



HAL
open science

Définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau

Dany Blanchet

► **To cite this version:**

Dany Blanchet. Définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau. INRAE. 2023. hal-04413787

HAL Id: hal-04413787

<https://hal.inrae.fr/hal-04413787>

Submitted on 24 Jan 2024

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

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



**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE
MONTPELLIER**

MASTER SCIENCES DE L'EAU

1^{ère} ANNÉE

PARCOURS EAU ET AGRICULTURE

ANNEE UNIVERSITAIRE 2022-2023

Définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau

*Cultures de maïs, blé tendre et dur, fruitiers, colza, pomme de terre, tournesol,
soja et pois*

Rapport présenté le 19 juin 2023

Par

Dany BLANCHET

Maîtres de stage : Mme. Marie Launay et M. Mael Aubry

Enseignant référent : Mme. Flavie Cernesson

Résumé :

Le changement climatique accentue la fréquence et l'intensité des sécheresses mais également des épisodes pluvieux extrêmes, ce qui altère le fonctionnement physiologique des plantes cultivées et menace la production agricole. Dans ce contexte, l'unité AgroClim développe des outils et des méthodes pour étudier la faisabilité climatique des cultures. Ainsi, les indicateurs agroclimatiques synthétisent les effets du climat sur des dates clés, et permettent de comparer les effets du climat dans différents territoires et à différents horizons temporels. L'objectif de l'étude est de déterminer quels indicateurs relatifs à la sécheresse et aux excès d'eau sont pertinents pour des cultures d'intérêt. Les résultats de celle-ci ont permis dans un premier temps de déterminer les périodes de vulnérabilités des cultures de blé tendre, maïs, colza, soja, pois et pomme de terre et de proposer des indicateurs. Ces indicateurs ont ensuite été calculés et spatialisés lorsqu'ils étaient disponibles sur la plateforme Siclima. Une méthode d'estimation des pertes de rendement et des conjonctures agricoles ont permis de valider la robustesse des indicateurs basés sur des données climatiques et de détecter un problème avec ceux basés sur le bilan hydrique. Afin de pouvoir calculer de nouveaux indicateurs, vérifier leurs robustesses et déterminer des seuils de tolérance, un code R sera créé à la suite de cette première partie de travail.

Mots clés : Changement climatique ; déficit hydrique ; excès d'eau ; indicateurs ; phénologie

Abstract:

Climate change is increasing the frequency and intensity of both droughts and extreme rainfall events, altering the physiological functioning of crop plants and threatening agricultural production. Against this backdrop, the AgroClim unit is developing tools and methods to study the climatic feasibility of crops. Agroclimatic indicators summarize the effects of climate on key dates and enable comparisons to be made between the effects of climate in different areas and over different time horizons. The aim of the study was to determine which indicators relating to drought and excess water are relevant for crops of interest. The results of this study were used to determine the periods of vulnerability of soft wheat and maize crops, and to propose indicators. These indicators were then calculated and spatialized when available on the Siclima platform. A method for estimating yield losses and agricultural conjunctures was used to validate the robustness of indicators based on climatic data, and to detect a problem with those based on water balance. To be able to calculate new indicators, check their robustness and determine tolerance thresholds, an R code will be created following this first part of the work.

Keywords: Climate change; water deficit; water excess; indicators; phenology

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Marie LAUNAY et Mael AUBRY, mes maîtres de stage, pour leur soutien inestimable tout au long de cette expérience professionnelle enrichissante. Leur encadrement attentif, leur expertise et leur bienveillance ont été des éléments clés de ma réussite lors de ce stage.

Sous la direction de Marie LAUNAY, j'ai eu la chance de travailler dans une ambiance agréable. Sa pédagogie et sa disponibilité m'ont permis de mener à bien ce stage et de rédiger ce rapport avec confiance. Quant à Mael AUBRY, nos échanges ont été une source d'inspiration constante. J'ai beaucoup apprécié son soutien et ses qualités humaines.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers Renan LE-ROUX et Carina FURUSHO PERCOT pour leurs idées et leurs conseils qui ont enrichi mon travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Felix PONTEGNIER pour son assistance dans l'analyse du rendement réalisée avec R. Son aide a été essentielle pour la réussite de cette étape cruciale.

Je souhaite également remercier chaleureusement l'équipe du bâtiment Climat pour leur accueil et leur disponibilité. L'environnement de travail convivial a favorisé mon intégration au sein de l'unité et a contribué à rendre mon stage enrichissant et agréable.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers Isabelle LE-MOUELLIC pour son aide précieuse pour trouver un logement au sein de INRAE d'Avignon et pour son accompagnement lors de mon intégration au sein de l'unité.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce stage, je vous adresse mes remerciements les plus sincères. Votre soutien, votre expertise et votre bienveillance ont été des éléments essentiels qui ont marqué cette expérience professionnelle et m'ont permis de progresser.

Présentation de la structure d'accueil

INRAE, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement est un organisme public de recherche spécialisé dans les domaines de l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

- AgroClim est une unité de service appartenant au département AgroEcoSystem" d'INRAE, qui a pour missions principales l'acquisition de données relatives au climat, la conception et la gestion de bases de données, et le développement d'applications informatiques permettant de diffuser ces données et de représenter le fonctionnement des agroécosystèmes en lien avec le climat. Dans le cadre de ses missions, l'unité développe des approches méthodologiques et théoriques pour les communautés scientifiques travaillant sur le changement climatique et les agroécosystèmes. Outre le développement de méthodes d'intégration spatio-temporelle des données climatiques à basse résolution dans des modèles d'impact à plus haute résolution (bassin versant, parcelle), l'unité valorise les données acquises, ou répertoriées, pour effectuer des études permettant de quantifier les effets abiotiques et biotiques du changement climatique sur différents agroécosystèmes.
- AgroClim a développé des méthodes reposant sur la modélisation biophysique, et des indicateurs agroclimatiques/écoclimatiques dans le but de représenter le fonctionnement des agroécosystèmes notamment en lien avec le climat. Parmi les outils développés, il y a GETARI, SICLIMA mais aussi le modèle STICS qui est un des 3 modèles de culture les plus utilisés dans le monde.

AgroClim contribue également par son expertise à des modules d'enseignement universitaire en climatologie, agrométéorologie, écophysiologie et agronomie, ainsi qu'auprès des acteurs du développement agricole. L'unité participe enfin régulièrement à plusieurs types d'expertises : expertises scientifiques collectives commanditées par les ministères, expertises externes INRAE, en temps réel de « situation de crise », notamment lors d'évènements climatiques extrêmes (exemple : Sécheresse ou Canicule), ou expertises spécifiques à la demande de territoire ou d'une filière agricole pour appréhender le diagnostic de la vulnérabilité et esquisser une stratégie face au changement climatique.

Liste des abréviations :

AGRESTE : Service Statistique du ministère de l'Agriculture.

ARVALIS : Institut Technique Français des Cultures Céréalières.

ETP : Evapotranspiration potentielle

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LAI : Indice foliaire (Leaf Area Index)

R3 : phase de développement et de maturation du grain - Grain laiteux (BBCH = 75)

SICLIMA : Système d'information de données climatiques maillées

V3 : Stade végétatif du maïs, apparition de la troisième feuille (BBCH = 15)

V6 : Stade végétatif du maïs, apparition de la sixième feuille (BBCH = 18)

VT : Floraison du maïs (BBCH = 63)

Glossaire :

Bilan d'énergie : Évaluation quantitative des flux d'énergie entrants et sortants d'un système.

Bilan hydrique : Calcul de la quantité d'eau entrant et sortant d'un système.

Conjonctures agricoles : Étude ou évaluation périodique de la situation du secteur agricole, visant à analyser les tendances, les perspectives et les défis qui influencent le secteur.

Déficit hydrique : Situation où la quantité d'eau disponible pour les plantes est insuffisante par rapport à leurs besoins, ce qui peut entraîner un stress hydrique.

Excès d'eau : Situation où la quantité d'eau disponible pour les plantes dépasse leurs besoins.

Flux de chaleur latente : Flux d'énergie thermique associé à la conversion de l'eau liquide en vapeur d'eau lors de l'évapotranspiration des plantes.

Flux de chaleur sensible : Flux d'énergie thermique résultant du transfert direct de chaleur entre un objet et son environnement, sans changement d'état de l'eau.

Humidité relative : Mesure du contenu en eau de l'air par rapport à sa capacité maximale à retenir l'humidité à une température donnée, exprimée en pourcentage.

Hypocotyle : C'est la partie de la tige située entre sa base (le collet) et les premiers cotylédons de la plante.

Modèle de culture : Outil informatique utilisé pour simuler la croissance, le développement et la réponse des cultures aux facteurs environnementaux.

Scénario climatique : Description hypothétique d'une évolution future du climat, basée sur des modèles climatiques et des projections des conditions atmosphériques et océaniques.

Sécheresse édaphique : Type de sécheresse qui se produit lorsque le sol est incapable de fournir suffisamment d'eau aux plantes.

Sécheresse hydrologique : Type de sécheresse qui se produit lorsque les réserves d'eau disponibles, telles que les rivières, les lacs ou les nappes phréatiques, sont insuffisantes pour répondre aux besoins en eau de la population, de l'agriculture et de l'environnement.

Stade BBCH : Classification phénologique des plantes basées sur une échelle de stades de développement, pour les céréales (Witzenberger *et al.* 1989 ; Lancashire *et al.* 1991).

Stade phénologique : Phase de développement spécifique d'une plante, caractérisée par des événements tels que la germination, l'émergence, la floraison, etc.

Stomate : Petite ouverture présente sur les feuilles et les tiges des plantes, régulant les échanges gazeux ainsi que l'évapotranspiration.

Table des figures

Figure 1: Evolution des températures à la surface du globe entre 1850 et 2020	2
Figure 2: Mesure et Projection de l'évolution de l'augmentation des températures à l'échelle française entre 1850 et 2100.	3
Figure 3: Simulation climatique du cumul de précipitations à différents horizons.	5
Figure 4: Evolution du cumul annuel moyen (mm) en France depuis 1950.....	5
Figure 5: Evolution depuis 1961 de l'intensité du maximum annuel du cumul quotidien de précipitations.	6
Figure 6: Proportion des éléments du bilan d'énergie de surface en conditions normales et sèche	7
Figure 7: Bilan hydrique d'un sol.....	7
Figure 8: Evolution de 1985 à 2012 des besoins en eau d'irrigation d'un maïs très tardif)	8
Figure 9: Tendances des rendements pour plusieurs cultures annuelles entre 1900 et 2016.	9
Figure 10: Schéma des 2 grands types d'indicateurs.....	9
Figure 11: Illustration de la méthode de détermination d'indicateurs agroclimatiques.....	10
Figure 12: Etapes de travail pour la définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau en France.	10
Figure 13: Les différents modèles de prédictions de rendement en Blé Tendre testés	14
Figure 14: Durée d'enneigement léthale pour 50% des graines.....	15
Figure 15: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Blé tendre.....	16
Figure 16: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en Blé tendre à l'échelle de la France et de ces régions.....	17
Figure 17: Proportion de pertes de rendement estimé en 2016 pour le Blé tendre et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.	18
Figure 18: Proportion de pertes de rendement estimé en 2020 pour le Blé tendre et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.	19
Figure 19: La période critique de sensibilité à la sécheresse du maïs.	20
Figure 20: Relation entre la réduction du rendement du maïs, le stade qui subit un enneigement et la durée d'enneigement pour trois années entre 2017-2019.	21
Figure 21: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Maïs.	22
Figure 22: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en Maïs à l'échelle de la France et de ces régions	23
Figure 23: Proportion de pertes de rendement en Maïs et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques pour l'année 1990 et l'année 2022	24

Table des tableaux

Tableau 1: Les caractéristiques des RCPs.	3
Tableau 2: Projections climatiques pour le RCP8.5 en France	4
Tableau 3: Taux de germination en fonction de l'exposition des graines à l'ensemencement	21

Table des équations

Équation 1: Bilan d'énergie de surface	6
Équation 2: Bilan hydrique d'un sol.....	7

Table des matières

INTRODUCTION	1
1) Le changement climatique et les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau sur l'agriculture	2
1.1 Le changement climatique : Causes et projections.....	2
1.1.1 Les activités humaines et l'effet de serre	2
1.1.2 Les projections climatiques françaises	2
1.2 Enjeux liés au cycle de l'eau	4
1.2.1 Les précipitations	4
1.2.2 Bilan d'énergie de surface et évapotranspiration	6
1.2.3 Bilan hydrique	7
1.3 Impacts sur l'agriculture	7
1.3.1 Les besoins en eau augmentent	8
1.3.2 Phénologie des espèces	8
1.3.3 Rendement.....	8
1.3.4 Des solutions	9
1.3.5 Les indicateurs liés à l'eau	9
2) MATERIEL ET METHODES	9
2.1 Méthodologie générale	9
2.1.1 Détermination d'indicateurs	9
2.1.2 Déroulé du stage.....	10
2.2 Détermination des risques climatiques et de leurs effets sur les cultures sélectionnées	11
2.3 Données	11
2.3.1 Données climatiques	11
2.3.2 Données de sol	11
2.3.3 Données de rendement	12
2.3.4 Conjonctures agricoles	12
2.4 Les outils.....	12
2.4.1 Les outils de calcul et de normalisation des indicateurs	12
2.4.2 L'outil de calcul des pertes de rendements	12

2.5	La méthodologie d'évaluation /diagnostic des résultats.....	12
2.5.1	Détermination des années à rendement anormalement bas.....	13
2.5.2	Création de cartes de pertes de rendements à l'échelle départementale	14
3)	RESULTATS	14
3.1	Blé Tendre	14
3.1.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	14
3.1.2	Les indicateurs.....	16
3.1.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	17
3.2	Maïs	19
3.2.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	19
3.2.2	Les indicateurs.....	22
3.2.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	22
3.3	Colza.....	25
3.3.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	25
3.3.2	Les indicateurs.....	27
3.3.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	27
3.4	Soja.....	29
3.4.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	29
3.4.2	Les indicateurs.....	31
3.4.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	31
3.5	Pois	33
3.5.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	33
3.5.2	Les indicateurs.....	35
3.5.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	36
3.6	Pomme de terre.....	38
3.6.1	Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces.....	38
3.6.2	Les indicateurs.....	40
3.6.3	Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement	40
3.7	Vulnérabilité et adaptation des systèmes maraîchers	42
3.7.1	Contexte	42

3.7.2	Objectifs des ateliers	42
3.7.3	La démarche	43
3.7.4	Vulnérabilité du maraîchage	43
3.7.5	Impacts sur les cultures	44
3.7.6	Pistes d'adaptation	44
4)	Discussion, perspectives et limites de l'étude.....	44
3.8	Les indicateurs disponibles dans SICLIMA	44
3.8.1	Indicateurs qui utilisent des données climatiques	44
3.8.2	Indicateurs qui utilisent des données de bilans hydriques.....	45
3.8.3	Tableau bilan	45
3.9	Perspectives pour la suite des recherches	46
3.9.1	Nouveaux indicateurs	46
3.9.2	Utilisation de R pour définir des seuils	46
3.9.3	Confirmation et adaptation de la liste d'indicateurs.....	46
3.10	Limite de la méthode	46
3.10.1	L'approche par résidus de rendement	46
3.10.2	Les indicateurs agroclimatiques liés à l'eau.....	47
	CONCLUSION.....	48

INTRODUCTION

À l'heure actuelle, le monde subit un changement climatique inédit dans l'histoire de la Terre. La planète se réchauffe très rapidement (+1,5 °C depuis 1850). Ce réchauffement tend à s'amplifier, ce qui engendre une augmentation de la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes (GIEC, 2023). Par conséquent, la France, l'Europe et de nombreuses régions du monde sont particulièrement touchées à différentes échelles par le changement climatique et voient déjà leurs territoires subir à des fréquences de plus en plus courtes, de longues sécheresses et de violentes inondations. L'agriculture est un secteur très affecté par ces changements : d'une part, par un phénomène d'aridification des sols ; d'autre part, à cause du raccourcissement des cycles végétatifs, des sécheresses et des précipitations extrêmes (INRAE, 2022).

