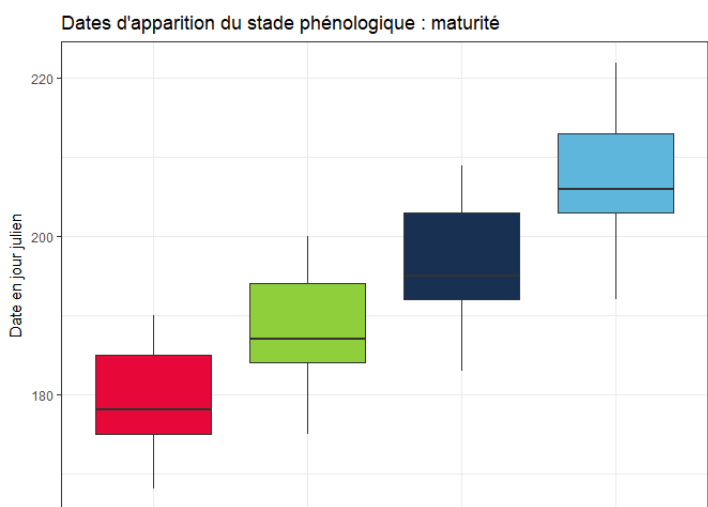


Figure 9 : Répartition et cartographie des dates d'apparition du stade S5 : maturité.

Partitionner les mailles permet, dans notre cas d'étude, de différencier le degré de précocité des stades. Couplé à une cartographie, cela permet de mettre en évidence des zones homogènes de précocité.

Pour le stade S2 épi à 1 cm (Figure 7), nous mettons en évidence un zonage de précocité climatique homogène à dominante longitudinal dans la moitié Nord de la France. Dans la moitié Sud de la France nous décelons une prédominance d'une forte précocité (Grand Sud-Ouest et zone méditerranéenne) à l'exception des mailles situées dans des zones de reliefs (proche du Massif Central et des Alpes).

Pour les autres stades (S4 floraison Figure 8 et S5 maturité Figure 9), les zonages climatiques basculent progressivement vers un zonage plus latitudinal de type Sud Nord. De plus nous pouvons voir l'apparition d'un groupe de mailles, non homogène géographiquement, mais ayant pour caractéristique d'être situé principalement sur des zones à fort relief et proche des montagnes.

Comme évoqué précédemment (paragraphe III.A.1 page 13), l'avancement significatif des dates d'apparition des stades S2, S4 et S5 sont à l'échelle nationale. Le même travail a été réalisé sur les différents secteurs de précocité décrit précédemment. Il en ressort que pour le stade S2 épi à 1 cm, il n'y a que pour les secteurs les plus tardifs (représentés en bleu foncé et bleu clair) qu'il existe un avancement significatif à hauteur de 2 jours tous les dix ans, soit depuis 1960 un avancement moyen d'une dizaine de jours. En ce qui concerne la phase S4 floraison, les quatre secteurs enregistrent un avancement significatif de la date d'apparition du stade, avec en moyenne depuis 1960 un avancement allant de 6.5 jours pour les stades les plus précoces (les secteurs en rouge et vert) à 9 jours pour les stades les moins précoces (les secteurs en bleu clair et bleu foncé). Enfin, pour ce qui est du stade S5 maturité, nous retrouvons également un avancement significatif de la date d'apparition du stade avec les mêmes disparités que pour le stade S4. Les secteurs les plus précoces ont connu un avancement moyen de 11 à 12 jours contre un avancement de 9 jours pour les secteurs les moins précoces.

B. Analyse des rendements

Comme évoqué précédemment (paragraphe I.B page 1), une forte croissance suivie d'un plafonnement des rendements médians français est observable. L'idée de cette partie est de déterminer l'année de rupture pour laquelle le changement est véritablement significatif à l'échelle nationale, d'appliquer cette méthode de détection de rupture à l'ensemble des départements et enfin d'identifier particulièrement des années exceptionnelles.

1. Une rupture tendancielle à l'échelle nationale de la France

Comme nous avons pu l'évoquer précédemment, les rendements médians du blé tendre d'hiver français ont la particularité de connaître une forte croissance au cours de 20^{ème} avant d'atteindre un plafonnement hautement variable dès le début des années 2000. L'application du test de Chow a permis de déceler une rupture temporelle en l'année 2000 (Figure 10).

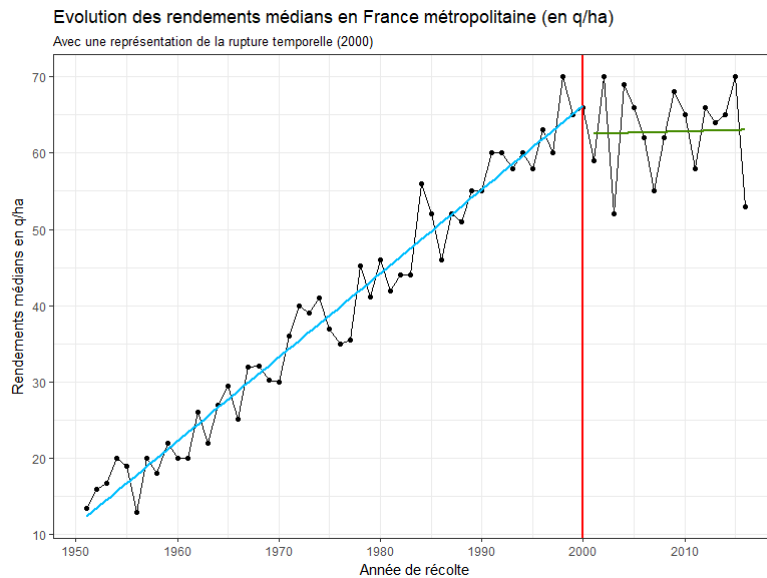


Figure 10 : Evolution des rendements médians du blé français et représentation de la rupture temporelle.

Cette rupture marque clairement la fin d'une forte croissance des rendements (+ 1 quintal par hectare et par an en moyenne) et le début d'un plafonnement couplé à une forte variabilité des rendements. En effet, pour certaines années, la perte de rendement (raisonné à la médiane française) peut aller jusqu'à une diminution de 17 quintaux par hectare. Une aussi grande variabilité ne s'était jamais vue auparavant.

La distribution des résidus issus des deux régressions linéaires réalisées sur les deux sous-parties (Figure 10 et Figure 11) nous confirme bien la forte variabilité des rendements beaucoup plus présente dans la deuxième série que dans la première.

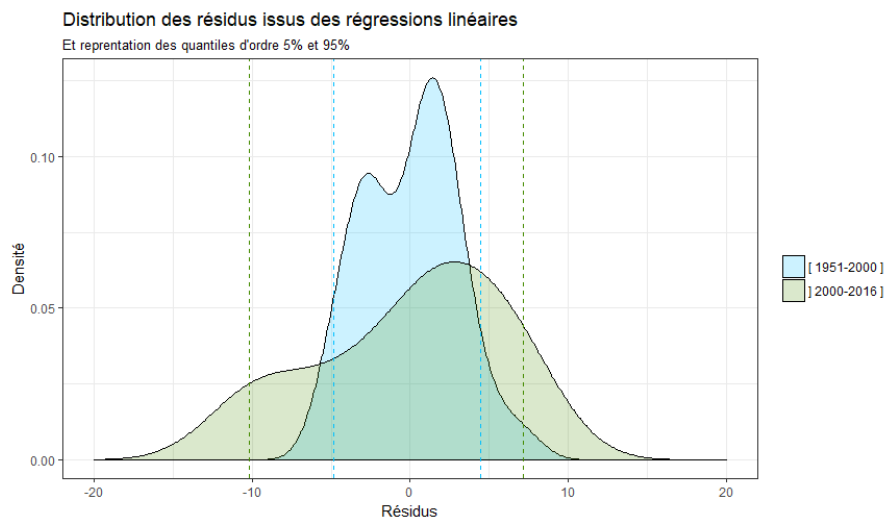


Figure 11 : Distribution des résidus issues de deux régressions linéaires.

2. Détection d'années extrêmes à l'échelle nationale

Une forte variabilité des rendements entraîne nécessairement des années où le rendement peut sembler satisfaisant et des années où le rendement peut être considéré comme catastrophique.

Dans le cadre statistique, une année sera considérée comme extrême, lorsque le résidu associé à cette même année sera supérieur aux quantiles d'ordre 5% et 95% (quantiles fixés

arbitrairement). En d'autres termes nous cherchons à identifier les années pour lesquelles la prédiction effectuée via le modèle linéaire est éloignée de la valeur réelle.

À partir de cette définition statistique, les résultats obtenus nous donnerons deux types d'années extrêmes. Les années extrêmes positives, c'est-à-dire les années où le rendement est largement supérieur à la tendance prédite par le modèle. Et les années extrêmes négatives, les années pour lesquelles le rendement se trouve largement inférieur aux prédictions du modèle.

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux années extrêmes dites négatives. En effet, nous faisons l'hypothèse que de faibles rendements soit le résultat d'un dérèglement climatique. Par dérèglement climatique, nous entendons le fait qu'il est apparu lors du cycle de la culture du blé (S0 semis à S5 maturité) des événements météorologiques pénalisants le rendement obtenu.

Notre série de données a donc été divisée en deux parties selon l'année de rupture, l'an 2000. Nous avons appliqué la méthode des quantiles aux deux sous séries [1960-2000] et [2000-2016].