Parallèlement, l'agriculture doit aujourd'hui relever un défi majeur, nourrir 8 milliards de personnes tout en garantissant des produits de qualité et pour tous. Tout en sachant, que la demande mondiale en production agricole augmentera dans les années à venir à mesure que la population humaine et la consommation alimentaire par habitant augmenteront et que la production de biocarburants se développera. Ainsi, l'agriculture devra augmenter sa production de 50% d'ici 2050 (FAO, 2017) malgré les effets du changement climatique.

En outre, les événements climatiques extrêmes peuvent provoquer des pertes de rendement importantes, en fonction à la fois du moment où ils se produisent et de la sensibilité des cultures (van der Velde et al., 2012). Cependant, il est possible de faire face, à court et moyen terme, au changement climatique en adaptant les pratiques des agriculteurs. Ainsi l'irrigation, la sélection variétale ou la modification des dates de semis (van der Velde et al, 2010) sont autant de stratégies d'adaptation évoquées.

Mais si on se réfère aux scénarios du GIEC (GIEC, 2023), les alternatives d'adaptations utilisées aujourd'hui ne suffiront peut-être pas. Il est alors nécessaire d'ajuster (en utilisant par exemple la diversification, l'agroforesterie ou l'agriculture de précision) ou de transformer (via de nouvelles productions, une relocalisation des cultures ou un changement d'usage des sols) le modèle agricole mondial (CLIMAE 2021).

Dans tous les cas, pour construire et sélectionner ces stratégies d'adaptation, les acteurs du monde agricole ont besoin d'outils et d'indicateurs pour quantifier les risques climatiques sur les cultures et l'échéance à laquelle ils devront y faire face. L'objectif de ce travail est de définir des indicateurs caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau sur des cultures d'intérêts en France. Nous nous focaliserons dans la présente étude sur les cultures de maïs, blé tendre et dur, pomme, abricot, colza, pomme de terre, tournesol, soja et pois.

1) Le changement climatique et les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau sur l'agriculture

1.1 Le changement climatique : Causes et projections

1.1.1 *Les activités humaines et l'effet de serre*

Le troisième rapport du GIEC (IPCC, 2001) a permis de poser un consensus autour de la chronologie et des causes du changement climatique, en particulier l'origine anthropique des dérèglements du système climatique depuis 1940. En effet, le changement climatique est la conséquence de multiples facteurs anthropiques et en particulier du réchauffement planétaire. Le réchauffement est principalement causé par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en majorité le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Ces gaz sont produits en grande partie par les activités humaines telles que la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'énergie, l'agriculture intensive, l'élevage de bétail, la déforestation et la production industrielle (GIEC 2023). En renvoyant les rayons infrarouges vers la terre, ils contribuent, par effet de serre, à augmenter la température terrestre. Cependant, la modification de leur concentration entraîne une augmentation du phénomène d'effet de serre et par conséquent une augmentation des températures.

La modification anthropique du climat a commencé dès la révolution industrielle, avec par la suite une augmentation exponentielle des températures (figure 1).

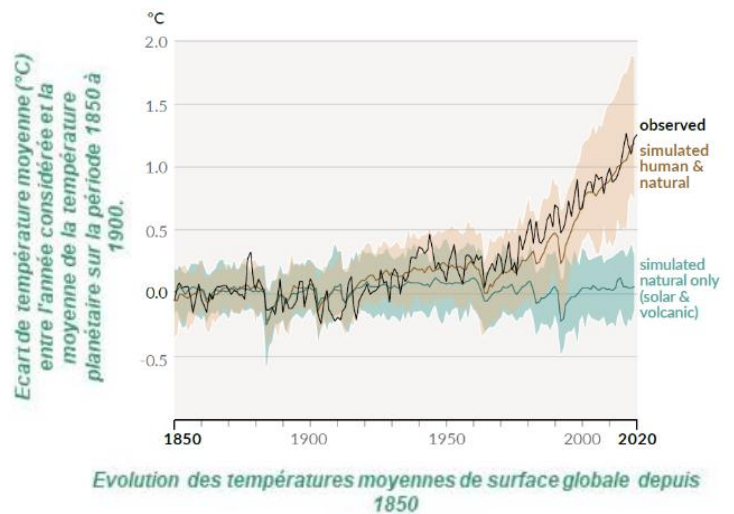


Figure 1: Evolution des températures à la surface du globe entre 1850 et 2020 et simulation de l'évolution sans perturbations anthropiques. La courbe noire représente les observations de températures causées par les activités humaines et la courbe verte les modifications de températures causées par les seuls facteurs naturels (GIEC, 2021).

1.1.2 *Les projections climatiques françaises*

La rupture climatique de 1987/1988 met en évidence les premiers grands signes de changement climatique en France. Cette période témoigne d'une augmentation brutale d'environ 1°C (Etienne Brulebois *et al.*, 2015) et une hausse de la demande évaporatoire de l'atmosphère, ces deux facteurs couplés ont engendré un assèchement rapide des sols (Sick L. *et al.*, 2021).

De plus, ces dernières années, il semble qu'il y est une augmentation de l'occurrence des événements climatiques extrêmes. Voici quelques exemples :

- En juin 2019, la France a connu une vague de chaleur exceptionnelle qui a duré plusieurs jours. Des températures record, atteignant jusqu'à 46°C ont été enregistrées dans de nombreuses régions.
- En octobre 2018, des inondations meurtrières ont touché l'Aude, dans le sud-ouest de la France. Les pluies torrentielles ont causé la mort de 15 personnes et de nombreux dégâts matériels.
- En juin 2016, des crues importantes ont touché plusieurs départements de France, notamment la Seine-et-Marne et le Loiret.

D'autre part, il est possible de prédire l'évolution du climat à partir de scénarios hypothétiques qui prennent en compte l'évolution des rejets anthropique de CO2 dans l'atmosphère. Les scénarios Representative Concentration Pathways (RCP) traduisent chacun une évolution de la concentration en CO2 dans l'atmosphère associée à une valeur de forçage radiatif (Jouzel et al., 2014) (Tableau 1).

Tableau 1 : Les caractéristiques des RCPs (Jouzel et al., 2014).

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W.m-2)	Concentration en CO2 vers 2100 (ppm)	Profil d'évolution
RCP2.6	2,6	475	Pic puis déclin
RCP4.5	4,5	630	Stabilisation avant 2100
RCP8.5	8,5	1313	Croissant

Les projections climatiques mondiales et françaises se basent sur des modèles climatiques sophistiqués qui tiennent compte de

plusieurs facteurs, ces modèles prédisent les tendances futures du climat en simulant les processus physiques et chimiques qui le régissent.

Il est possible de voir sur la figure 2, les anomalies de température moyenne en France mesurées entre 1850 et 2020 puis projetées entre 2020 et 2100.

Selon un scénario modéré et considéré comme probable (sans hausse ni baisse drastique des émissions), la température moyenne en France sera de 3,8°C supérieure à celle du début du XXe siècle (Aurélien Ribes *et al.*, 2022).

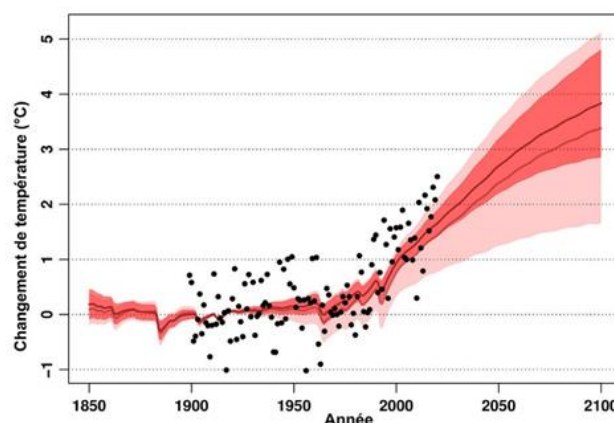


Figure 2 : Mesure et Projection de l'évolution de l'augmentation des températures à l'échelle française entre 1850 et 2100 (Aurélien Ribes *et al.*, 2022). L'enveloppe rouge et le trait rouge foncé représentent les simulations avec contraintes et l'enveloppe rose et le trait rouge les simulations sans contraintes. Les points noirs sont les observations.

Il existe une forte probabilité que des impacts graves et irréversibles se produisent dans les prochaines années du fait de ces augmentations. Pour en citer certains : L'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques

extrêmes, la diminution des réserves d'eau douce, la perte de biodiversité et la perturbation des systèmes agricoles.

Dans le tableau 2, l'effet du changement climatique en France selon le scénario RCP8.5 montre que le pays va subir des conséquences dévastatrices, si les activités humaines continuent de rejeter de plus en plus de CO2 dans l'atmosphère.

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
Evénements 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

1.2 Enjeux liés au cycle de l'eau

Le changement climatique exerce une influence importante sur le cycle de l'eau, qui est le processus naturel de circulation de l'eau sur Terre. En effet, il engendre une acidification de l'eau de mer, la fonte des glaciers et de la neige, un changement dans le fonctionnement des précipitations et une augmentation de l'évaporation. Dans cette étude, une attention

particulière sera portée sur son influence sur les précipitations, l'évapotranspiration et donc sur le bilan hydrique.

1.2.1 Les précipitations

Le changement climatique a des impacts significatifs sur le schéma de précipitation dans de nombreuses régions du monde. Les changements entraînés dans la température de l'air et de l'eau, les mouvements des masses d'air, la formation de nuages et la vapeur d'eau dans l'atmosphère sont tous des facteurs qui influencent la répartition et l'intensité des précipitations.

Les tendances dans le monde sont contrastées, certaines régions connaissent de plus en plus de sécheresse accrue alors que d'autres connaissent des précipitations plus intenses et plus fréquentes.

a) Cumule de précipitation en France

Sur la figure 3, l'évolution du cumul annuel de précipitations sur la période 1960-2010 en métropole ne montre pas une tendance significative à la hausse ou à la baisse de précipitations annuelles en France (Gibelin, 2015). Cependant, il semblerait qu'il y ait une variabilité spatiale avec une hausse dans le Nord et baisse dans le Sud-Est (figure 3). Cette tendance semble se confirmer et s'amplifier pour un futur proche et lointain selon les prédictions climatiques générées avec Drias (figure 4).

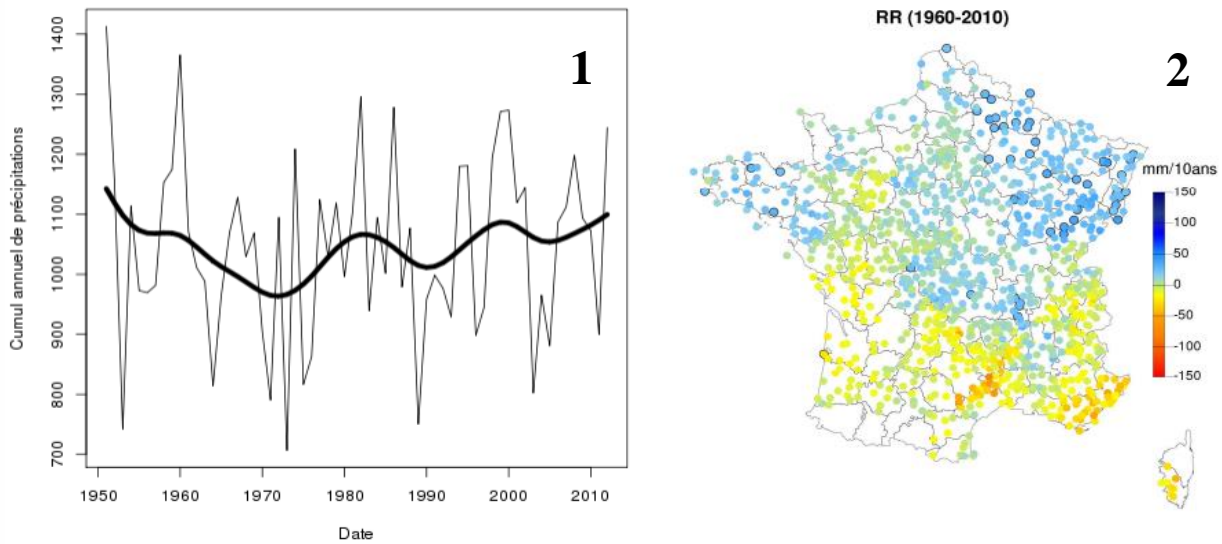


Figure 3: 1. Evolution du cumul annuel moyen (mm) en France depuis 1950
 2. Evolution du cumul annuel moyen (mm/10ans) sur l'ensemble du territoire entre 1960 et 2010 (Gibelin, 2015).

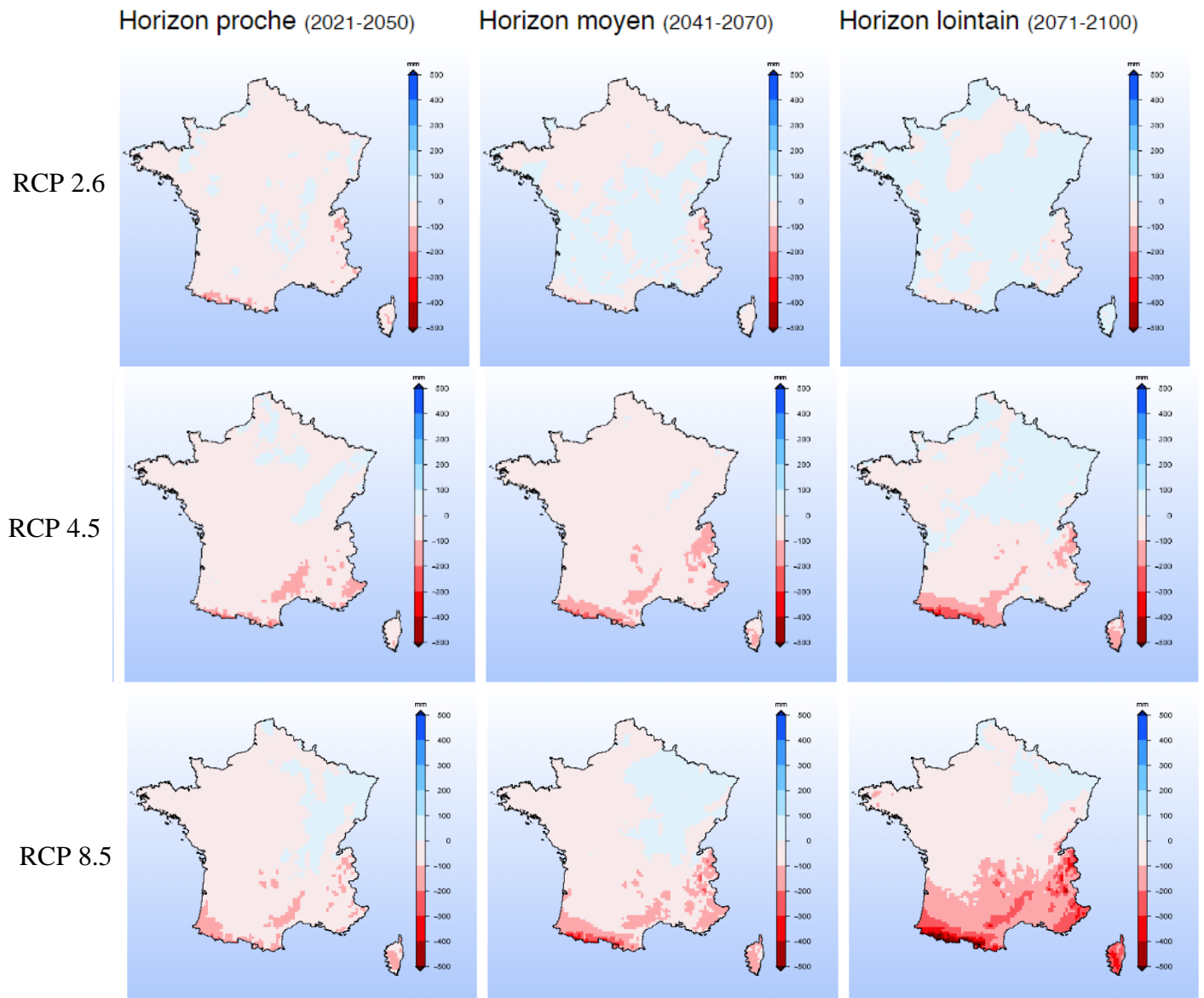


Figure 3: Simulation climatique du cumul de précipitations à différents horizons réalisés avec les données CNRM-ALADIN.