Cette méthode va bien détecter les années considérées extrêmes pour la première série avant l'année 2000. Mais pour la deuxième série, nous sommes en présence d'une série plus courte et avec énormément de variabilité et donc une distribution plus étalée (Figure 11). Nous avons donc décidé de modifier et d'être plus flexible sur le choix des quantiles pour la deuxième série. Choisir des quantiles d'ordre 20% et 80% permet de détecter l'ensemble des pics positifs et négatifs de notre série.

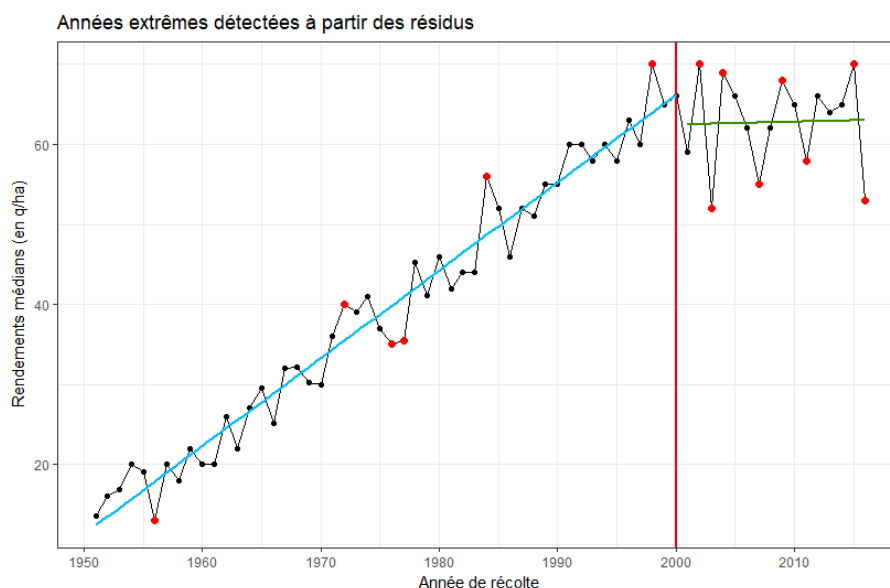


Figure 12 : Représentation des années extrêmes.

Nous obtenons donc sept années pour lesquelles les rendements ont été largement inférieur à la moyenne :

- Avant la rupture de l'an 2000 : 1956, 1976, 1977,
- Après la rupture de l'an 2000 : 2003, 2007, 2011 et 2016.

L'état des lieux des événements climatiques survenus au cours du cycle cultural des années extrêmes nous conforte dans l'idée que la diminution des rendements au cours d'une année peut être fortement liée à la non optimalité du climat (Tableau 2 page 20). Pour les années identifiées après la rupture en 2000, le Tableau 2 a été construit sur la base de la lecture des

bilans climatiques annuels fournis par Météo-France. Pour les années identifiées avant la rupture, l'analyse est moins complète faute de document disponible.

3. Une rupture tendancielle à l'échelle des départements

Dans un premier temps nous avons conclu à une rupture temporelle en l'année 2000 pour les rendements médians à l'échelle de la France. Si nous nous intéressons plus particulièrement aux rendements par département, nous nous apercevons que pour la majorité des départements, l'allure croissante suivie d'une stagnation des rendements est toujours présente dans une très grande majorité des départements mais que pour certains d'entre eux, la stagnation des rendements n'est pas forcément évidente.

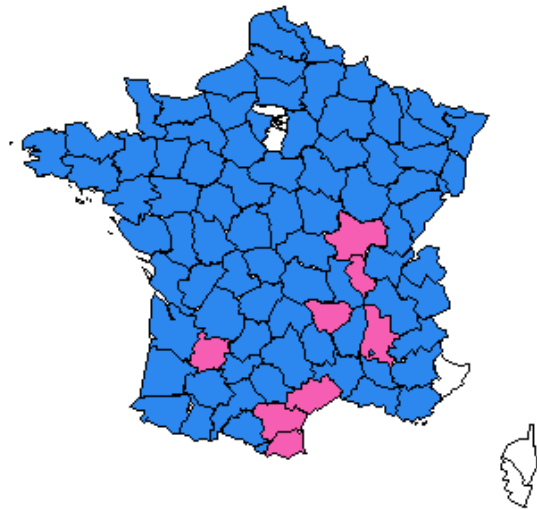
L'application du test de Chow permet d'avoir une idée, par département, d'une potentielle rupture temporelle. Il en résulte que les départements de la Drôme et de l'Aude n'ont pas de rupture temporelle significative dans l'évolution de leur rendement. Pour l'ensemble des autres départements, les ruptures ont été détectées entre 1985 et 2005.

Nous avons voulu évaluer la pertinence des ruptures détectées. Pour répondre à cette question, nous avons décidé de comparer l'écart quadratique moyen (EQM) entre une régression contrainte et une régression non contrainte. Cette comparaison a pour but de confirmer ou d'infirmer la réelle présence d'une rupture temporelle significative et de vérifier quel est le plus pertinent entre une régression contrainte et une régression non contrainte (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ; page **Erreur ! Signet non défini.**).

Nous nous retrouvons avec six départements pour lesquels, malgré la détection d'une rupture temporelle, le choix de ne pas la conserver est plus intéressant :

- l'Hérault,
- la Haute-Loire,
- le Lot-et-Garonne,
- les Pyrénées-Orientales,
- le Rhône,
- la Saône-et-Loire.

En ajoutant la Drôme et l'Aude pour qui aucune rupture significative n'a été détectée.



La cartographie de ses résultats ne dégage pas de réel secteur géographique mais plutôt de petites zones regroupant des départements pour lesquels la production de blé, en système de grande culture, ne constitue pas une activité agricole dominante.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des évènements météorologiques connus pour les années extrêmes détectées.

Année	Automne	Hiver	Printemps	Été
1955-1956		Vague de froid longue et intense (27 jours) sur toute la France		
1975-1976	Automne normal en température plutôt humide	Déficit pluviométrique	Déficit pluviométrique persistant et fin de printemps inhabituellement chaud. Deuxième printemps le plus sec du XX ^e siècle après celui de 1959	Canicule et sécheresse historique
1976-1977				Été frais et humide. Température maximale en deçà de 30 °C
2002-2003		L'hiver 2002-2003 est dans la normale. Après l'hiver 2001-2002, il renoue tout de même avec des hivers aux périodes froides marquées	Le printemps 2003 s'avère être l'un des printemps les plus chauds, les plus sec et les plus ensoleillés depuis bien des décennies.	L'été 2003 restera dans les annales : car, depuis le début des relevés en France, jamais un été ne s'était avéré aussi chaud, soit depuis 1757.
2006-2007	Les températures moyennes mensuelles ont été partout supérieures à la normale. Saison se situant globalement la plus chaude depuis 1950.	Hiver exceptionnellement chaud, se situant au second rang des hivers les plus chauds observés depuis 1900.	Printemps exceptionnellement chaud, se situant au premier rang des printemps les plus chauds observés depuis 1900.	La saison a été particulièrement maussade sur la quasi-totalité du territoire, même si les températures moyennes saisonnières ont été généralement proches de la normale.
2010-2011	La température moyenne sur l'ensemble de l'automne est proche de la normale. La pluviométrie de l'automne a été contrastée selon les régions	Décembre exceptionnellement froid et neigeux. L'hiver s'est révélé plutôt frais, avec une pluviométrie sensiblement déficitaire et un ensoleillement variable.	Printemps exceptionnellement chaud, sec et ensoleillé. Printemps exceptionnel par ses faibles précipitations. Il est le plus sec des cinquante dernières années.	Température estivale conforme à la normale saisonnière. Les pluies ont été fréquentes durant l'été. La quantité d'eau recueillie sur l'ensemble du pays est supérieure de presque 30 % à la normale.
2015-2016	L'automne a été marqué par des mois de septembre et octobre plutôt frais. En revanche, novembre a été particulièrement doux sur la totalité du pays. Les précipitations, peu fréquentes, ont été généralement peu abondantes	Le plus chaud depuis 1900. La France n'a pas connu de vague de froid ni de véritables conditions hivernales.	Un passage fortement pluvieux avec des cumuls exceptionnels de pluie dans le Centre, l'Île-de-France, la Picardie et la Bourgogne, provoquant crues et inondations. Ensoleillement globalement faible	Un début d'été très pluvieux accompagné de nombreuses inondations. Une très faible pluviométrie en juillet-août et un assèchement marqué des sols superficiels.