En fonction du scénario (tableau 1), la variation est plus ou moins conséquente avec un danger tout particulier en cas de RCP 8.5 avec le sud de la France qui subirait des pertes de précipitations annuelles de l'ordre de 200mm.

b) Intensité de pluies extrêmes dans le sud de la France

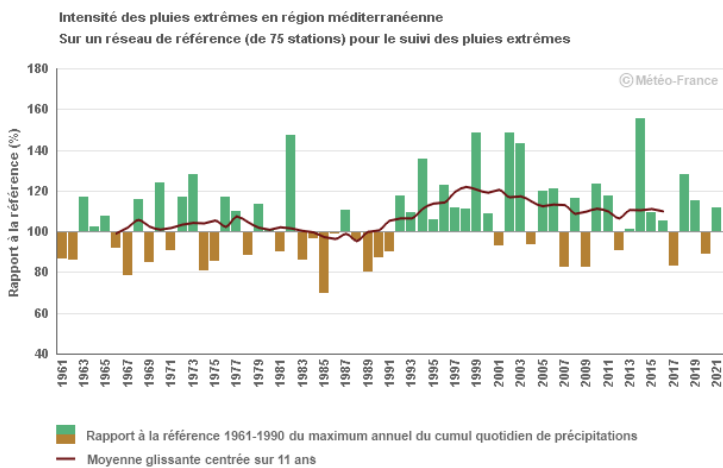


Figure 5: Evolution depuis 1961 de l'intensité du maximum annuel du cumul quotidien de précipitations exprimé en pourcentage par rapport à la valeur de référence 1961-1990 (Ministères Écologie Énergie Territoires, 2022).

D'après les données de 72 stations de Météo-France sur la figure 5, les pluies extrêmes ont une grande variabilité d'une année à l'autre dans le sud de la France. Elles sont surtout de plus en plus intenses et fréquentes.

1.2.2 Bilan d'énergie de surface et évapotranspiration

Le changement climatique modifie également le bilan d'énergie à la surface dans certaines régions. C'est une conséquence directe de l'aridification des sols et de la diminution de l'humidité de l'air.

En effet, l'eau est une ressource indispensable dont la circulation dans le continuum sol-plante-atmosphère concoure au bon fonctionnement des plantes. L'eau circule du sol vers l'atmosphère via la plante selon des gradients de potentiels hydriques décroissants. La vitesse de transpiration dépend des facteurs climatiques.

D'une part, quand l'air est trop sec, il y a un gradient d'humidité trop fort entre la plante et l'air, ce qui entraîne la fermeture des stomates. D'autre part, quand le sol est trop sec, les racines produisent de l'acide abscissique pour ordonner la fermeture des stomates. Ces facteurs influencent la résistance stomatique, or, c'est une variable essentielle de l'équation du bilan d'énergie de surface (équation 1).

$$R_n = S + LE + H$$

Équation 1: Bilan d'énergie de surface - Avec R_n rayonnement net, S conduction thermique dans le sol, LE , chaleur latente, H chaleur sensible.

En effet, les caractéristiques du climat dépendent des échanges d'énergie qui s'établissent d'une part au niveau de la surface du sol et d'autre part avec l'atmosphère.

Il est possible d'établir un bilan d'énergie de surface où l'énergie reçue par le couvert végétal (rayonnement net) est dissipée :

- Par modification de la température de l'air à la surface du couvert (flux de chaleur sensible),
- Par modification de la température du sol (flux de chaleur sensible dans le sol S , souvent considéré nul à l'échelle de la journée).

- Par modification de l'état physique de l'eau (évapotranspiration ou flux de chaleur latente). Le flux de chaleur latente ou évapotranspiration dépend notamment de la résistance stomatique. A l'échelle de la journée, un équilibre s'établit donc entre flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible pour dissiper toute l'énergie reçu par rayonnement.

Si la résistance stomatique augmente alors le flux de chaleur latente diminue et à contrario le flux de chaleur sensible augmente.

En d'autres termes, les conditions sèches entraînent une diminution de la transformation de l'énergie incidente par la transpiration des plantes, ce qui est compensé par plus de transformation de l'énergie en chaleur (chaleur sensible) et une augmentation de la température de surface (figure 6).

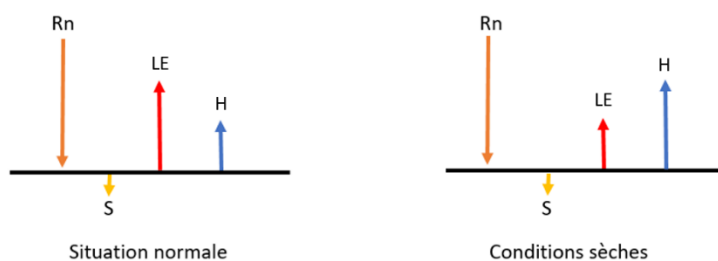


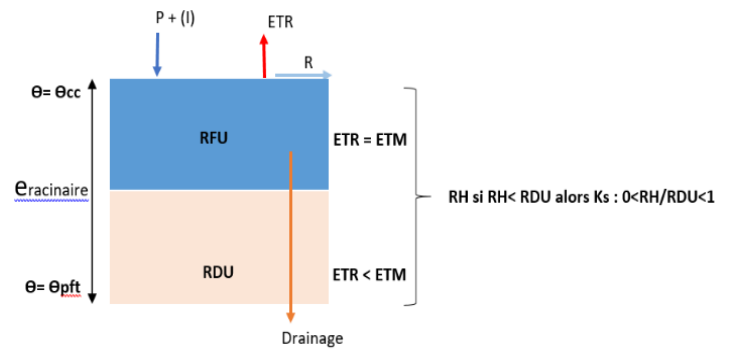
Figure 6: Proportion des éléments du bilan d'énergie de surface en conditions normales et sèches

1.2.3 Bilan hydrique

Les variables présentées ci-dessus (P et ETR) sont les moteurs du bilan hydrique (équation 2 et figure 7).

$$P+(I) = ETR+D+R+\Delta S$$

Équation 2: Bilan hydrique d'un sol - P précipitation, I irrigation, ETR évapotranspiration_réelle, D drainage, R ruissèlement et ΔS différence de stock d'eau dans le sol.



$$RU = e_{racinaire}(\Theta_{Cr}-\Theta_{pfp}) = RFU + RDU$$

$$RH = e_{racinaire}(\Theta_t-\Theta_{pfp}) \text{ si } \Theta_t > \Theta_{pfp}$$

$$D = e_{racinaire}(\Theta_t-\Theta_{pfp}) - e_{racinaire}(\Theta_{Cr}-\Theta_{pfp})$$

$$RH_j = RH_{j-1} + P_j + (I) - ETR_j - (D_j)$$

Figure 7: Bilan hydrique d'un sol - Θ_t teneur en eau à l'instant t, Θ_{Cr} teneur en eau à la capacité de rétention, Θ_{pfp} teneur en eau au point de flétrissement, Θ_{Cc} teneur en eau à la capacité au champs, $e_{racinaire}$ profondeur racinaire, RU réserve utile du sol, RFU réserve facilement utilisable, RDU réserve difficilement utilisable, ETM évapotranspiration maximale, Ks coefficient de stress, l'indice j indique que la variable est journalière,

Le changement climatique en modifiant le cycle de l'eau crée un changement dans la saisonnalité des précipitations avec notamment une réduction des pluies estivales (moins de P) sur la moitié sud (J. Jouzel *et al.*, 2014).

Ce qui a pour conséquence de provoquer une baisse de disponibilité en eau pour la consommation des plantes (sécheresse édaphique, moins de ETR) et une baisse de restitution en eau au milieu (sécheresse hydrologique, moins de D+R+ΔS).

Ce phénomène s'additionne à l'augmentation de l'ETP qui renforce le déficit climatique (P-ETP).

1.3 Impacts sur l'agriculture

1.3.1 Les besoins en eau augmentent

Comme expliqué dans la partie précédente, les fréquences, les intensités et les quantités de précipitations sont modifiées par le changement climatique. Cela a des répercussions sur la recharge des nappes, le débit des rivières, la saisonnalité des précipitations, et entraîne des périodes de sécheresse météorologique (liée aux manques de précipitations), agronomique (liée à un déficit d'eau dans le sol), hydrologique (liée à un déficit d'eau dans les nappes, lacs, rivières, cours d'eau). Parallèlement l'évapotranspiration augmente avec la température, ce qui se traduit par des besoins en eau accrus des cultures. Comme on peut le voir sur la figure 8 avec l'exemple du maïs, cela engendre une augmentation de la demande d'irrigation

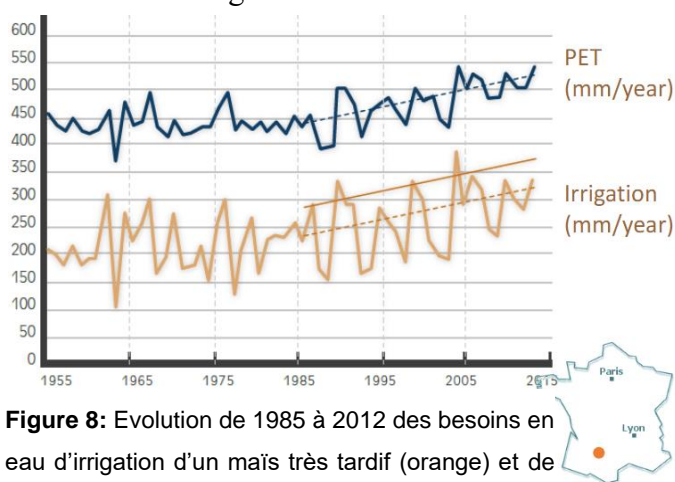


Figure 8: Evolution de 1985 à 2012 des besoins en eau d'irrigation d'un maïs très tardif (orange) et de l'ETP (bleu) Toulouse Blagnac (Furusho Percot, 2023, adapté de LACROIX *et al.*, 2019)

1.3.2 Phénologie des espèces

La phénologie joue un rôle crucial en tant qu'indicateur du changement climatique. Étant donné que le développement phénologique des plantes est étroitement lié à la température, les

modifications des dates d'apparition des stades clés du cycle cultural (ex : épiaison) peuvent être expliquées par le changement climatique (Cleland *et al.*, 2007).

On observe un avancement des dates des stades phénologiques pour plusieurs cultures en France. Les années extrêmes, avec des stades qui apparaissent très précocement sont également de plus en plus fréquentes.

Le dérèglement des précipitations, les fortes chaleurs et les accidents climatiques plus réguliers peuvent entraîner des conséquences importantes. En effet, non seulement la culture peut y être exposée plus fréquemment ou de manière plus intense, mais le décalage de sa phénologie peut également positionner des stades clés et sensibles de son développement à ces risques climatiques (ORACLE Grand Est, 2018).

1.3.3 Rendement

Sur la figure 9, des tendances à la stagnation et à la baisse des rendements sont observables depuis 1995. Différents facteurs expliquent ces tendances, mais la variabilité climatique explique la cinétique des dernières années.

Les causes sont multiples et diffèrent en fonctions des cultures. Il semblerait que la stagnation des rendements en maïs soit essentiellement due aux sécheresses alors que pour le blé, la principale raison invoquée est l'échaudage lié aux températures élevées durant le remplissage des grains.

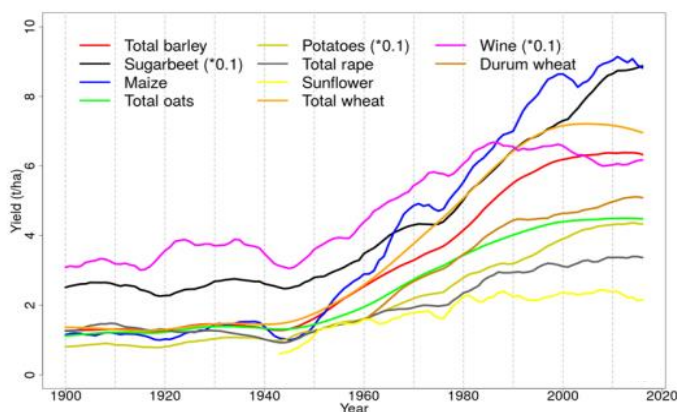


Figure 9: Tendances des rendements pour plusieurs cultures annuelles entre 1900 et 2016, données provenant d'AGRESTE (Schauberger et al, 2018).

1.3.4 Des solutions

Face aux nombreuses conséquences du changement climatique, il est nécessaire de s'adapter et d'anticiper. INRAE intervient dans ce contexte et notamment l'unité AgroClim. Pour cela, ils cherchent à développer des méthodes et des outils. Parmi eux, il y a les modèles de cultures comme STICS qui sont important dans la compréhension des processus.

Mais il existe aussi une approche qui est complémentaire à celle des modèles, c'est l'approche par indicateurs.

1.3.5 Les indicateurs liés à l'eau

Il existe 2 grands types d'indicateurs. Le premier est l'indicateur agroclimatique (figure 10). C'est un indicateur climatique appliqué à l'agriculture (Holzkämper et al. 2011). C'est un outil de mesure utilisé afin de déterminer des tendances climatiques et identifier les risques pour la production agricole dans une zone géographique donnée. Il est calculé sur une

phase calendaire (par exemple cumul de précipitations en juillet).

Il existe aussi des indicateurs écoclimatiques (Caubel et al., 2015) (figure 10). Ils permettent de caractériser les effets du climat sur les processus écophysologiques d'une espèce donnée, selon les stades phénologiques sensibles à cet effet. Ils sont calculés sur une phase phénologique (par exemple cumul de précipitations lors de la phase d'épiaison). Cet indicateur permet de prendre en compte la modification des périodes phénologiques évoqué dans la partie 1.3.2.