Rendements bruts (en q/ha) par départements depuis 1951

Représentation des ruptures temporelles selon le critère de l'EQM

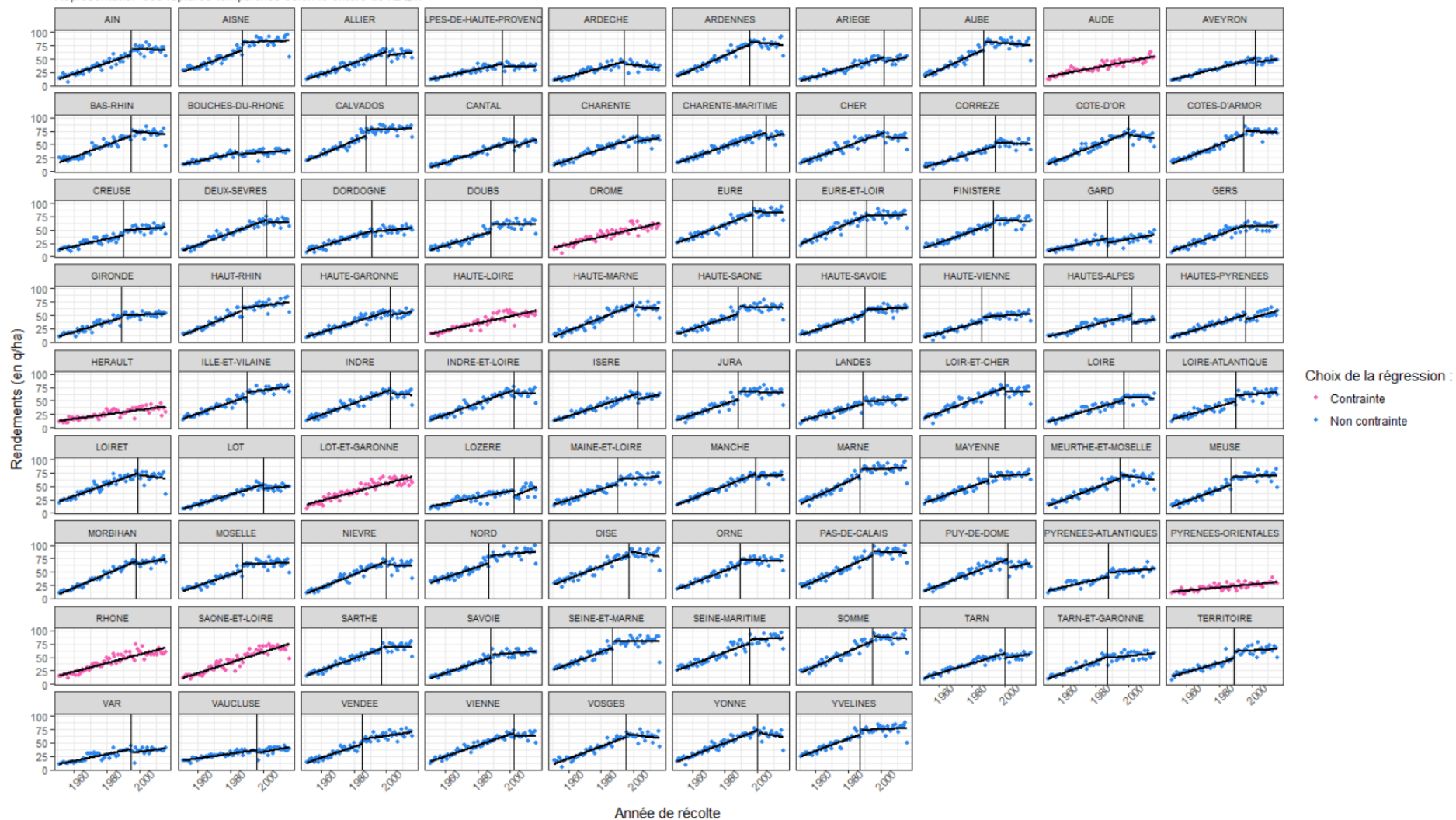


Figure 13 : Détection d'une rupture temporelle par département.

En ce qui concerne les départements pour lesquels nous gardons la rupture temporelle, contrairement à ce que nous aurions pu imaginer, la détection de rupture ne se fait pas principalement autour de l'année 2000 mais sur toute une plage d'année allant de 1985 à 2005 (Figure 14).

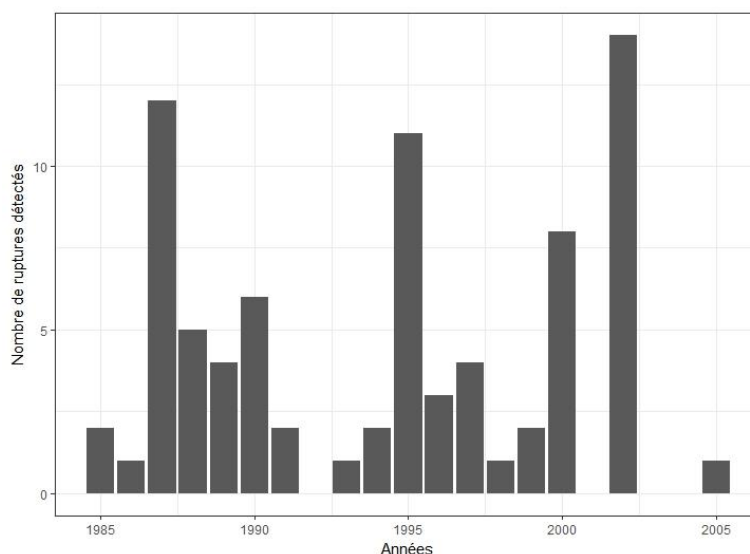


Figure 14 : Histogramme du nombre de ruptures détectées par années.

L'année d'apparition de plafonnement des rendements, même si elle est indéniablement caractérisée au niveau national en l'année 2000, doit donc être relativisée en fonction de contextes plus locaux.

C. Analyse des indicateurs climatiques

Du fait du grand nombre de données que nous avons en notre possession, nous avons pris le parti d'analyser les indicateurs à l'échelle de la France.

Nous avons décidé de calculer la médiane des valeurs des indicateurs par années sur l'ensemble des mailles sélectionnées sur toute la France (Figure 4). La culture du blé se faisant sur deux années calendaires, l'année de référence choisie de l'indicateur est l'année de la récolte.

Dans la suite de l'analyse nous avons différencié les indicateurs en deux catégories (Tableau 3) :

- Les indicateurs de type « continu » qui prennent des valeurs numériques indénombrables,
- Les indicateurs de type « discret » qui prennent des valeurs de comptages, dénombrables

Tableau 3 : Liste des indicateurs continus et discrets.

Continu		Discret	
Nom	Description	Nom	Description
Meant	Température moyenne journalière	Cdaysdmin	Nombre de jours de faible température
Rainsum	Somme des précipitations	Cdaystmean	Nombre de jours de très faible température
Sumsorad	Somme du rayonnement global	Excraidays	Nombre de jours de forte pluie
avsorad	Rayonnement global journalier	Raidays	Nombre de jours de pluie
		Hsdays	Nombre de jours de forte chaleur
		Numbdroughtwav	Nombre de vague de sécheresse
		Vcdaystmin	Nombre de jours de très faible température
		Hdaystmean	Nombre de jours de chaleur

L'objectif de cette partie est de faire un premier tri, à l'échelle nationale, des indicateurs pour lesquels nous pouvons observer des changements significatifs sur la période d'étude, en fonction de son évolution ou de sa relation avec le rendement.

1. Evolution temporelle à l'échelle annuelle

Une première approche consiste à évaluer la tendance temporelle générale de nos indicateurs. Pour ce faire, nous avons décidé d'agrégier les données en calculant la médiane de chaque indicateur par année. Cette approche a pour but d'identifier des tendances nationales par phases pour les deux familles d'indicateurs différenciés par la couleur du trait. La Figure 15 synthétise les résultats obtenus.



Figure 15 : Evolution de la médiane des indicateurs par année.

Après avoir réalisé une régression en fonction du temps, il en ressort que les indicateurs suivants ont une tendance significative ($pvalue < 0.05$) :

Tableau 4 : Récapitulatif des indicateurs significatifs (tendance générale).

INDICATEUR	PVALUE	PENTE
s1s2_meant	0.000	0.024
s1s2_raidadays	0.001	0.327
s2s4_hsdays	0.015	0.027
s2s4_sumsorad	0.010	1698.650
s4s5_meant	0.012	0.021

Ces résultats nous informent que se sont principalement sur les indicateurs ayant un lien avec la température, le rayonnement et la pluie que nous obtenons des changements significatifs. De plus le type d'indicateur joue également un rôle dans la détection d'un signal temporel.

Les indicateurs continus sont parlants en termes de signal de température notamment pour :

- La phase S1S2-tallage du fait de l'accroissement significatif des températures journalières sur la phase (à raison d'une hausse moyenne de 1.3°C en 56 ans).
- La phase S2S4-montaison voit une hausse de l'ensoleillement, hausse qui n'est pas contraignante mais plutôt favorable du point de vue de la photosynthèse.
- Enfin la phase S4S5-formation et maturité du grain avec l'indicateur *meant* (température moyenne journalière sur la phase) ressort significatif de l'analyse, ce qui en soit n'est pas un bon signal vis-à-vis du processus de remplissage du grain.

Les indicateurs discrets nous apportent les informations suivantes :

- s1s2_raidadays (nombre de jours de pluie lors de la phase de tallage) dont on perçoit une augmentation du nombre de jours plutôt après la rupture de l'année 2000.
- s2s4_hsdays (nombre de jours de fortes chaleurs TMAX > 25°C lors de la phase de montaison), l'augmentation du nombre de jours même si elle est minime (1 jour de plus en 56 ans) n'est pas de bon présage. Les fortes chaleurs en période de montaison peuvent avoir un impact sur le remplissage du grain et entraîner un phénomène d'échaudage qui peuvent impacter les rendements et la qualité du blé.

Pour la grande majorité des indicateurs (hormis quatre indicateurs), nous ne détectons pas de rupture autant significative sur les indicateurs (via le test de Chow) que sur les rendements (voir ANNEXE IV).

2. Evolution temporelle à l'échelle décennale

L'analyse des résultats à l'échelle annuelle montre qu'une forte variabilité interannuelle existe, ce qui peut masquer un effet tendanciel. Les années se suivent mais ne se ressemblent pas. Afin de supprimer en partie cette variabilité interannuelle, nous avons décidé de regrouper l'ensemble de nos valeurs par décennies.

Le choix des décennies est arbitraire :

- la décennie 1965 : [1960-1969]
- la décennie 1975 : [1970-1979]
- la décennie 1985 : [1980-1989]
- la décennie 1995 : [1990-1999]
- la décennie 2005 : [2000-2009]
- la décennie 2015 : [2010-2016], cette décennie n'étant pas complète.