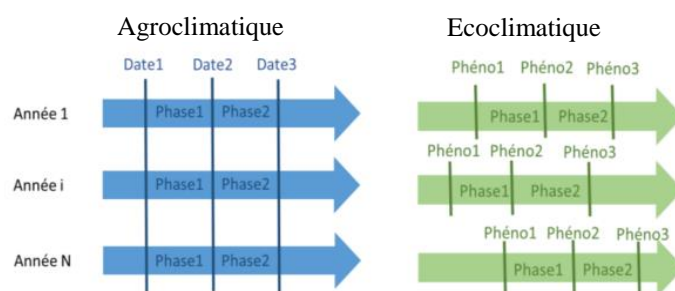


Figure 10: Schéma des 2 grands types d'indicateurs.

Cette étude se concentre sur les indicateurs agroclimatiques, ils seront ensuite réutilisés et convertis en indicateurs écoclimatiques dans des travaux ultérieurs d'Agroclim.

2) MATERIEL ET METHODES

2.1 Méthodologie générale

2.1.1 Détermination d'indicateurs

Pour définir des indicateurs agroclimatiques pour une culture, il faut dans un premier temps chercher quelles sont les stades de développement où la plante est vulnérable à l'effet climatique étudié (Caubel et al. 2015).

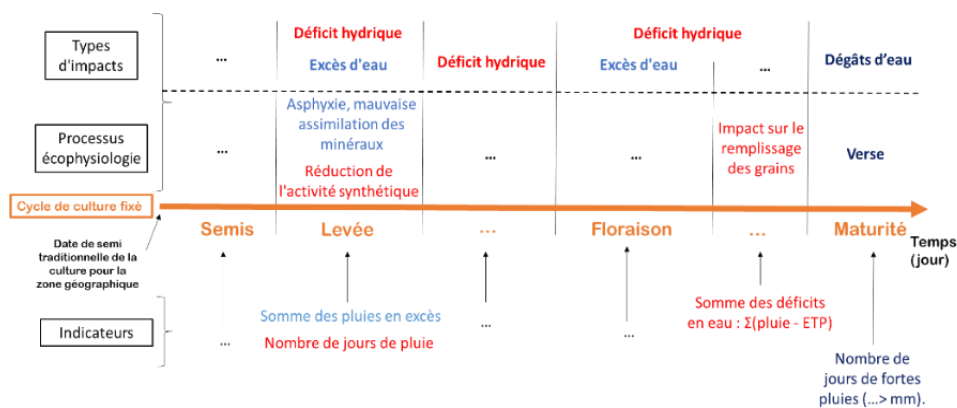


Figure 11: Illustration de la méthode de détermination d'indicateurs agroclimatiques.

Ensuite, il est nécessaire de caractériser le processus écophysiologique affecté par l'effet climatique durant la période sensible. À partir de ces connaissances, un ou plusieurs indicateurs climatiques sont calculés au cours de la phase calendaire choisie (Caubel *et al.* 2015). Par exemple un déficit hydrique trop important en fin de cycle cultural altère le remplissage des grains du Blé Tendre (Gate, 1995). Ce stade se produit généralement à la fin du mois de mai et la maturité du blé intervient à la fin du mois de juillet. Par conséquent, l'indicateur "P-ETP" lié au déficit hydrique est un indicateur agroclimatique pertinent s'il est cumulé entre le 20 mai et le 31 juillet. Cette méthode est illustrée en figure 11.

2.1.2 Déroulé du stage

L'objectif du stage est de définir des indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau en France. Pour cela la méthode décrite en figure 11 sera adoptée.

Une fois les indicateurs créés, ils seront calculés et normalisés. Enfin, pour des années sélectionnées où il y a eu des accidents climatiques hydriques, les résultats des indicateurs seront comparés aux pertes de rendement de ces mêmes années. Cela permettra de vérifier si la tendance donnée par les indicateurs est cohérente et fiable. Ces méthodes seront mises en application comme illustrée sur la figure 12.



Figure 12: Etapes de travail pour la définition d'indicateurs agroclimatiques caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau en France.

2.2 Détermination des risques climatiques et de leurs effets sur les cultures sélectionnées

Les étapes 1,2 et 3 de la figures 12 sont réalisées à partir de recherches bibliographiques sur les plateformes Web of science et Sciencedirect et à partir de divers rapports et thèses. La synthèse de ces travaux permet alors d'établir un inventaire des principaux risques climatiques sur les cycles des cultures choisies (maïs, blé tendre et dur, colza, tournesol, soja, pois, pomme de terre, pommier et l'abricotier).

Des seuils de tolérance seront ensuite établis, caractérisant les points de basculement des réponses écophysologiques des plantes à ces risques (par exemple, c'est au-delà de 3 jours d'exposition à un certain risque que le fonctionnement écophysologique de la culture est affecté de manière irréversible). Ils permettront de configurer les paramètres des indicateurs lors de leurs calculs.

Néanmoins, il est parfois difficile de fixer des seuils critiques, par exemple pour la sécheresse, car ses effets sont dépendants d'autres variable que les variables climatiques liées à l'eau (comme le type sol par exemple). Lorsque des difficultés pour déterminer les seuils sont rencontrés, une autre méthode de détermination de seuil est réalisée. Elle consiste à effectuer une analyse de la distribution des valeurs de l'indicateur sur toutes les mailles de la grille et sur la période historique de 30 ans (1990-2020). Le seuil critique de la fonction de normalisation

est fixé à la valeur du 1er quartile de cette distribution.

Des entretiens avec des écophysologistes et agronomes permettrons de confirmer et d'adapter la liste d'indicateurs et des seuils définis à partir des informations trouvées dans la bibliographie.

2.3 Données

2.3.1 *Données climatiques*

Les données météorologiques à l'échelle de la France proviennent du système de ré-analyse SAFRAN. Ce système est la combinaison de données de modèles météorologiques et d'observations de surface (Vidal *et al.*, 2010). Le système interpole ensuite ces données sur une maille de 8 x 8 km. Ce qui représente 8600 mailles pour la France métropolitaine. Le suivi d'un grand nombre de variables météorologiques est disponible de 1958 à aujourd'hui via la plateforme SICLIMA d'INRAE développée par AgroClim.

2.3.2 *Données de sol*

D'autres fichiers regroupant plusieurs attributs sont rattachés à la maille SAFRAN. L'occupation du sol provient de Corine Land Cover (2012), les données de sol de la Base de Données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1 / 1 000 000. Ces données sont utilisées dans SICLIMA pour le choix de mailles et le calcul du bilan hydrique, de la phénologie et des indicateurs agro ou éco-climatiques.

2.3.3 Données de rendement

La base de données de rendement par département de 1989 à 2022 pour les cultures de maïs, blé tendre et dur, colza, tournesol, soja et pois a été fournie par FranceAgriMer. Sur cette même période, une partie des rendements par département pour la pomme de terre, la pomme et l'abricot sont disponibles sur le site de chaque DRAAF régionale. Pour les données antérieures à 1989, elles sont disponibles sous forme d'archives écrites sur la banque de donnée numérique de l'INSEE. Ces données ne seront pas utilisées dans ce rapport, mais seront utilisées dans la suite du stage.

2.3.4 Conjonctures agricoles

Les conjonctures agricoles par région et par année jusqu'à 2013 sont fournies par FranceAgriMer. Les conjonctures antérieures à 2013 sont en partie disponibles sous forme d'archives sur la banque de donnée numérique de l'INSEE.

2.4 Les outils

2.4.1 Les outils de calcul et de normalisation des indicateurs

a) Siclima



Siclina est une plateforme d'INRAE. Elle permet d'extraire des données climatiques (SAFRAN pour les données de ré-analyse passées et DRIAS pour les projections climatiques futures) et de calculer et spatialisées des indicateurs. Siclima a été utilisé pour

extraire les données climatiques utiles aux calculs des indicateurs ainsi que pour analyser spatialement les résultats. La version 1.1.10 du 9 mai 2023 a été utilisée.



b) Getari

Getari est un outil de calcul d'indicateurs développé par Agroclim qui est en libre accès (<https://agroclim.inrae.fr/getari/>).

Getari permet de construire et de calculer ses propres indicateurs. L'avantage du logiciel est qu'il est possible de normaliser et d'agréger les indicateurs mais, contrairement à Siclima, il ne permet pas une représentation spatialisée des résultats. La version 1.1.10 en date du 9 mai 2023 a été utilisée.

2.4.2 L'outil de calcul des pertes de rendements



Le logiciel R (version 4.3.0) a été utilisé via RStudio d'une part pour calculer les résidus de rendement afin de déterminer les années avec des pertes de rendement extrêmes (voir partie 2.4) et d'autre part pour la création de cartes et de graphiques illustrant les pertes de rendements.

2.5 La méthodologie d'évaluation /diagnostic des résultats

Afin d'évaluer la capacité des indicateurs calculés à rendre compte des impacts d'accidents climatiques hydrologiques, les indicateurs calculés seront confrontés, à l'échelle du département, à des pertes de

rendement exceptionnelles imputables à ces accidents climatiques (sécheresses, excès d'eau) certaines années. Afin de vérifier si les pertes de rendement des années sélectionnées sont bien dues à un excès d'eau ou/et un déficit hydrique, nous nous baserons sur les rapports de conjonctures agricoles pour les années en question.

2.5.1 Détermination des années à rendement anormalement bas

a) Calcul des résidus

Sachant que les rendements ont pu évoluer en tendance durant la période 1989-2022 du fait des progrès génétiques, des modifications des pratiques ou de l'assolement par exemple, il a été nécessaire dans un premier temps de bien définir les anomalies de rendements annuelles par rapport non pas à un rendement moyen sur la période 1989-2022, mais par rapport à un rendement « attendu » tenant compte de cette tendance sur le long terme. Nous avons donc appliqué une méthode inspirée de la publication « Identifying indicators for extreme wheat and maize yield losses » (Ben-Ari *et al.*, 2016).

L'objectif de la méthode est d'obtenir un résidu entre les rendements observés et les rendements prédits par un modèle.

Le rendement résiduel pour une année en France est défini par la relation suivante :

$$r_t = Y_t - \mu_t$$

Où r_t est le rendement résiduel pour une année donnée, Y_t le rendement observé et le μ_t rendement prédit. Ainsi, les années où les

résidus de rendements sont inférieurs au quantile 0.9 sont considérées comme des années anormalement faibles. Les années extrêmes sont sélectionnées pour chaque culture avec cette méthode.

b) Choix du modèle de prédiction

En ce qui concerne le modèle de prédiction, il a été sélectionné après avoir testé tous les modèles présents dans « Identifying indicators for extreme wheat and maize yield losses » (Ben-Ari *et al.*, 2016). Pour l'exemple du blé Tendre avec les données 1989-2022, les courbes des modèles de prédictions des résidus sont représentées sur la figure 13. Après concertation au sein de l'équipe d'Agroclim, pour le moment le modèle de régression linéaire a été choisi car il offrait une bonne représentation des tendances, en restant réaliste. Cette méthode a permis de sélectionner les mêmes années à événements extrêmes que celles mentionnées dans les conjonctures agricoles.

c) Test de Mann-Kendall

Préalablement avant d'utilisé ce modèle, un test statistique de significativité de la tendance de Mann Kendall est réalisé. Le test de Mann-Kendall permet de déterminer avec un test non paramétrique si une tendance est identifiable dans une série temporelle. L'hypothèse nulle H_0 du test est qu'il n'y a pas de tendance. Après application (test réalisé sur R avec le package Kendall), si l'hypothèse H_0 est rejetée, on

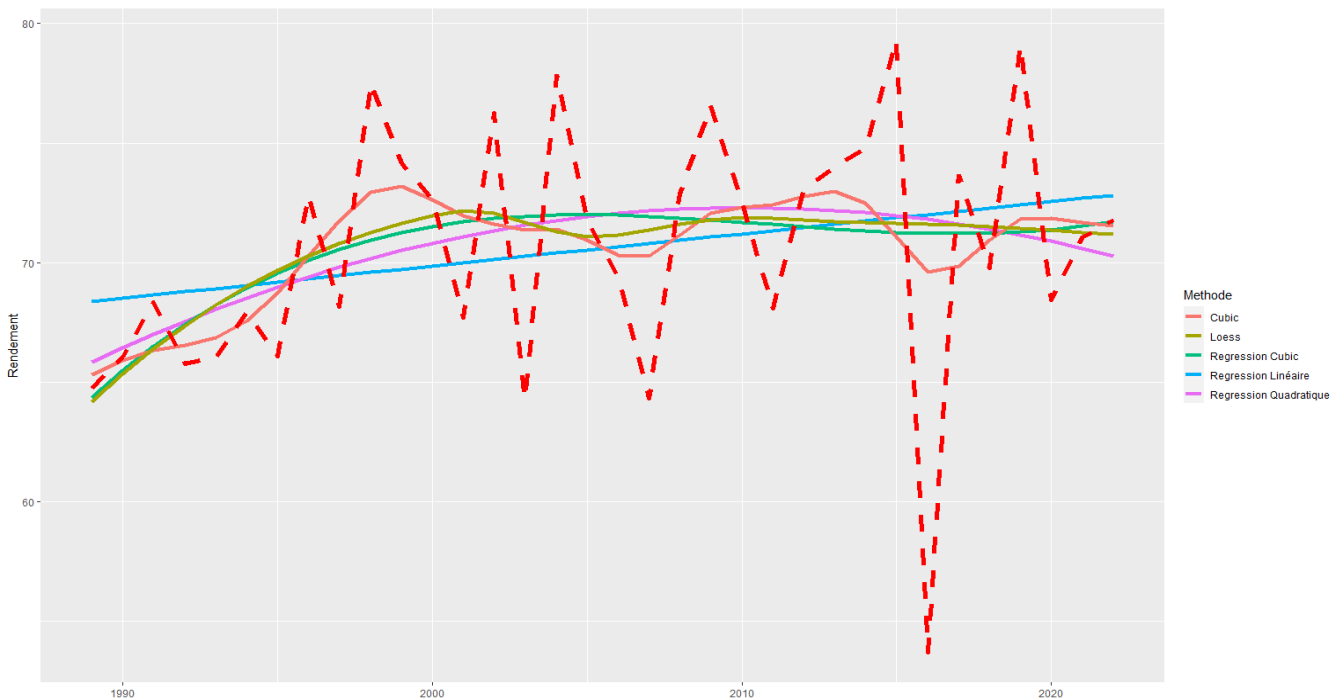


Figure 13: Les différents modèles de prédictions de rendement en Blé Tendre testés pour la France métropolitaine entre 1989 et 2022. La courbe en pointillé rouge représente les rendement réels observés.

applique la régression linéaire comme modèle de prédiction. Dans le cas où l'hypothèse H_0 ne serait pas rejetée, le résidu est calculé comme la différence entre le rendement annuel observé et le rendement moyen calculé sur la série 1989-2022.

2.5.2 Création de cartes de pertes de rendements à l'échelle départementale

À partir de la méthode décrite dans la partie précédente (2.4.1), 4 années exceptionnelles sont sélectionnées par culture étudiée. Pour chacune de ces années, la proportion de résidus de rendement par département est calculée avec la formule suivante :

$$rdt = \frac{Y_{dt} - \mu_{dt}}{\mu_{dt}} \times 100$$

Ici, μ_{dt} est le rendement prédit ou le rendement moyen sur la série 1989-2022, sa méthode de calcul dépend des résultats du test de Mann-

Kendall. Des cartes de proportions de pertes de rendement par département pour les années extrêmes sont ensuite construites à l'aide de R.

3) RESULTATS

3.1 Blé Tendre

3.1.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces



a) Le déficit hydrique

Tout d'abord, le blé tendre d'hiver est moins sensible au déficit hydrique estival que les cultures d'été (CLIMATOR, 2010). En général, sur tout le cycle du blé, le stress hydrique est pénalisant, il réduit la hauteur des tiges, mais aussi la taille des feuilles et leur surface verte, ce qui diminue l'indice foliaire et sa durée de vie. Par conséquent, cela entraîne une réduction de la capacité de photosynthèse du couvert.

(Gate 1995). Il est possible de considérer que le taux d'évapotranspiration de la plante est limité lorsque la réserve hydrique est inférieure à 40% de la réserve utile (L.Hess *et al.*, 2015). On peut alors considérer ce seuil comme le seuil de déficit hydrique pour le blé.

Durant la période de germination et de levée un déficit hydrique provoque la mort des graines (Bradford et Bewley, 2002). Pendant la phase de tallage et d'élongation, le manque d'eau entraîne une diminution de la vitesse des talles (Gate, 1995).

Durant la période de montaison et épiaison, un déficit hydrique provoque la diminution du nombre d'épis par plante (chute de 20% si le déficit hydrique atteint 20%) (Gate, 1995).

De plus, le déficit induit une réduction de l'assimilation du carbone qui se traduit par des capacités de stockage de carbone réduites (Barnabas *and al.*, 2008).

D'autre part, après la floraison jusqu'à la maturité, il y a un raccourcissement de la période de remplissage et un impact sur la maturation des grains en cas de sécheresse. Un déficit atteignant 45% peut engendrer entre 15 et 25q/ha de perte de rendement (Gate, 1995).

b) Les excès d'eau

En cas d'excès d'eau l'oxygène devient limitant dans le sol ce qui crée des conditions d'hypoxies et même parfois d'asphyxies au niveau des racines.

Les différentes espèces de blé ne présentent pas la même sensibilité à l'excès d'eau. Le Triticale

est plus résistant que le Blé tendre qui lui-même est plus tolérant que le Blé dur (Arvalis 2013).

Les conséquences d'un engorgement du sol vont dépendre de la période à laquelle il intervient. Pour le stade de semi-germination Cannell et Belford (1982) ont recensé plusieurs travaux, leur étude permet d'estimer une durée d'engorgement létale pour 50% des graines à partir de 5 jours consécutifs (figure 14).

Le tallage est la phase la plus tolérante, les besoins instantanés en photosynthèse sont faibles durant cette phase (Gate 1995). On peut

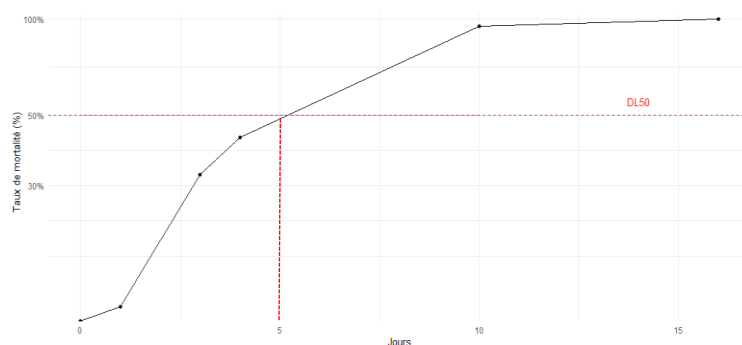


Figure 14: Durée d'engorgement létale pour 50% des graines.

donc supposer qu'au stade tallage, une submersion de quelques jours (moins d'une semaine) engendrera une pénalisation de la culture, mais pas sa disparition complète (Arvalis 2013). Selon les informations trouvées dans la littérature, à partir du stade de développement de la première feuille, les risques provoqués par les excès d'eau sont moins importants. Exceptés les risques de dégâts d'eau.

c) Les dégâts d'eau

Les fortes précipitations affectent la plante par le phénomène de verse (Gate, 1995). En effet, des précipitations extrêmes peuvent provoquer

la flexion des tiges (Neenan et Spencer-Smith, 1975) et un problème d'ancrage des racines dans le sol (Crook et Ennos, 1993).

Le risque de verse peut apparaître quand il y a au moins deux jours entre le stade de floraison et la récolte avec des précipitations quotidiennes supérieures à 40 mm (Trnka *et al.*, 2015).

3.1.2 Les indicateurs



a) Choix des indicateurs

Les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau sur l'espèce (partie 3.1.1), des travaux en cours de l'unité AgroClim (projet REGARD) et des résultats d'autres travaux de la littérature. Pour

chaque type d'impact 2 indicateurs sont choisis. D'une part, un indicateur qui utilise uniquement des données climatiques (comme P-ETP) et d'autre part, un indicateur qui utilise des données climatiques et pédologique. Cette sélection a pour objectif d'utiliser un indicateur relativement facile à calculer et un autre plus élaboré, avec un calcul plus complexe et un plus grand nombre de variables.

b) Diagramme des indicateurs retenus

La figure 15 synthétise les périodes de vulnérabilité du blé en fonction des types d'impacts, les processus ainsi que les seuils, accompagnés des indicateurs sélectionnés.

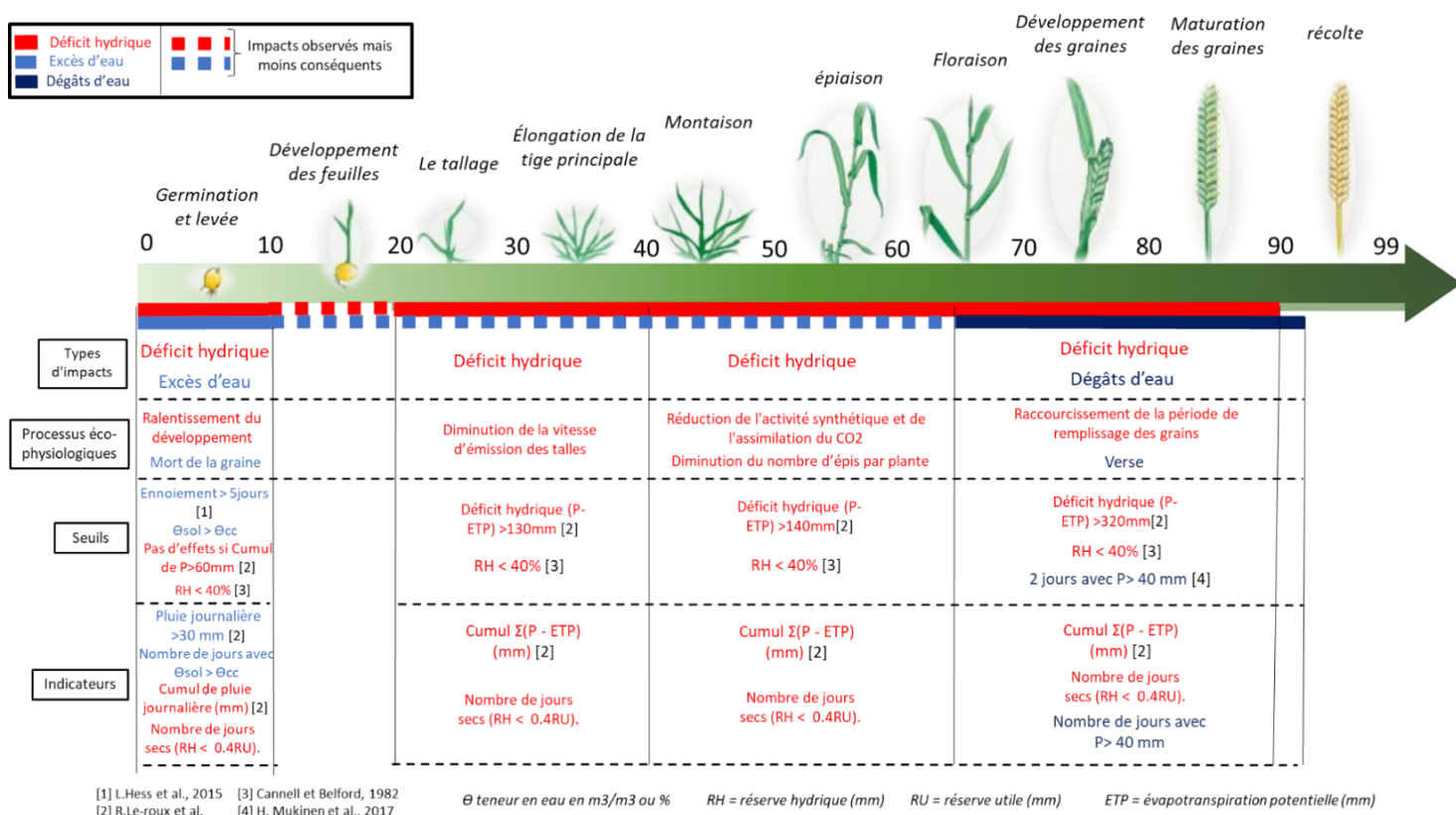
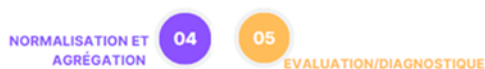


Figure 15: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Blé tendre.

3.1.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



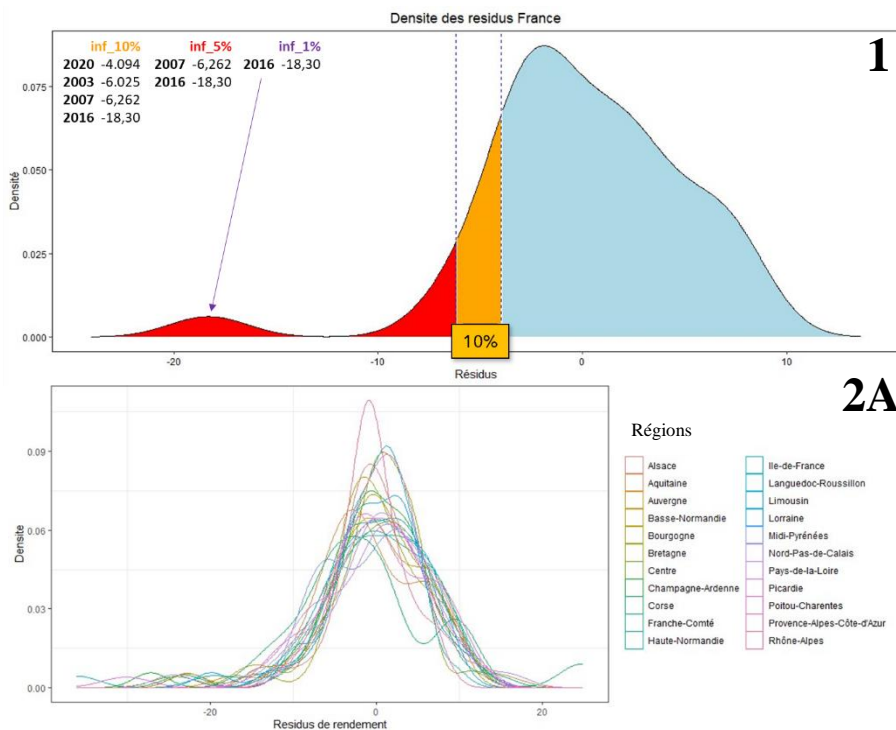
a) Les années extrêmes

À l'aide du modèle de prédiction et du logiciel R les résidus de rendement ont été calculés et une courbe de densité a été établie pour la France (figure 16(1)) et pour les régions françaises (2A). Les années inférieures au quantile 10% pour la France sont visibles sur la figure (1) tout comme les régions et les années inférieures au quantile 5% (2B).

b) Année 2016

D'après les résultats de l'analyse de rendement (figure 16), l'année 2016 apparaît comme la plus exceptionnelle de toutes les années

analysées (1989-2022) pour le Blé tendre. En analysant la proportion de perte de rendement au niveau du département (figure 17) on s'aperçoit que c'est la partie nord de la France qui fut la plus touchée. L'analyse des conjonctures agricoles (disponible en intégralité en annexe) a permis d'expliquer ces pertes par des conditions beaucoup trop humides au printemps. Des indicateurs ont été calculés, agrégés et spatialisés avec le logiciel SICLIMA. Tous les indicateurs sélectionnés sur la figure 16 n'ont pas pu être calculés pour le moment car ils ne sont pas disponibles sur le logiciel. Une multitude d'indicateurs disponibles sur SICLIMA ont été testés sur plusieurs phases du cycle du blé, les résultats



Régions	Annees	residus
Bretagne	1989	-16.97736
Haute-Normandie	1993	-16.80179
Aquitaine	1993	-19.88114
Champagne-Ardenne	2003	-13.31767
Ile-de-France	2003	-14.66731
Franche-Comté	2003	-15.68929
Centre	2003	-15.78199
Alsace	2003	-17.58280
Lorraine	2003	-18.64304
Rhône-Alpes	2003	-20.60846
Bourgogne	2003	-22.11175
Auvergne	2003	-28.90178
Nord-Pas-de-Calais	2007	-15.30680
Basse-Normandie	2007	-17.55229
Bretagne	2007	-20.41039
Poitou-Charentes	2011	-20.19121
Pays-de-la-Loire	2016	-15.35190
Basse-Normandie	2016	-21.24326
Haute-Normandie	2016	-23.05620
Limousin	2016	-23.56536
Nord-Pas-de-Calais	2016	-27.63506
Lorraine	2016	-30.01699
Alsace	2016	-30.97167
Champagne-Ardenne	2016	-34.68595
Centre	2016	-35.32562
Picardie	2016	-35.49588
Franche-Comté	2016	-35.67627
Bourgogne	2016	-35.68528
Ile-de-France	2016	-45.49014
Poitou-Charentes	2020	-15.94993
Pays-de-la-Loire	2020	-20.47545
Poitou-Charentes	2022	-16.78203
Languedoc-Roussillon	2022	-22.72586
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	2022	-28.06591

2B

Figure 16: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en Blé tendre à l'échelle de la France (1) et de ces régions (2A) (2B). Les résidus sont la différence entre le rendement prédit par le modèle de régression et le rendement observé. La couleur saumon représente les régions présentes dans les 5% des années les plus extrêmes et la couleur rouge les 1%.