Les calculs réalisés pour cette dernière décennie sont différents selon le type d'indicateur (Tableau 3).

	Pour les cinq premières décennies [1960-2009]	Pour la dernière décennie [2010-2019]
Indicateurs continus	Calcul de la médiane des indicateurs sur l'ensemble des années de la décennie.	Calcul de la médiane des indicateurs sur les 7 premières années puis recalcul de la médiane sur l'ensemble de la décennie en y ayant rajouté 3 fois la médiane pour combler les années manquantes.
Indicateurs discrets	Calcul de la médiane des indicateurs par années puis somme de l'ensemble des valeurs par décennies.	Calcul de la médiane des indicateurs sur les 7 premières années, puis on considère que pour les 3 années manquantes la valeur médiane sera celle de la médiane calculée auparavant. Puis somme des 10 années.

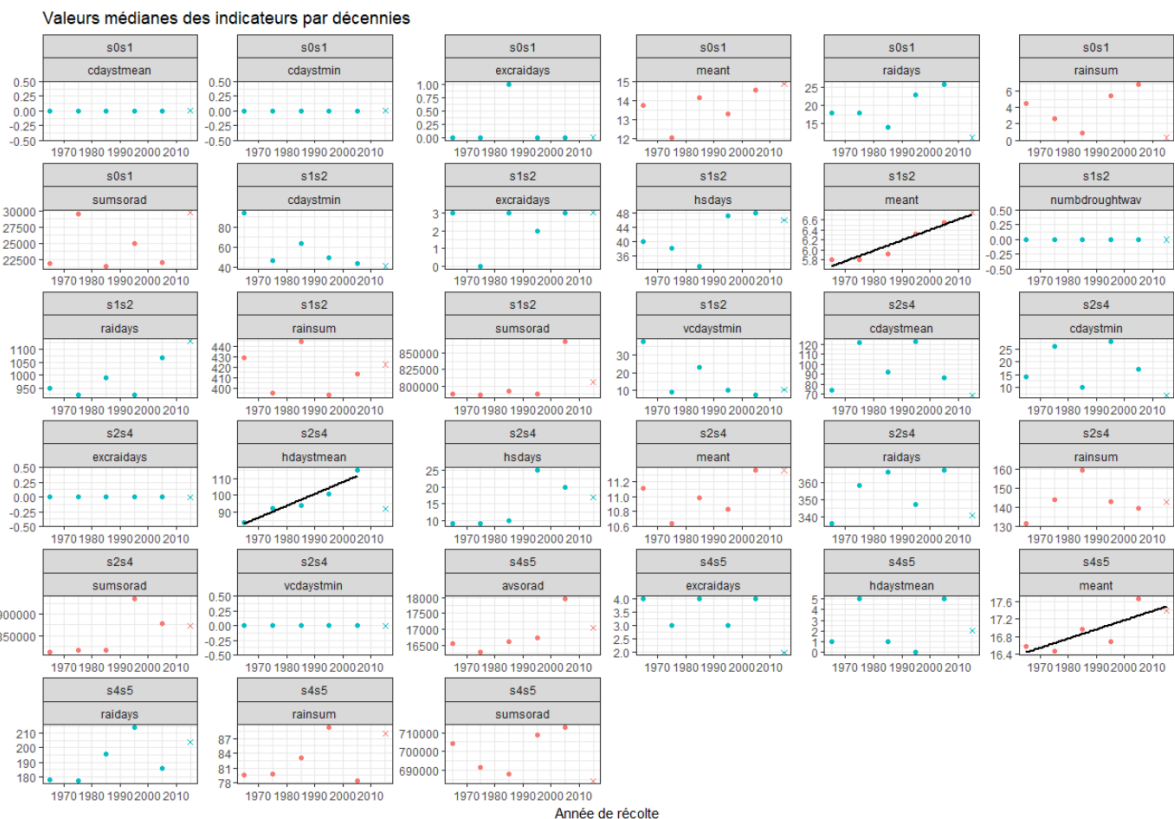


Figure 16 : Représentation des indicateurs par décennies

L'évolution de la tendance a été évaluée selon deux configurations. Tout d'abord nous avons regardé l'évolution sur les cinq premières décennies, puis ensuite en incluant la dernière décennie. Ce choix s'explique par le fait que la valeur des indicateurs pour la dernière décennie n'est pas une valeur médiane réelle mais valeur médiane estimée. La forte variabilité interannuelle de ces dernières années ne peut ni confirmer ni infirmer notre calcul.

Différents indicateurs sortent significatifs de notre étude ($pvalue < 0.05$) :

Tableau 5 : Récapitulatif des indicateurs significatifs au pas de temps de la décennie.

INDICATEUR	[1960-2009]		[1960-2020]	
	PVALUE	PENTE	PVALUE	PENTE
s1s2_meant	0.017	0.019	0.001	0.02
s2s4_hdaystmean	0.008	0.71		
s4s5_meant			0.043	0.02

À l'échelle de la décennie, seuls les indicateurs impliquant la température de l'air sont détectés. Cela doit être interprété comme le fait que le signal le plus marquant de l'évolution temporelle du climat à l'échelle décennale serait pour l'instant la température, à la fois en température moyenne (*meant*) des phases S1S2-tallage et S4S5-maturité, indicateurs déjà détectés à l'échelle annuelle (Tableau 4), mais aussi en nombres de très forte chaleur (TMAX > 25°C) (*hdaystmean*) pour la phase S2S4 montaison.

3. Comparaison d'échantillon

Une des hypothèses de départ émise lors de la détection de la rupture temporelle dans l'évolution des rendements médians, est que le plafonnement des rendements pourrait en partie être expliqué par des changements climatiques significatifs dans les phases clés de l'évolution du blé. À partir de cette idée, nous avons décidé d'analyser conjointement les indicateurs de type continu par rapport aux deux distributions des sous séries [1960-2000] et [2001-2016], afin d'identifier les indicateurs pour lesquels il existait une réelle différence dans la distribution liée à la rupture de l'an 2000 (Figure 17).

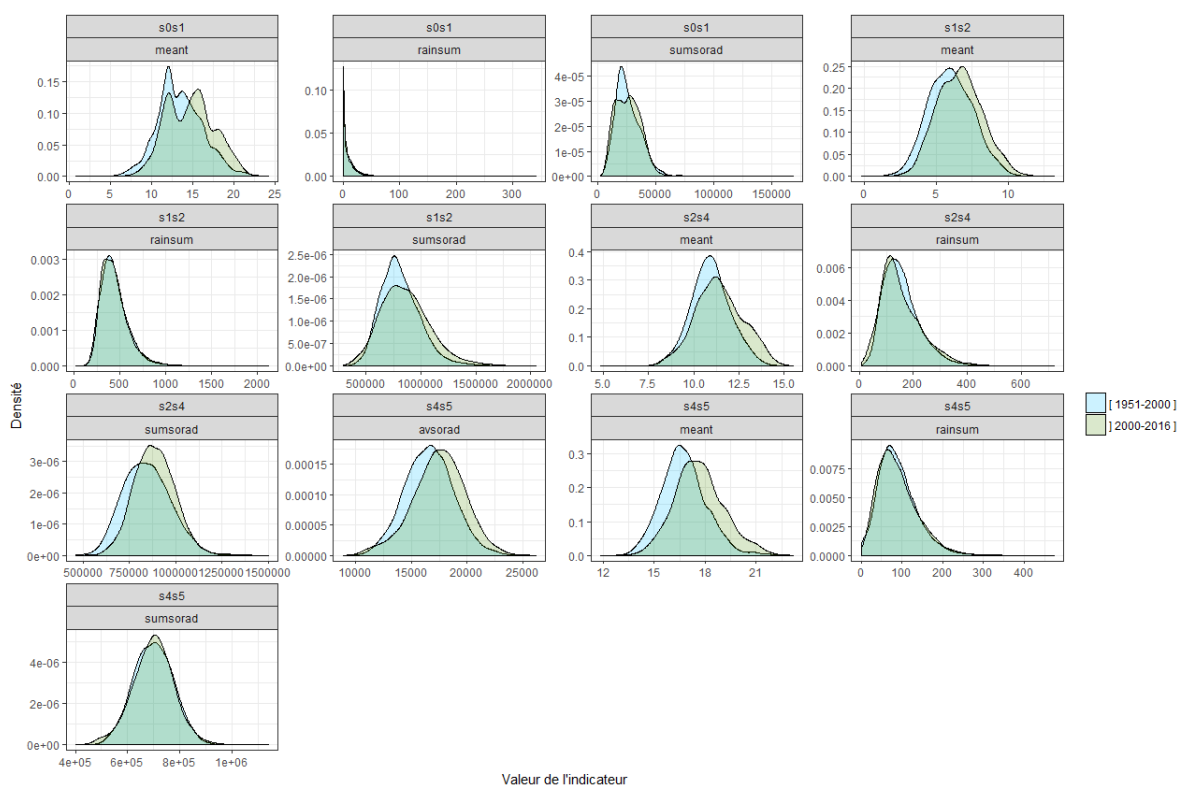


Figure 17 : Distribution des indicateurs continus deux sous-séries.

À première vue, certains indicateurs ont bien des distributions différentes. Afin de confirmer nos hypothèses, plusieurs tests de comparaison ont été mis en place.

Tableau 6 : Récapitulatif des indicateurs significatifs au test de Kolmogorov Smirnov et Wilcoxon.