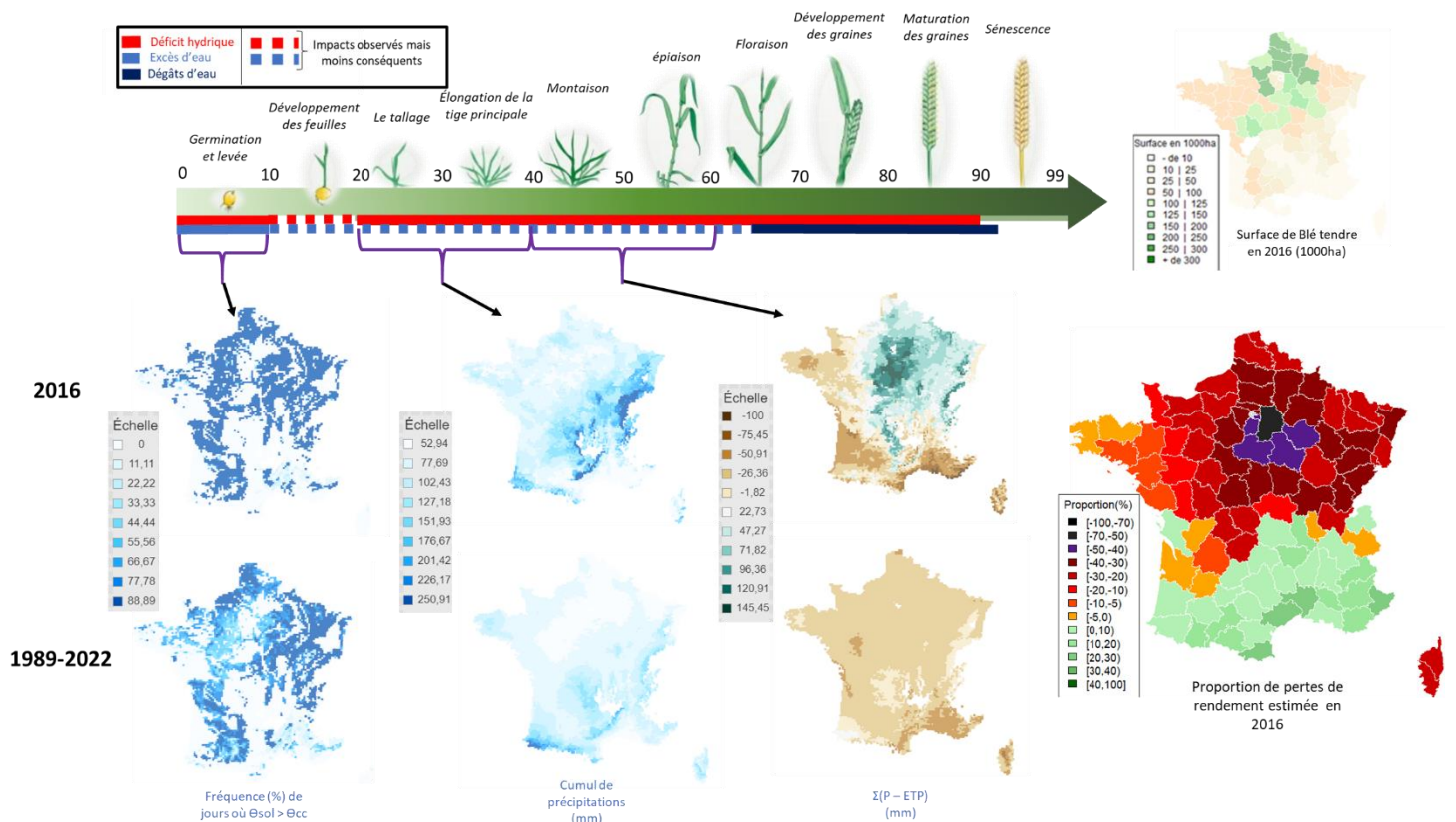


Figure 17: Proportion de pertes de rendement estimée en 2016 pour le Blé tendre et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

qui semblent le mieux expliquer les pertes de rendement sont illustrés sur la figure 17.

Il est possible d'établir un lien entre les résultats des indicateurs d'excès d'eau et les pertes de rendements. En effet, pour un grand nombre de département du Nord de la France :

- La fréquence de jours où la teneur en eau du sol dépasse la teneur en eau à la capacité au champ est supérieure à la normale pendant la germination.
- Les excès d'eau $P > ETP$ ont été extrêmes en période de montaison et d'épiaison.

Dans notre cas, les indicateurs testés semblent bien estimer les pertes liées aux excès d'eau.

c) Année 2020

En 2020 les pertes de rendement surviennent majoritairement dans la partie Ouest de la France (figure 18). D'après l'analyse des conjonctures agricoles (disponible en intégralité en annexe), de très nombreux facteurs sont responsables de ces pertes de rendements. Cependant le facteur hydrique semble avoir impacté certaines phases du cycle de culture. Plusieurs indicateurs ont été testés, le plus robuste semble être la somme des excès d'eau ($P-ETP$).

Un excès d'eau important est d'abord survenu dès le développement des premières feuilles pour les régions de la moitié Ouest. Ensuite, du tallage à l'élongation, c'est le Sud-ouest qui

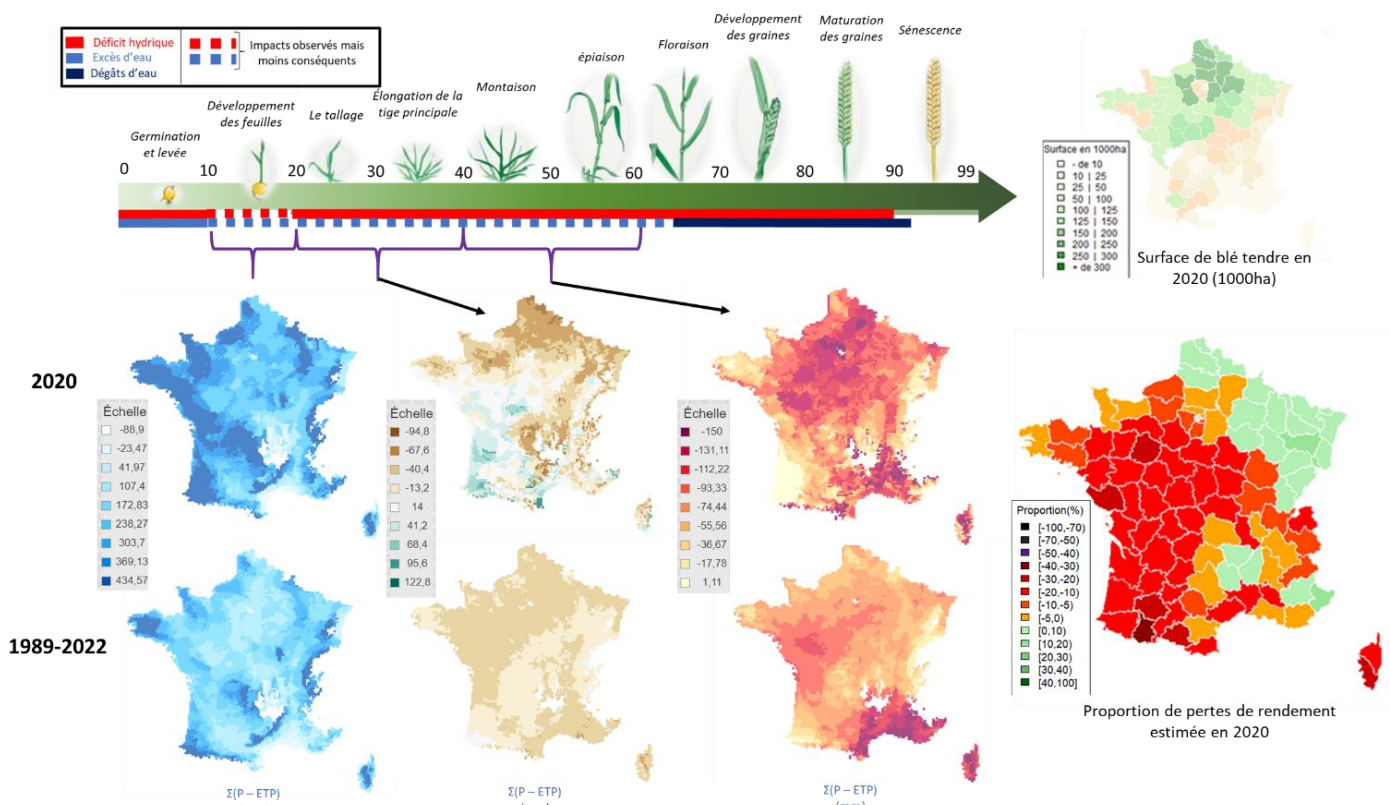


Figure 18: Proportion de pertes de rendement estimée en 2020 pour le Blé tendre et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

endure des excès d'eau. Le Nord-ouest quant à lui est touché par un déficit hydrique important pendant la montaison et l'épiaison.

Les indicateurs testés pour l'année 2020, semblent en partie estimer les pertes liées aux excès d'eau pour certaines régions françaises. Cependant l'explication des pertes par ces indicateurs ne semble pas être significative.

3.2 Maïs

3.2.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces



a) Le déficit hydrique

Dans un premier temps, concernant la tolérance du maïs aux déficits hydriques pendant la phase

végétative, les avis sont partagés dans la littérature. Cependant les résultats obtenus en 2004 par Recept Çakir et les affirmations d' El Neomani *et al.* (1990), Alam et Mahub-ul Alam (1985) et R. H. Shaw and J. E. Newman (1976) appuient le fait que le stress hydrique pendant les premières semaines de la phase végétative limite la croissance des plantes.

De plus, un risque de perte de rendement irrécupérable est encouru si le maïs est exposé à un stress hydrique sévère et prolongé pendant le stade de semis (Recept Çakir, 1996).

Durant le développement des feuilles, la plante est fortement affectée par un stress hydrique sévère. Ce stress engendre une réduction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté et de l'efficacité d'utilisation du

rayonnement, ce qui a pour conséquence de réduire la LAI et la biomasse. Ces effets pourraient s'expliquer par une diminution de la croissance des plantes, une émergence retardée et une taille limitée des feuilles, sachant que l'allongement des feuilles est parmi les processus végétatifs les plus sensibles au manque d'eau (Hsiao, 1973).

Lors de l'apparition des fleurs mâles (panicules) et de l'inflorescences femelles, le maïs est très sensible au stress (R. H. Shaw and J. E. Newman. 1976).

À ce moment-là, une teneur en eau faible du sol peut réduire les rendements en moyenne de 5% par jour ; dans des conditions très faibles, les pertes peuvent dépasser 10 % par jour et sous un stress extrême, la fertilisation du maïs pourrait même ne pas se produire, entraînant une perte totale de récolte (R. H. Shaw and J. E. Newman. 1976).

Le stress hydrique à la floraison a un effet important sur la fixation du grain sur l'épi et par conséquent sur le nombre de grains par plante. Différents travaux (Musick et Dusek, 1980 et Doorenbos et Kassam, 1979) ont démontré qu'un déficit hydrique de 2 à 7 jours au stade de l'apparition des fleurs mâles (panicules) conduit à une réduction du rendement en grain jusqu'à 22 et 50%.

Par ailleurs, les plantes exposées à un déficit hydrique durant 5 jours autour de la pollinisation permettaient aux embryons de se former. Cependant, dans cette situation, l'amidon des ovaires est épuisé, il y a donc un

avortement qui se produit (Zinselmeier *et al.* 1999).

La figure 19 met en évidence la période critique de sensibilité à la sécheresse (Moule 1980).

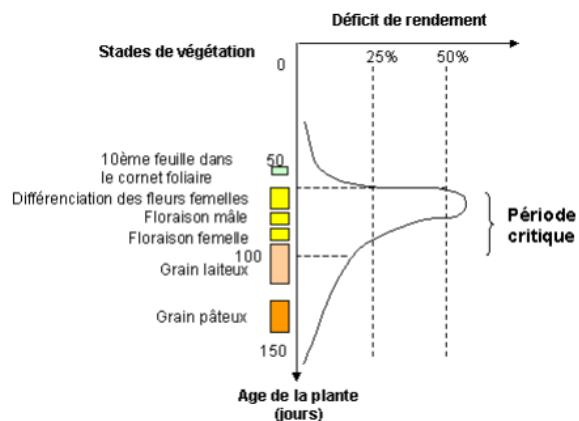


Figure 19: La période critique de sensibilité à la sécheresse du maïs (Moule 1980).

Enfin, durant les 6 premières semaines de remplissage, il peut y avoir une réduction du rendement final allant jusqu'à 5 % par jour. Le stress hydrique peut engendrer un échaudage des grains du haut de l'épi ou quelques fois sur un ou plusieurs rangs (Tshiabukole Kabongo 2018).

b) Les excès d'eau

En général, l'engorgement influence la physiologie et la morphologie chez le Maïs. Une de ses principales conséquences est l'arrêt de la croissance racinaire (Chao Huang *and al.*, 2022).

Dans un premier temps, les conséquences d'un engorgement prolongé des graines diffèrent selon les variétés.

Dans tous les cas, les graines de maïs qui ont commencé à germer avant l'engorgement du sol ont peu de chances de lever (Adam C *et al.*,

2021). Les résultats d'un groupe de chercheurs américains (Cobb *et al.*, 1995) démontrent que si la graine a commencé à germer 3 jours avant des conditions d'anoxies dues à un ennoiment, et que ces conditions se maintiennent durant 4 jours, seulement 3 à 6 % des graines émergent (tableau 3). En revanche, si la graine n'a pas commencé à germer avant un ennoiment, elle semble parvenir à germer malgré une période en condition d'anoxie (tableau 3).

Tableau 3: Taux de germination en fonction de la durée et du moment d'exposition des graines à l'ennoiment (Cobb *et al.*, 1995).

Days of germination before anoxia	Days in anoxia		
	2	4	6
0	98.1 ± 3.2	90.2 ± 4.6	91.3 ± 7.6
1	81.5 ± 5.3	88.3 ± 8.2	52.6 ± 7.9
2	76.4 ± 6.1	66.5 ± 5.9	13.2 ± 8.2
3	88.3 ± 2.9	6.2 ± 3.2	8.2 ± 4.2

De plus, durant les phases d'apparition de la troisième feuille, de la sixième feuille et de la floraison, la LAI diminue de façon significative lorsque la durée d'ennoiment dépasse les 2 jours. La conséquence directe est une diminution de la surface photosynthétique effective des feuilles et par conséquent, une perturbation de l'accumulation de matière sèche et finalement une diminution des rendements (Chao Huang *and al.*, 2022).

En cas d'ennoiment au stade V6 (apparition de la sixième feuille), la longueur et le diamètre de l'épi diminuent et plus l'ennoiment est long, plus la diminution est importante (Chao Huang *and al.*, 2022).

En outre, un ennoiment à ce stade inhibe significativement la croissance végétative du maïs, mais également la floraison mal et la formation de soies (au stade de la floraison femelle) des plantes (Chao Huang *and al.*, 2022). Tous ces événements engendrent une réduction finale du rendement (figure 18).

Des problèmes similaires peuvent subvenir au stade V3 (apparition de la troisième feuille) et VT (Floraison mal du maïs) tout comme dans une moindre mesure au stade R3 (Grain laiteux) (Chao Huang *and al.*, 2022). Cependant, ces stades sont moins sensibles que le stade V6 (Ren *and al.*, 2014) (figure 20).

c) Les dégâts d'eau

La verse sur le Maïs est peu fréquente à l'heure actuelle grâce au matériel génétique disponible. Le plus souvent, elle est observée en fin de cycle, les principales causes sont le vent violent, une phytotoxicité et des maladies fragilisant le système racinaire.

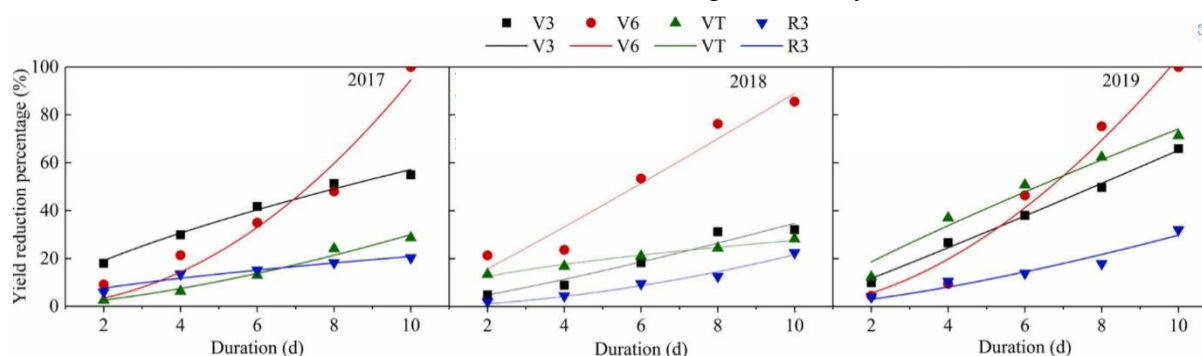


Figure 20: Relation entre la réduction du rendement du maïs, le stade qui subit un ennoiment et la durée d'ennoiment pour trois années entre 2017-2019. (Chao Huang *and al.*, 2022).

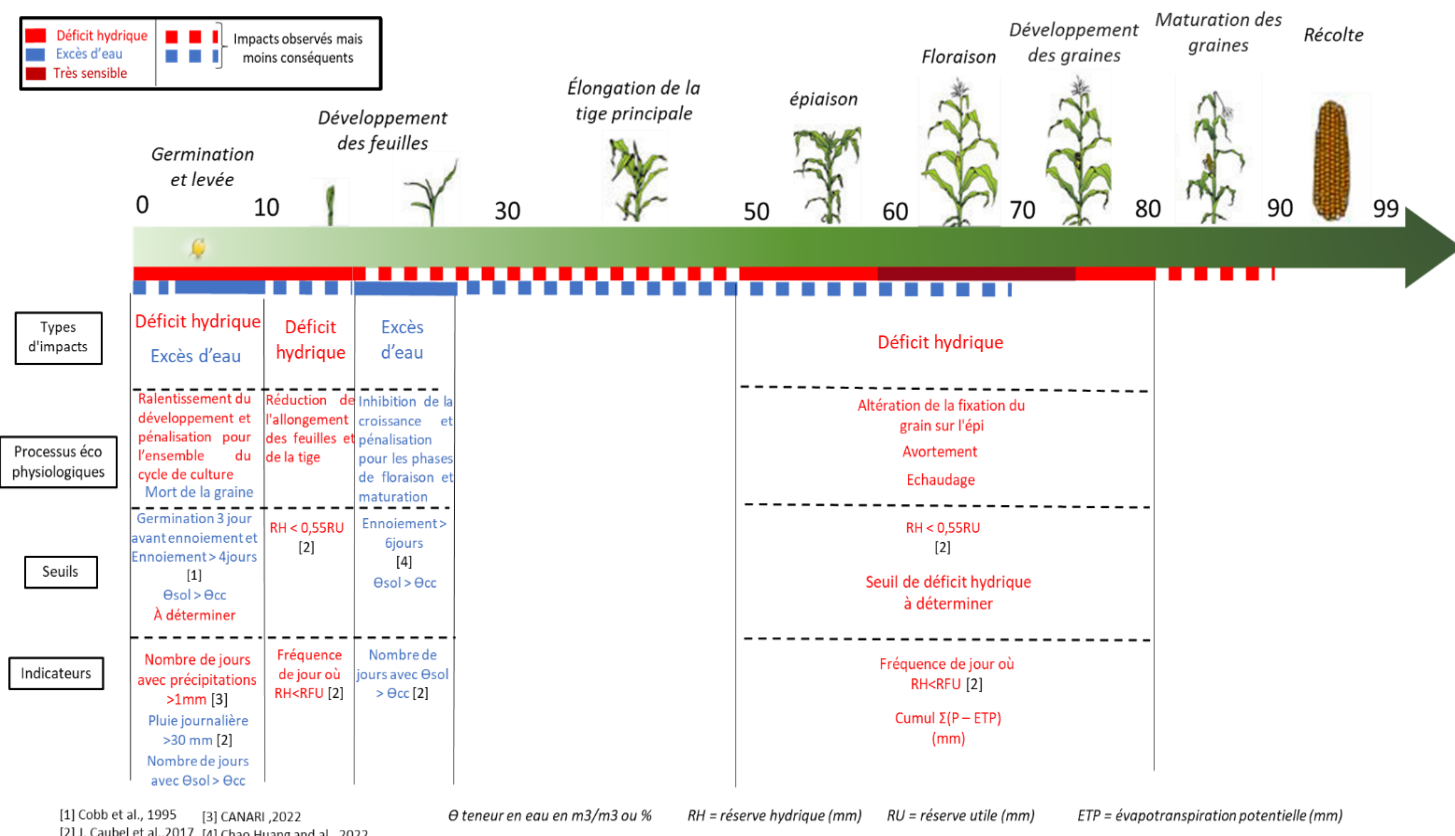


Figure 21: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Maïs.

Mais il semble ne pas y avoir de verse due à des problèmes hydriques ou de dégâts d'eau. De plus, les fortes précipitations peuvent causer des dommages sur les cultures de Maïs après le stade 8 feuilles, mais ces dommages restent plutôt faibles et ne sont pas irréversibles (ARVALIS 2022).

3.2.2 Les indicateurs



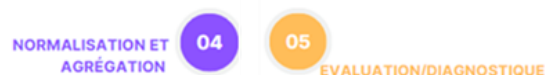
a) Choix des indicateurs

Les indicateurs agroclimatiques et les seuils retenus pour le moment sont présentés sur la figure 21.

Tout comme pour le blé, les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau sur l'espèce (partie

3.2.1), des travaux de l'unité AgroClim (Caubel *et al.*, 2017) et des résultats d'autres travaux de la littérature.

3.2.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



a) Les années extrêmes

Les années inférieures au quantile 10% pour la France sont visibles sur la figure 22 (1) tout comme les régions et les années inférieures au quantile 5% 22(2b). Il apparaît que les années 1990 et 2022 sont les années les plus exceptionnelles de la série analysée.

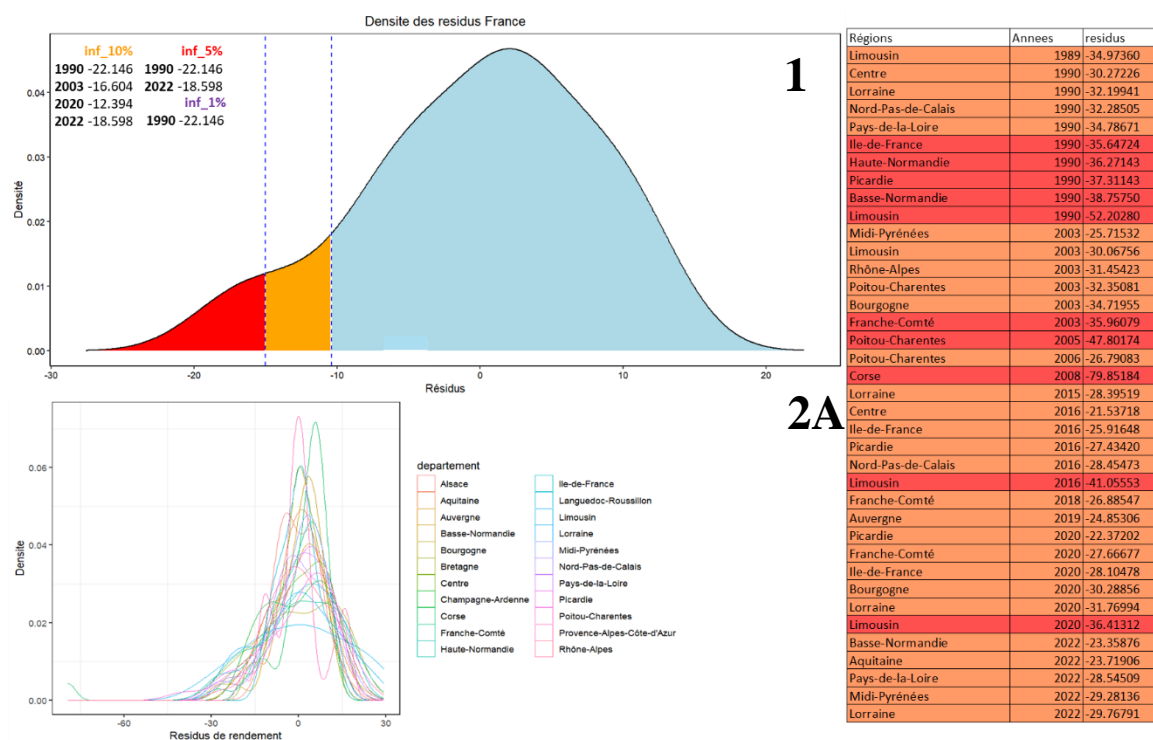


Figure 22: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en Maïs à l'échelle de la France (1) et de ces régions (2A) (2B). Les résidus sont la différence entre le rendement prédit par le modèle de régression et le rendement observé. La couleur saumon représente les régions présentes dans les 5% des années les plus extrêmes et la couleur rouge les 1%.

a) Année 1990

L'année 1990 apparaît comme la plus exceptionnelle de toutes les années analysées (1989-2022) pour Maïs. C'est presque la totalité de la France qui a subi des pertes importantes, en particulier les régions de l'Ouest (figure 23). L'analyse des conjonctures agricoles (disponible en intégralité en annexe) a permis d'expliquer ces pertes par une sécheresse impressionnante apparue en juillet et en août. Cette sécheresse est révélée par les indicateurs utilisés du stade BBCH 50 à 85 (figure 23a). Comme l'indicateur « cumul de précipitations » indiquait un résultat de 0 mm sur toute la période floraison – maturation dans toute la France, l'indicateur « humidité relative » a été utilisé comme analyse

complémentaire pour essayer de détecter les régions les plus touchées par la sécheresse.

b) Année 2022

Comme en 1990, c'est toute la France qui est concernée par des pertes de rendements importantes. La Lorraine, les Pays de la Loire et le Midi-Pyrénées sont les régions les plus affectées. Un léger déficit hydrique climatique est observé du stade développement de la dixième feuille au stade d'épiaison. Mais encore une fois, l'origine des pertes importantes de rendement provient d'une sécheresse en été. Les indicateurs utilisés en figure 23b confirment qu'il y a eu un manque important de précipitation avant floraison et un sol sec provoquant un déficit hydrique après floraison.

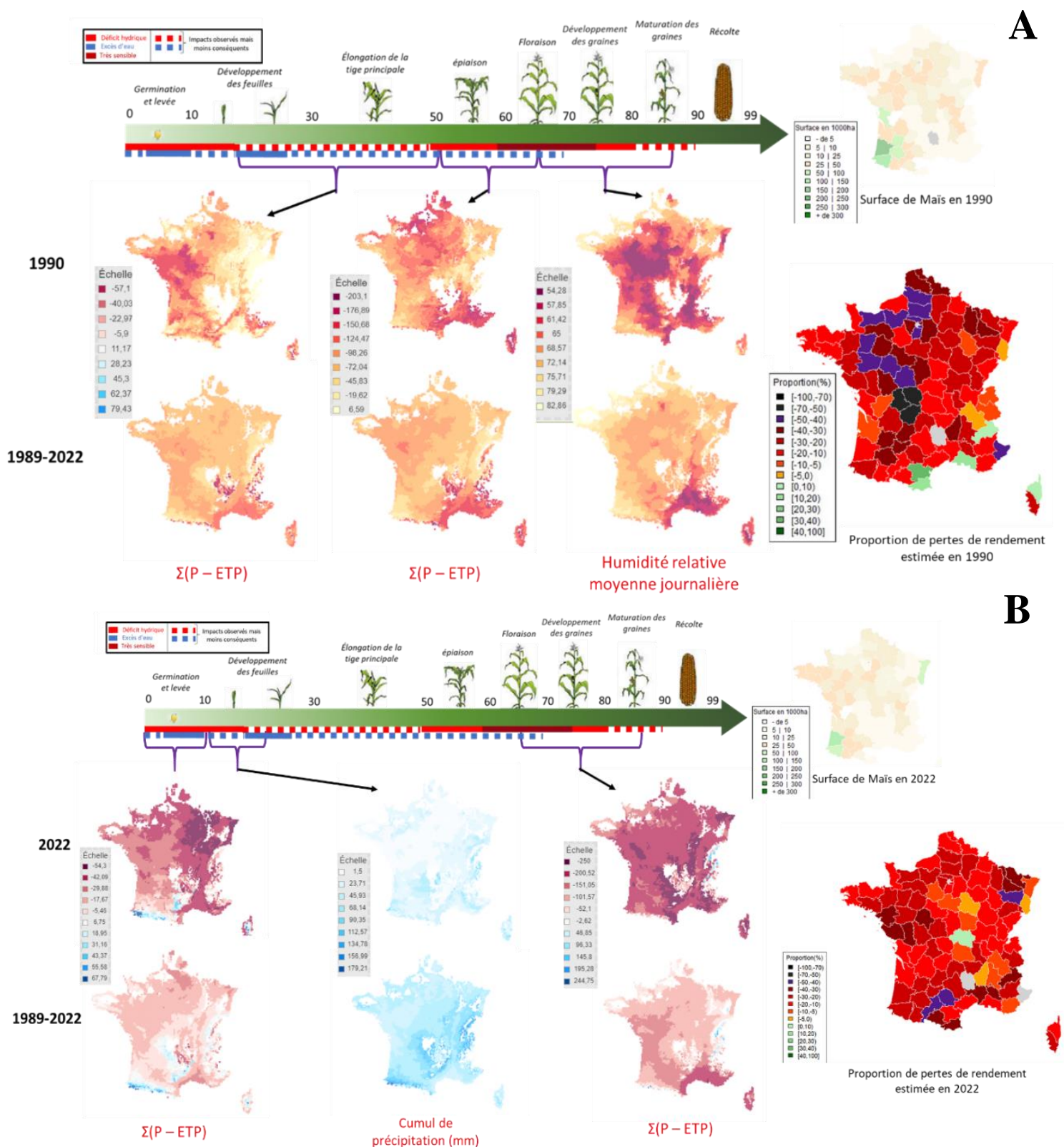


Figure 23: Proportion de pertes de rendement en Maïs et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques pour l'année 1990 (A) et l'année 2022 (B).

3.3 Colza

3.3.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces



a) Le déficit hydrique

Il a été démontré que le déficit hydrique provoque une perte significative du rendement en grains et impacte toutes les composantes du rendement (Andersen et al. 2002). Le colza a besoin d'environ 600 mm d'eau au court de son cycle (Terres Inovia, 2019a).

Un manque d'eau lors du semis du colza en fin d'été ou début d'automne peut engendrer une levée irrégulière ou tardive (Chambre agriculture pays de la Loire, 2022). Plus tard après la levée, un stress hydrique peut ralentir la croissance de la tige (figure 24).