INDICATEUR	PVALUE KS	PVALUE WILCOXON
s1s2_meant	0.04	Tableau 60
s2s4_sumsorad	0.01	0.05
s4s5_avsorad	0.05	0.02
s4s5_meant	0	0

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à comparer les distributions via le test de Kolmogorov-Smirnov. Les distributions, différenciées par rapport à l'année de rupture nationale, de ses indicateurs ci-dessus (Tableau 6) sont donc significativement différentes, le test non paramétrique de Wilcoxon nous confirme également que les moyennes sont également significativement différentes.

Il faisait en moyenne 5.8°C sur toute la période de tallage (S1S2) entre 1960 et 2000, et depuis les années 2000 il fait en moyenne 6.6°C. De même pour la période de formation du grain (S4S5) il fait en moyenne 1°C de plus depuis les années 2000 qu'en deuxième partie du 20^{ème} siècle. La hausse du rayonnement global est un fait avéré, il fait plus beau de nos jours qu'auparavant.

4. Evaluation de la corrélation entre les indicateurs et le rendement

Afin d'évaluer l'impact d'un indicateur écoclimatique sur les rendements médians nationaux, nous avons voulu évaluer le degré de corrélation entre l'indicateur et les rendements. Appliquer le test de corrélation a pour but de déceler les indicateurs pour qui les rendements sont fortement liés.

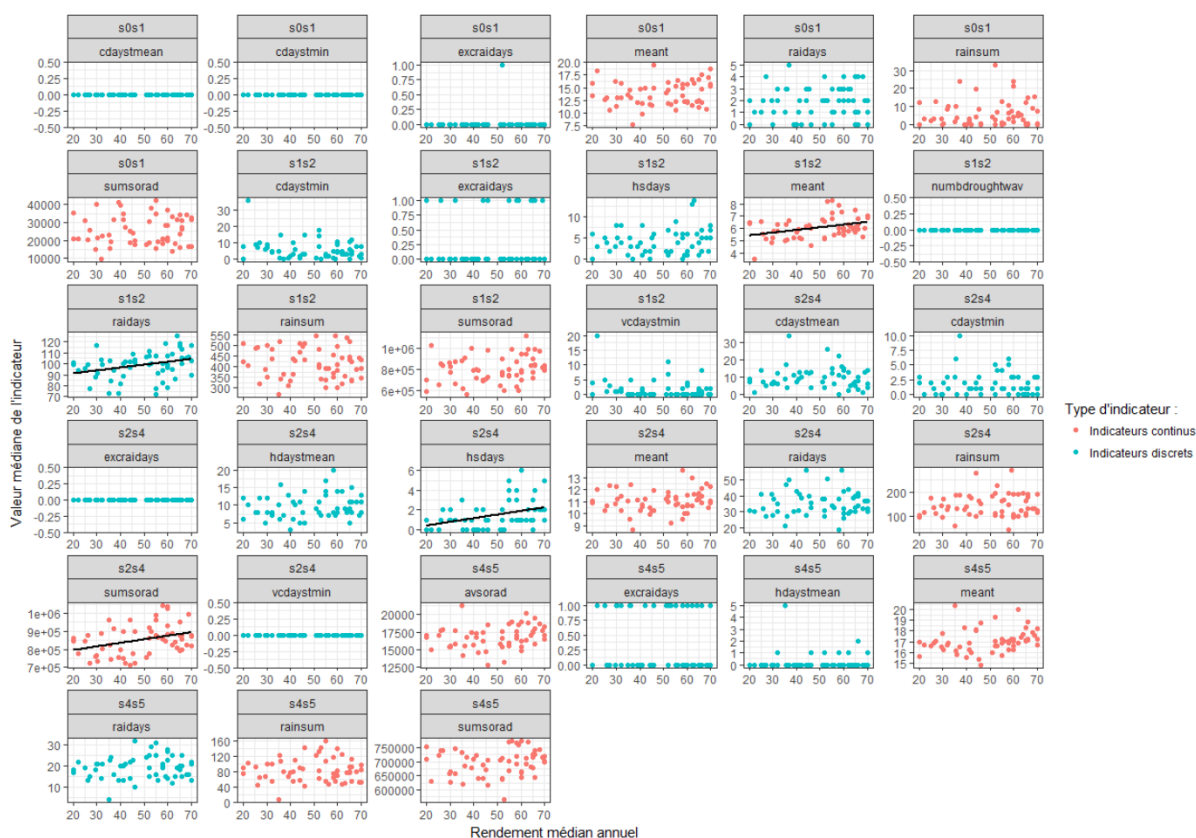


Figure 18 : Corrélation entre les indicateurs et les rendements

Le tableau suivant recense les indicateurs significatifs au test de corrélation.

Tableau 7 : Indicateurs significatifs au test de corrélation.

INDICATEUR	PVALUE	CORRELATION
s1s2_meant	0.004	0.369
s1s2_raidays	0.017	0.312
s2s4_hsdays	0.002	0.386
s2s4_sumsorad	0.007	0.351

Le but de ce test n'est pas de détecter les indicateurs qui expliquent les rendements mais plutôt les indicateurs qui ont un lien direct avec les rendements. Un mauvais exemple d'interprétation serait de dire que pour la phase S1S2 tallage, plus la température moyenne journalière augmente plus les rendements médians vont augmenter. Or, une véritable interprétation est de dire que les rendements et les températures moyennes journalières ont augmenté dans le même temps.

La même analyse mais au pas de temps décennal a été également effectuée (voir ANNEXE V).

D. Mise en relation des résultats

Nous avons exploré plusieurs méthodes afin de trouver des indicateurs pouvant avoir un potentiel impact sur les rendements. Et nous nous sommes aperçus que se sont principalement toujours les mêmes indicateurs qui se dégagent (Tableau 8) à savoir des indicateurs liés à la température et au rayonnement global. En les mettant en relation avec nos précédentes analyses nous pouvons en déduire certaines conclusions.

Tableau 8 : Récapitulatif des indicateurs significatifs pour l'ensemble des analyses.

		S1S2	S2S4	S4S5
Indicateurs continus	Evolution temporelle à l'échelle annuelle	s1s2_meant	s2s4_sumsorad	s4s5_meant
	Evolution temporelle à l'échelle décennale	s1s2_meant (x2)		s4s5_meant
	Comparaison distribution rupture en 2000	s1s2_meant	s2s2_sumsorad	s4s5_meant s4s5_avsorad
	Relation avec le rendement	s1s2_meant	s2s4_sumsorad	
Indicateurs discrets	Evolution temporelle à l'échelle annuelle	s1s2_raidays	s2s4_hsdays	
	Evolution temporelle à l'échelle décennale		s2s4_hdaystmean	
	Comparaison distribution rupture en 2000			
	Relation avec le rendement	s1s2_raidays	s2s4_hsdays	

En rouge les indicateurs significatifs à 0.01.

En orange les indicateurs significatifs à 0.05.

Pour la phase de tallage (S1S2) nous retrouvons principalement les indicateurs nous renseignant sur la température journalière moyenne et le nombre de jours de pluie. Pour rappel, la phase de tallage se trouve en période hivernale, c'est également une phase durant laquelle la plante requiert aussi des températures relativement basses pour la vernalisation (entre 3°C et 10°C). Nous avons remarqué que la date d'apparition du stade S2 épi à 1 cm avait tendance à avancer. Une des raisons qui pourrait expliquer ce phénomène est la hausse significative des températures moyennes journalières, cette tendance a été vérifiée tant au pas de temps annuel que décennal.

Concernant la phase de montaison (S2S4), deux indicateurs reviennent souvent : la somme du rayonnement global sur la phase ainsi que le nombre de jours de très forte chaleur⁴. Bien que ce soit un fait avéré, la hausse du rayonnement ne constitue pas un handicap pour la plante, au contraire l'ensoleillement favorise l'élongation des tiges et le développement des fleurs. Bien que considéré comme un phénomène exceptionnel et ponctuel, le nombre de jour de très forte chaleur durant la phase de montaison a significativement augmenté ces dernières années.

Enfin, la dernière phase S4S5, phase de formation et de maturité du grain, voit ses températures journalières augmenter significativement. Il fait relativement plus chaud depuis le début du 20^{ème} siècle qu'au cours de la seconde partie du 19^{ème} siècle. Toujours dans le même esprit que pour les autres phases, cette hausse significative permet d'expliquer l'avancement de la date d'apparition du stade S5 maturité et du raccourcissement significatif de la durée de la phase S4S5.

IV. Bilan et perspectives

Sur le plan opérationnel, ce travail a permis de tester la chaîne de calcul, conçue récemment en interne au sein de l'unité AgroClim. Ecrite en langage Java, elle a été conçue pour réaliser ce type de traitement et permettre l'analyse des conditions climatiques passés et futures sur une large gamme de cultures à l'échelle de la France.

Elle n'avait pas été jusqu'à présent testée sur un grand nombre de simulations. Le travail a consisté à mettre en place une série de tests nominaux et ciblés. La mise en place d'une méthodologie de vérification des résultats est en soit bénéfique pour le développement de l'outil car elle permet maintenant de confirmer l'exactitude des résultats obtenus.

Sur le plan du protocole utilisé pour l'étude, plusieurs points sont à souligner :

1- La paramétrisation de la chaîne de traitement :

Lors du paramétrage de la chaîne de traitement (page 7) plusieurs choix ont été prédéfinies. Ainsi, la variété de blé utilisée (Soissons) est une variété adaptable à tout type de sol et est donc considérée comme une variété moyenne, jugée représentative de l'ensemble des variétés de blé tendre d'hiver. De plus, la date de semis a été choisie comme étant fixe, au 1^{er} octobre de chaque année. Cette date a été prédéfinie à partir du protocole utilisé dans le cadre du projet ANR CLIMATOR pour simuler la croissance et le développement du blé en France (Brisson et Levrault, 2010).

La combinaison de ces deux paramétrages peut aisément être modifiée afin d'explorer de multiples cas. Ainsi, il serait possible d'étudier différents types de variété de blé tendre (variété précoce, moyenne ou tardive) combinées à différentes dates de semis décalée dans le temps. Cette étude permettrait d'avoir un panorama plus complet de l'évolution des indicateurs écoclimatiques sur différents cas de culture de blé tendre.

2- Une analyse centralisée au niveau national :

Nous avons privilégié d'emblée une analyse au niveau national de la France métropolitaine. Finalement, après analyse des résultats et réflexion ce choix peut largement être discuté. En effet, du fait de la spécificité climatique de la France (différents climats sur le territoire) l'agrégation des indicateurs à la médiane nationale fait perdre énormément d'informations sur les potentielles variabilités climatiques interterritoriales.

⁴ TMAX >25°C

De ce constat, plusieurs stratégies peuvent être envisagées afin de prendre en compte ses variabilités. Par exemple, il serait possible de se concentrer sur des régions où la production de blé tendre est la plus élevée. Ces régions « témoins », permettraient d'avoir des données plus homogènes du point de vue climatique et d'analyser les rendements et les indicateurs écoclimatiques. On pourrait par exemple s'intéresser aux régions du bassin parisien ou de la Picardie, des régions où l'on sait pertinemment que la production de blé est un maillon fort de l'agriculture locale. La variabilité climatique due à l'espace géographique serait donc réduite.

Bien que pouvant être critiquée, cette méthodologie a tout de même fait ressortir quelques points importants qui méritent d'être soulignés :

- La rupture temporelle au niveau nationale ne représente pas forcément les contextes régionaux. Il est donc important de la relativiser.
- Les résultats obtenus confirment l'intérêt de la démarche qui utilise des indicateurs écoclimatiques. En effet, nos indicateurs étant calculés selon des dates phénologiques propres à une maille, les calculer sur une base calendaire n'aurait pas permis d'obtenir des résultats comparables et spécifiques à chaque phase.
- Les résultats obtenus soulignent d'importantes effets :
 - Une hausse significative de la température (indicateur *meant*) sur deux phases sensibles S1S2 le tallage (S1S2) et la formation du grain (S4S5), et un signal sur le risque de l'augmentation des fortes chaleurs (indicateurs *hstdays* et *hdaystmean*) sur la phase de montaison (S2S4).
 - Une hausse avérée du rayonnement solaire (indicateur *sumsrad*) pour la phase montaison (S2S4), indicateur indispensable à la photosynthèse qui joue un rôle déterminant dans la production de matière végétale.
 - Il ne ressort aucun signal réellement significatif sur la pluie.

3- Le choix de l'agrégation des indicateurs pour répondre à une problématique spatiale :

De premier abord le choix de synthétiser les données par la médiane fut presque intuitif. La médiane permettait d'avoir une vision globale de l'évolution au niveau national. Mais ce choix a une limite forte du fait qu'il gomme la variabilité spatio-temporelle des indicateurs à l'échelle des mailles d'études.

Pour poursuivre l'analyse, nous proposons deux pistes de méthodes :

- Analyser les queues des distributions des indicateurs afin d'évaluer quels sont les années qui peuvent être considérées comme extrêmes au niveau des indicateurs.
- Ré-analyser les indicateurs de type discret selon des seuils d'apparition des phénomènes étudiés afin d'y déterminer de potentielles variabilités spatio-temporelles.

Ces résultats en soi ne reflètent qu'une analyse de l'évolution sur le temps historique de l'étude et principalement à l'échelle nationale. L'étude doit être prolongée en approfondissant localement les différentes tendances (comme décrit auparavant) et en utilisant les scénarios des projections climatiques qui sont disponibles pour les mêmes paramètres climatiques à la maille SAFRAN jusqu'en 2100 afin de dégager une analyse plus globale de l'impact du changement climatique sur la phénologie du blé.

V. Bibliographie

Ben-Ari T, Boé J, Ciais P, Lecerf R, Van der Velde M and D Makowski, 2016. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications*. 24 avril 2018. doi:10.1038/s41467-018-04087-x.

Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy MH, Ruget F, Nicoullaud B, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, Cellier P, Mchet JM, Meynard JM and R Delécolle, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346

Brisson N, Gary C, Justes E, Roche R, Mary B, Ripoche D, Zimmer D, Sierra J, Bertuzzi P, Burger P, Bussi re F, Cabidoche YM, Cellier P, Debaeke P, Gaudillere J P, H nault C, Maraux F, Seguin B and H Sinoquet, 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18 : p 309-332

Brisson N, Gate P, Couache D, Charmet G, Oury FX and F Huard, 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Res.* 119, 201–212.

Brisson N, Levrault F, 2010. Livre vert du projet Climator. Edition Ademe, ISBN : 978-2-35838-278-6, 334 pages.

Caubel J, Garc a de Cort azar Atauri I, Launay M, de Noblet-Ducoudr  N, Huard F, Bertuzzi P and AE Graux, 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agric. Forest Meteorol.* 207: 94-106.

Chuine I, Atauri IGdC, Kramer K. and H H nninen, 2013. Plant Development Models. In: *Phenology: An Integrative Environmental Science* (ed. Schwarz MD). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 275-293.

Cleland EE, Chuine I, Menzel A, Mooney HA and MD. Schwartz, 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution* Vol.22 No.7. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>.

Coucheney E, Buis S, Launay M, Constantin J, Mary B, Garc a de Cort azar-Atauri I, Ripoche D, Beaudoin N, Ruget F, Andrianarisoa KS, Le Bas C, Justes E and J L onard , 2015 Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France *Environmental Modelling & Software* 64, 177–190 doi:10.1016/j.jenvsoft.2014.11.024

Gate P, 1995. *Ecophysiologie du bl , de la plante   la culture*. Edition Technique & Documentation - Lavoisier, ISBN : 2-7430-0046-5, 429 pages.

Holzk mper A, Calanca P and J Fuhrer, 2011. Analyzing climate effects on agriculture in time and space.

Holzk mper A, Calanca P and J Fuhrer, 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agriculture and Forest Meteorology* 168: 149-159.

Ouzeau G, Déqué M, Jouini M, Planton S et R Vautard, 2014. Le climat de la France au XXI^e siècle, Volume 4, Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Rapport du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 64 pages.

Toyoda T, 1974. Use of the Chow test under heteroscedasticity, *Econometrica*, Vol. 42, No 3, (601-608)

Trnka L, Olesen JE, Kersebaum KC, Skjelvag OA, Eitzinger J, Seguin B, Peltonen-Sainio O, Rotter R, Igelsias A, Orlandini M, Dubrovsky M, Hlavinka P, Balek J, Eckersten H, Cloppet E, Calanca P, Gobin A, Vucetic V, Nejedik P, Kumar S, Lalic B, Mestre A, Rossi F, Kozyra J, Alexandrov V, Semerádova D and Z Zalud, 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology* 17: 2298-2318.

Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M and JM Soubeyroux, 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *Int. J. Climatol.* 30:1627–1644.

VI. Annexes

ANNEXE I : Evolution du climat en France

Source Météo-France, Site Climat HD,
<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

En France métropolitaine, les effets du changement climatique se traduisent principalement par la hausse des températures moyennes. De 1900 à nos jours, le réchauffement atteint environ 1,4°C, une valeur plus forte que celle observée en moyenne mondiale, estimée à +0,9°C sur la période 1901-2012 (source GIEC 2013).

Le réchauffement est comparable d'une région française à l'autre mais son rythme n'est pas régulier. Il a notamment connu une accélération depuis les années 1980. Sur la période 1959-2009, on observe une tendance de +0,3°C par décennie en moyenne annuelle, avec une hausse encore plus marquée au printemps et en été.

L'évolution du cumul de précipitations diffère selon les régions et les saisons. Sur la période 1959-2009, on constate généralement une hausse des précipitations annuelles dans la moitié nord et une baisse dans la moitié sud. Au printemps et en automne les cumuls sont en hausse sur la majeure partie du territoire métropolitain. En hiver et en été, l'évolution des précipitations est plus contrastée d'une région à l'autre. On observe notamment une baisse des cumuls sur les régions méridionales. Cependant, à l'exception de quelques régions de l'Est de la France ou proches de la Méditerranée, les tendances des précipitations sont souvent peu marquées et peuvent varier selon la période d'étude couverte par l'analyse.

Depuis le milieu du XXe siècle, on observe aussi des évolutions de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes : le nombre de journées chaudes (températures maximales supérieures à 25°C) augmente, tandis que le nombre de jours de gel diminue. Les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes et plus intenses. En revanche, aucune tendance marquée ne se dégage pour l'évolution du nombre d'événements pluvieux intenses, ni pour les tempêtes.

Les changements décrits ci-dessus ont des impacts sur l'évolution du cycle de l'eau. En particulier, la durée de la période d'enneigement en moyenne montagne diminue et l'évaporation des sols s'accroît, induisant des sécheresses plus fréquentes et plus intenses.

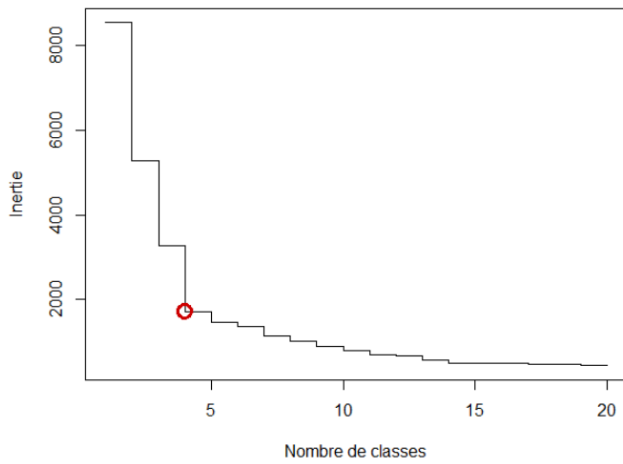
ANNEXE II :

JULIAN DATE CALENDAR
PERPETUAL

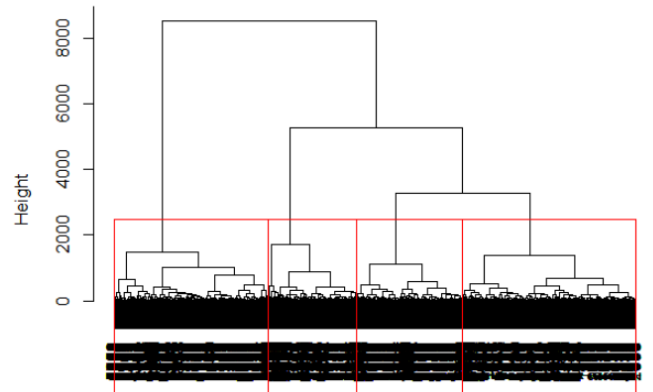
Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Day
1	001	032	060	091	121	152	182	213	244	274	305	335	1
2	002	033	061	092	122	153	183	214	245	275	306	336	2
3	003	034	062	093	123	154	184	215	246	276	307	337	3
4	004	035	063	094	124	155	185	216	247	277	308	338	4
5	005	036	064	095	125	156	186	217	248	278	309	339	5
6	006	037	065	096	126	157	187	218	249	279	310	340	6
7	007	038	066	097	127	158	188	219	250	280	311	341	7
8	008	039	067	098	128	159	189	220	251	281	312	342	8
9	009	040	068	099	129	160	190	221	252	282	313	343	9
10	010	041	069	100	130	161	191	222	253	283	314	344	10
11	011	042	070	101	131	162	192	223	254	284	315	345	11
12	012	043	071	102	132	163	193	224	255	285	316	346	12
13	013	044	072	103	133	164	194	225	256	286	317	347	13
14	014	045	073	104	134	165	195	226	257	287	318	348	14
15	015	046	074	105	135	166	196	227	258	288	319	349	15
16	016	047	075	106	136	167	197	228	259	289	320	350	16
17	017	048	076	107	137	168	198	229	260	290	321	351	17
18	018	049	077	108	138	169	199	230	261	291	322	352	18
19	019	050	078	109	139	170	200	231	262	292	323	353	19
20	020	051	079	110	140	171	201	232	263	293	324	354	20
21	021	052	080	111	141	172	202	233	264	294	325	355	21
22	022	053	081	112	142	173	203	234	265	295	326	356	22
23	023	054	082	113	143	174	204	235	266	296	327	357	23
24	024	055	083	114	144	175	205	236	267	297	328	358	24
25	025	056	084	115	145	176	206	237	268	298	329	359	25
26	026	057	085	116	146	177	207	238	269	299	330	360	26
27	027	058	086	117	147	178	208	239	270	300	331	361	27
28	028	059	087	118	148	179	209	240	271	301	332	362	28
29	029		088	119	149	180	210	241	272	302	333	363	29
30	030		089	120	150	181	211	242	273	303	334	364	30
31	031		090		151		212	243		304		365	31

ANNEXE III

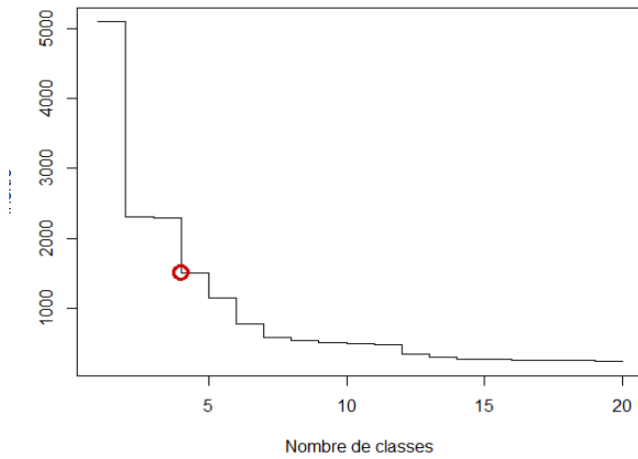
Saut d'inertie du dendrogramme pour le stade S2 : épi à 1 cm



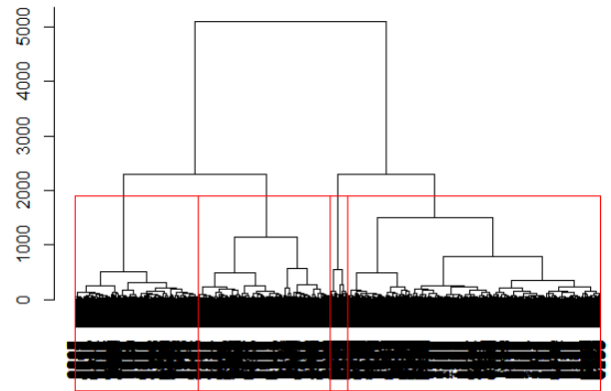
Partitionnement en 4 classes pour le stade S2 : épis à 1 cm



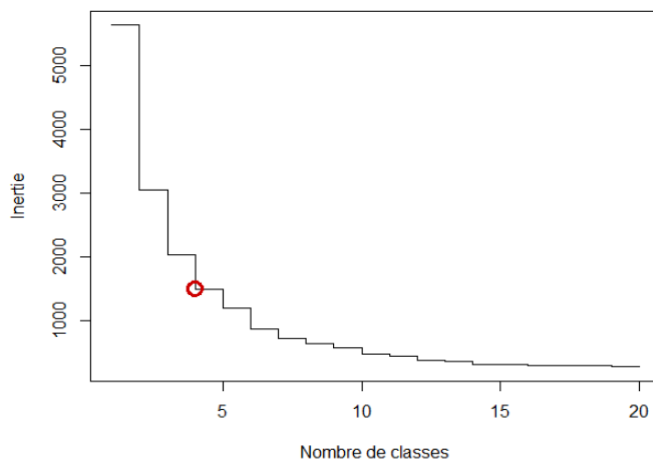
Saut d'inertie du dendrogramme pour le stade S4 : floraison



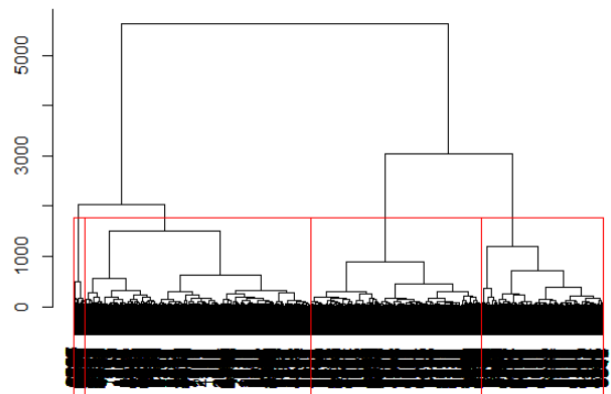
Partitionnement en 4 classes pour le stade S4 : floraison



Saut d'inertie du dendrogramme pour le stade S5 : maturité



Partitionnement en 4 classes pour le stade S5 : maturité

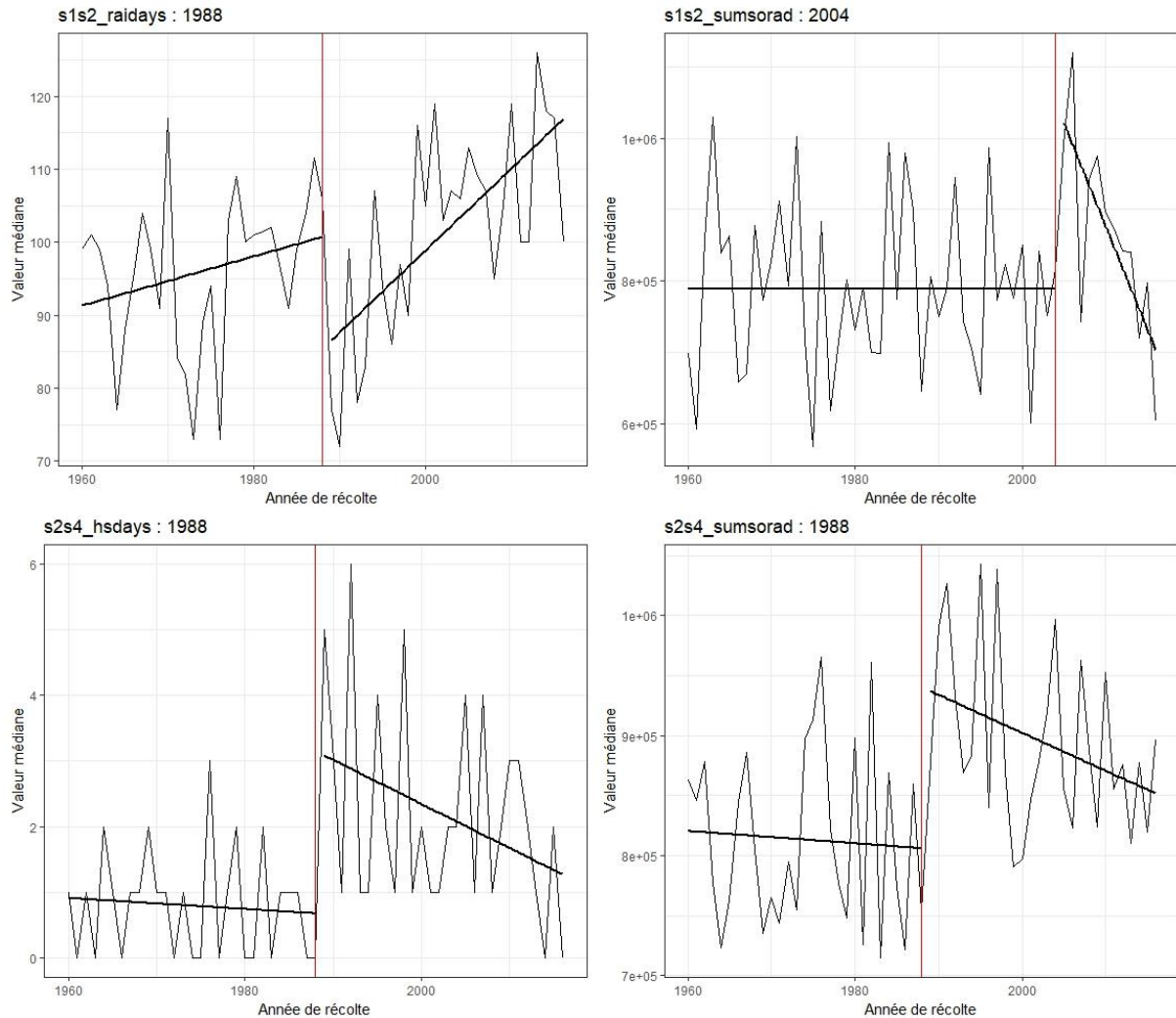


ANNEXE IV

Un test de Chow a également été réalisé sur l'ensemble des indicateurs. Il en ressort que pour les indicateurs :

- $s1s2_raidays$: nombre de jour de pluie ($pv = 0.004$)
- $s1s2_sumsorad$: somme des radiations journalière ($pv = 0.004$)
- $s2s4_hsdays$: nombre de jours de fortes chaleurs ($T_{max} > 25^{\circ}C$) ($pv = 0$)
- $s2s4_sumsorad$: somme des radiations journalière ($pv = 0,002$)

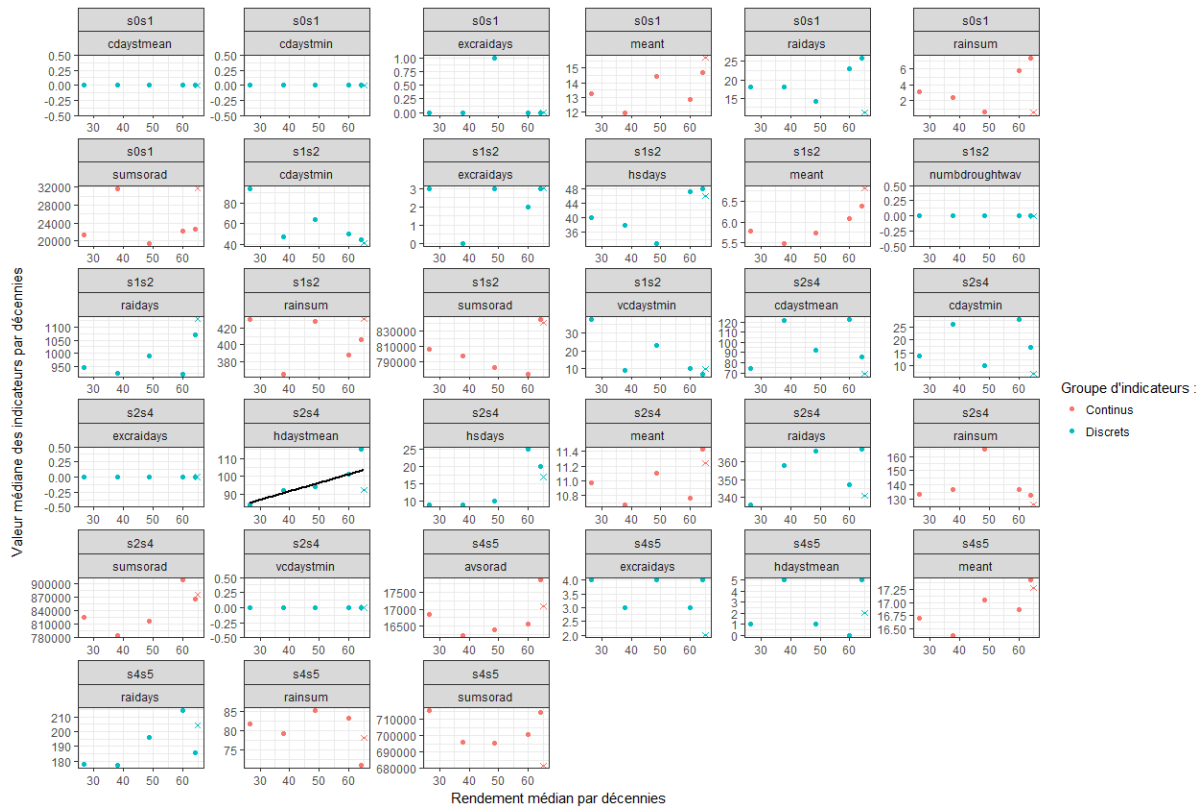
il existe une réelle rupture temporelle.




Les indicateurs détectant une rupture temporelle ($pvalue < 0.01$) appartiennent à deux familles différentes. D'un côté nous avons des indicateurs expliquant un changement de régime de pluie ($s1s2_raidays$ et $s2s4_hsdays$) et de l'autre nous avons des indicateurs nous indiquant sur le changement de tendance des variables d'ensoleillement (somme des radiations sur les phases $s1s2$ et $s2s4$).

ANNEXE V

Corrélation entre la valeur médiane des indicateurs et le rendement médian par décennies. Le calcul des valeurs médianes pour la dernière décennie est le même que page 24. Pour ce qui est des rendements, on considère que la médiane reste la même jusqu'à la fin de la décennie. C'est-à-dire qu'on fait l'hypothèse qu'il existera toujours une forte variabilité impliquant un stationnement médian des rendements à 62 q/ha/an.



Il en ressort que seul l'indicateur s2s4_hdaystmean (le nombre de jours où la température moyenne journalière dépasse les 15°C en période de montaison) est significativement corrélé.

	Diplôme : Master 2 Spécialité : Data Science pour la biologie Spécialisation / option : Enseignant référent : David Causeur
Auteur(s) : Marine Marjou Date de naissance* : 06/07/1995	Organisme d'accueil : Agroclim INRA Adresse : Domaine Saint Paul 228 route de l'Aérodrome 84000 Avignon
Nb pages : 32 Annexe(s) : 5	Maîtres de stage : Patrick BERTUZZI Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI
Année de soutenance : 2018	
Titre français : Plafonnement des rendements de blé en France : mise en place d'une méthodologie d'analyse rétrospective des données météorologiques. Titre anglais : Stagnating of wheat yields in France: implementation of a retrospective methodology to analysis meteorological data.	
Résumé (1600 caractères maximum) : Une stagnation des rendements du blé tendre est observable depuis le début du 21 ^{ème} siècle sur la base du calcul, à l'échelle nationale, des rendements annuels. Cette rupture est détectée en l'année 2000. Le rendement médian stagne autour de 62 q/ha/an et s'accompagne d'une augmentation très significative de la variabilité interannuelle des rendements sur la période 2000-2016 par rapport à la période 1950-1999. Cette rupture n'est néanmoins pas totalement représentative de la tendance observée au niveau des données départementales. Cette stagnation des rendements pourrait être en partie expliquée par le changement notable des conditions climatiques, observable depuis le début du 21 ^{ème} siècle. À partir d'une base de données climatiques Safran de Météo-France recensant les conditions météorologiques journalières sur l'ensemble du territoire français de 1958 à 2016, un total de 33 indicateurs écoclimatiques ont été calculés sur les différentes phases phénologiques du blé tendre. La mise en place d'une méthodologie d'analyse des résultats des indicateurs montre principalement une tendance à la hausse, à l'échelle nationale, des indicateurs liés à la température de l'air sur des phases clés du cycle du blé (tallage, montaison). Cette hausse engendre un avancement significatif dans le temps des stades phénologiques et réduit la durée du cycle de culture.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Stagnation in wheat production has been observable since the beginning of the 21st century based on the calculation of annual yields at the national level. This break have been detected in the year 2000. The median yield stagned around 62 q/ha/y and is accompanied by a very significant increase in the interannual variability between 2000-2016 compared to the period 1950 -1999. This break is not representative of the data departmental trend. This yield stagnation could be partly explained by the change in climatic conditions, observable since the beginning of the 21st century. From the Safran database of Météo – France that identify daily weather conditions for the French territory from 1958 to 2016, a total of 33 « écoclimatique » indicators have been calculated for differents phenologicals phases of wheat. The implementation of a method to analysis the value of indicators shows an increase in temperature indicators on different important periods. This increase generates earlier phenological phases and reduces the cultural cycle.	
Mots-clés : changement climatique, phénologie, indicateur écoclimatique, blé, rendement Key Words: climate change, phenolgy, écoclimatique indicator, yield, wheat	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

Document à intégrer au mémoire