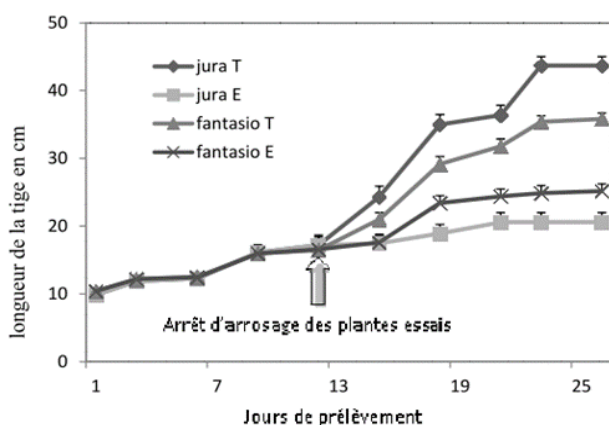


Figure 24: Croissance en longueur de la tige 4 mois après le semis de plantes témoins (arrosées chaque jour) et stressées (aucun arrosage) des variétés fantasio et jura en fonction du temps. Un point représente la moyenne de 90 répétitions (Toumi et al., 2013).

La période où le colza est le plus sensible à la sécheresse se trouve plus tard dans le cycle du colza, au moment de la floraison

(Bouchereau A et al, 1996). En effet, la sensibilité est forte entre le début de la floraison et le stade de développement des 10 premières siliques bosselées (BBCH 73) (Terres Inovia, 2019b).

Lorsque les gousses se forment, on observe une diminution du rendement en graines, principalement en raison d'une réduction du nombre de gousses par plante (M. R. Ahmadi and M. J. Bahrani, 2009). En fin de cycle la sécheresse limite le PMG sans possibilités de compensation. Les résultats d'essais montrent qu'en cas de stress important à cette période (Terres Inovia, 2019b).

L'étude de F. Shekar *et al.* en 2015 affirme également que la période entre la floraison et la fin de la formation des graines est la période la plus influencée par le stress hydrique .

Il est important de noter que les feuilles et les gousses jouent un rôle essentiel dans la photosynthèse, et pour obtenir un rendement optimal en graines, il est crucial que le sol présente une humidité adéquate.

Bien que le stress hydrique pendant la période de remplissage des graines n'affecte pas la capacité de la plante à produire des graines (quantité de graines par plante), il réduit la capacité de la source (photosynthèse), entraînant ainsi une diminution du poids des graines et donc du rendement en graines (M. R. Ahmadi and M. J. Bahrani, 2009).

b) Les excès d'eau

L'engorgement peut provoquer une réduction de la teneur en chlorophylle, des activités de la superoxyde dismutase et de la catalase, de l'accumulation de malondialdéhyde, une diminution de la capacité d'oxydation des racines, une augmentation de la production d'éthylène, une altération de la photosynthèse, des changements morphologiques défavorables et une diminution du rendement en graines chez les plantes de colza (Weijun Zhou 1995).

En ce qui concerne les caractéristiques morphologiques dans l'expérience de Weijun Zhou et al. en 1995, l'engorgement a conduit à une diminution du nombre de feuilles vertes, de la surface foliaire, de la hauteur de la plante et de la largeur de la tige. Les stades de la levée et de l'apparition des bourgeons floraux ont eu les effets les plus marqués. De plus, l'engorgement a réduit le nombre de gousses par plante et le nombre de graines par gousse, entraînant une diminution significative du rendement en graines.

Les effets physiologiques et de rendement de l'engorgement varient selon les traitements à différents stades de croissance. Le stade de la levée est le plus vulnérable (S. Channaoui et al., 2019 ; Chambres agriculture pays de la Loire, 2022), suivi de l'apparition des bourgeons floraux et de la formation des gousses. En revanche, les plantes soumises à l'excès d'eau au stade de la floraison peuvent mieux résister à une exposition prolongée. L'excès d'eau est

la principale contrainte physiologique pendant le stade de la levée et il existe une corrélation significative entre le rendement en graines et la croissance pendant cette période (Weijun Zhou 1995).

D'autre part une autre expérience affirme que l'engorgement pendant l'allongement de la tige provoque une perte de rendement plus élevée (25%) que lors de l'apparition des bourgeons floraux (15%). Les stades de développement végétatif, tels que la croissance de la tige, sont plus sensibles à l'engorgement que les stades reproductifs, comme l'apparition des bourgeons floraux (figure 25)(Wollmer, A.-C et al., 2017).

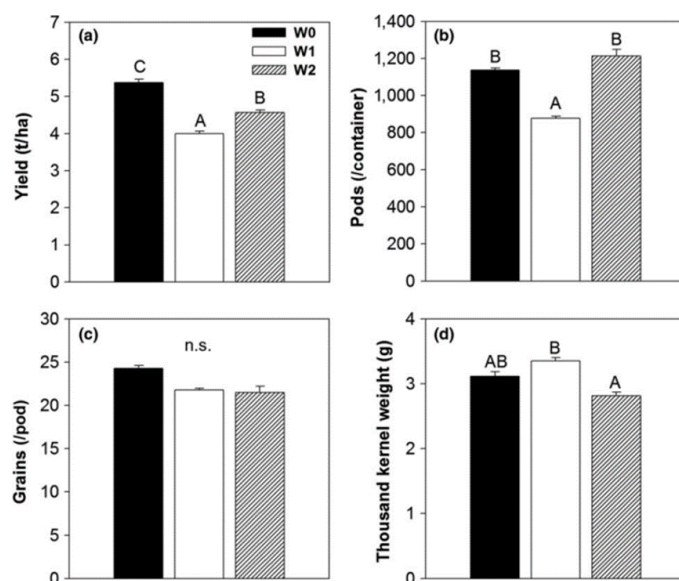


Figure 25: Influence de l'excès d'eau sur le colza (Wollmer, A.-C et al., 2017).

(a) Rendement, (b) gousses par conteneur, (c) grains par gousse et (d) mille grains poids ont été déterminés. Les traitements étaient entièrement drainés (W0), gorgés d'eau à BBCH 31 (W1) ou gorgés d'eau à BBCH 55 (W2). Les barres représentent moyenne + erreur standard (n = 3).

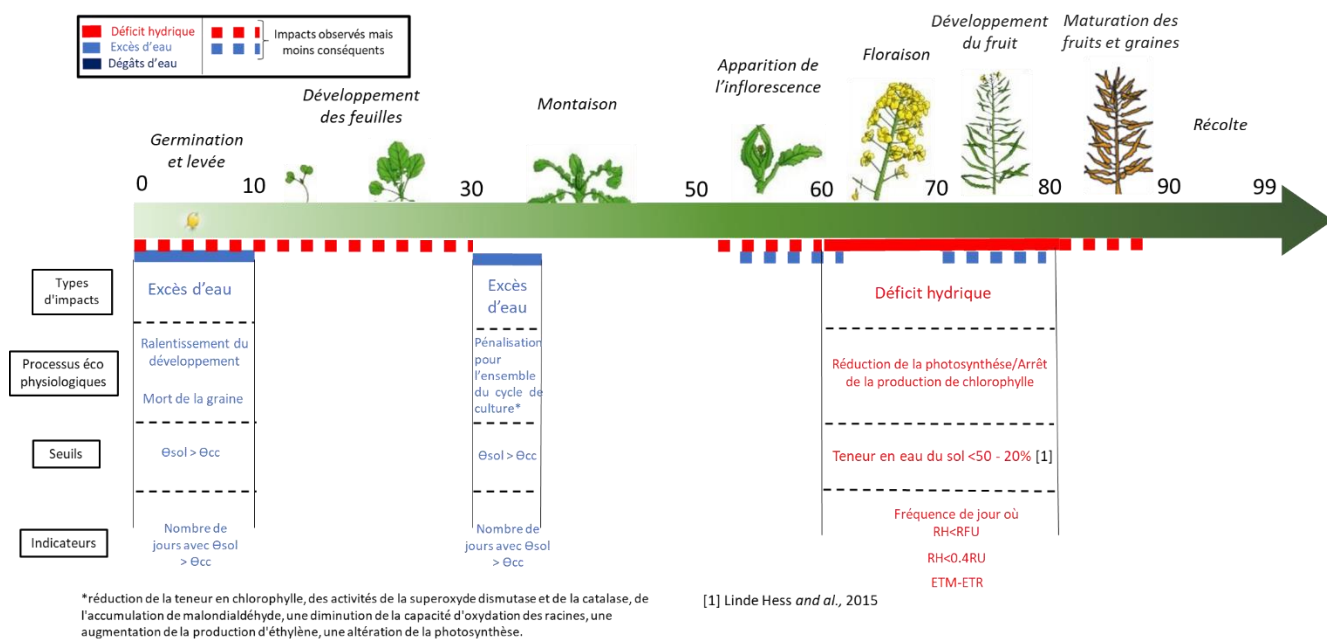


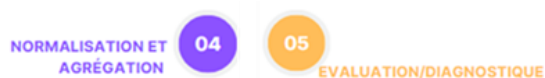
Figure 26: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Colza.

3.3.2 Les indicateurs

Les indicateurs agroclimatiques et les seuils retenus pour le moment sont présentés sur la figure 26.

Les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau sur l'espèce (partie 3.3.1), et des résultats d'autres travaux de la littérature.

3.3.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



a) Les années extrêmes

Les années inférieures au quantile 10% pour la France sont visibles sur la figure 27. Il apparaît que les années 2001 et 2020 sont les années les plus exceptionnelles de la série analysée.

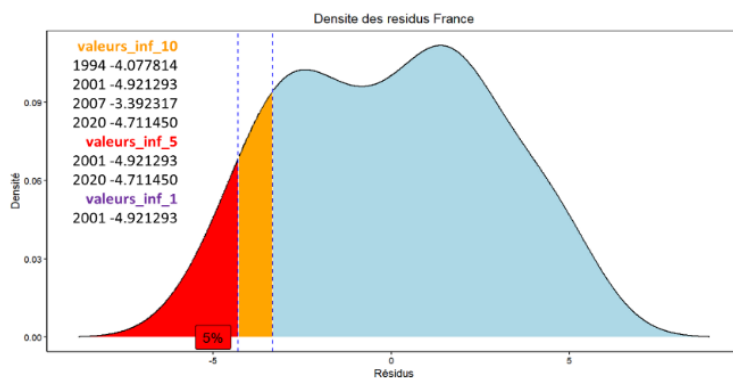


Figure 27: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en colza à l'échelle de la France.

b) Année 2001

L'année 2001 apparaît comme la plus exceptionnelle de toutes les années analysées (1989-2022) pour le Colza. Seule les régions de l'Ouest ont été épargnées par des pertes de rendements importantes (figure 28).

D'après les conjonctures agricoles, les pertes de rendement sont d'une part dues à pluviosité excessive qui a perturbé les semis puis le développement des cultures. Ensuite, c'est le

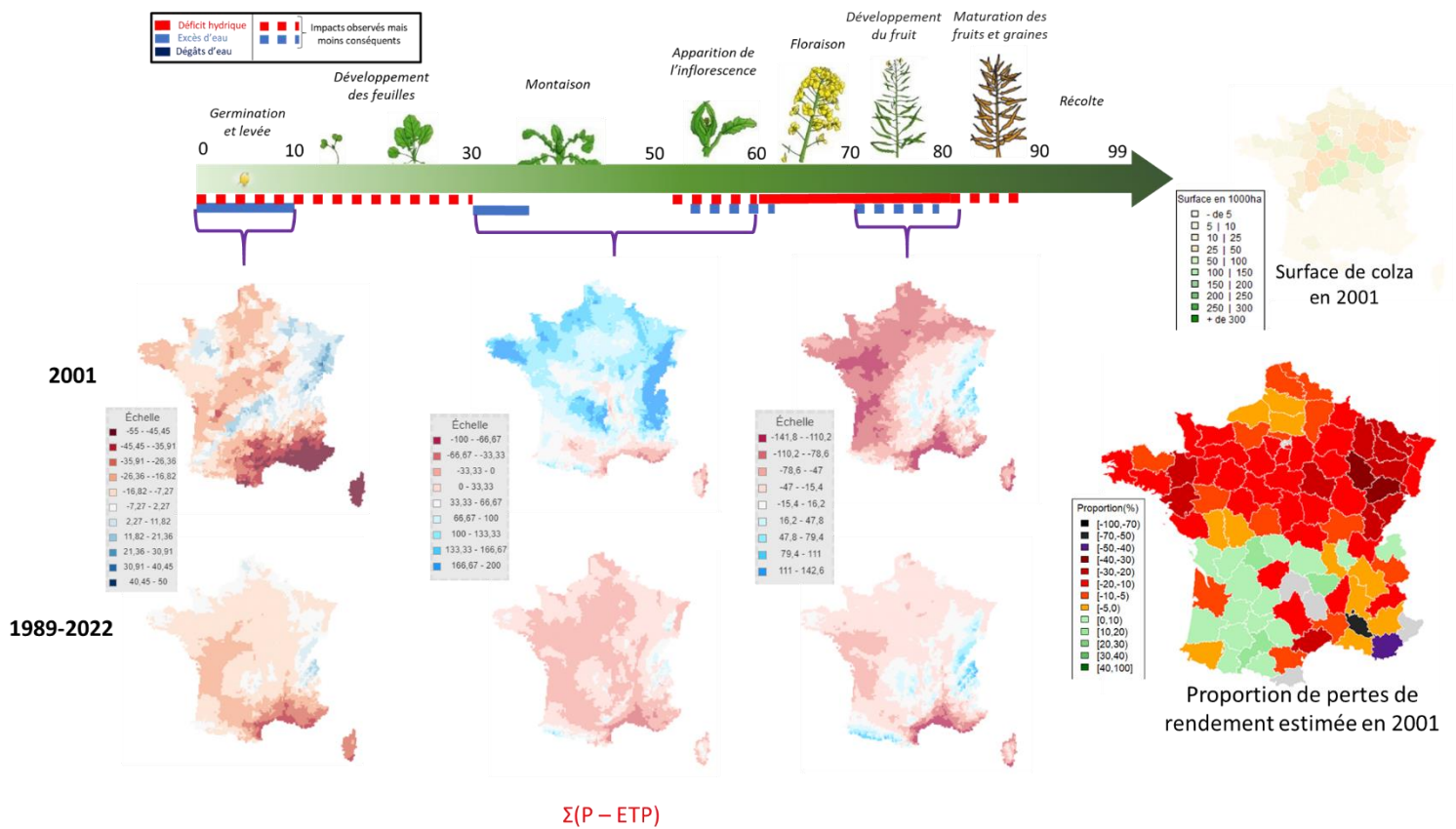


Figure 28: Proportion de pertes de rendement estimée en 2001 pour le Colza et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

déficit hydrique qui a touché le colza en fin de cycle.

Parmi l'ensemble des indicateurs hydriques testés, l'indicateur P-ETP en figure 28 est l'indicateur qui semble le mieux justifier les pertes de rendement de l'année 2001. Les résultats obtenus avec cet indicateur sont en accord avec les informations des conjonctures agricoles.

c) Année 2020

En 2020, c'est l'ensemble de la France métropolitaine qui est concernée par une faible récolte (figure 29). L'analyse des conjonctures agricoles (disponible en annexe) a permis d'expliquer les faibles rendements par un

automne ainsi qu'une période de sécheresse importante au printemps. Aucuns indicateurs calculés n'a permis d'indiquer un excès d'eau pendant le cycle. Cependant l'indicateur P-ETP montre qu'un déficit important (30 à 100mm) a eu lieu durant la floraison. L'indicateur « Humidité relative » indique que la sécheresse a continué durant la phase de remplissage des grains. Ces 2 indicateurs permettent d'expliquer en partie les pertes de rendement observer.

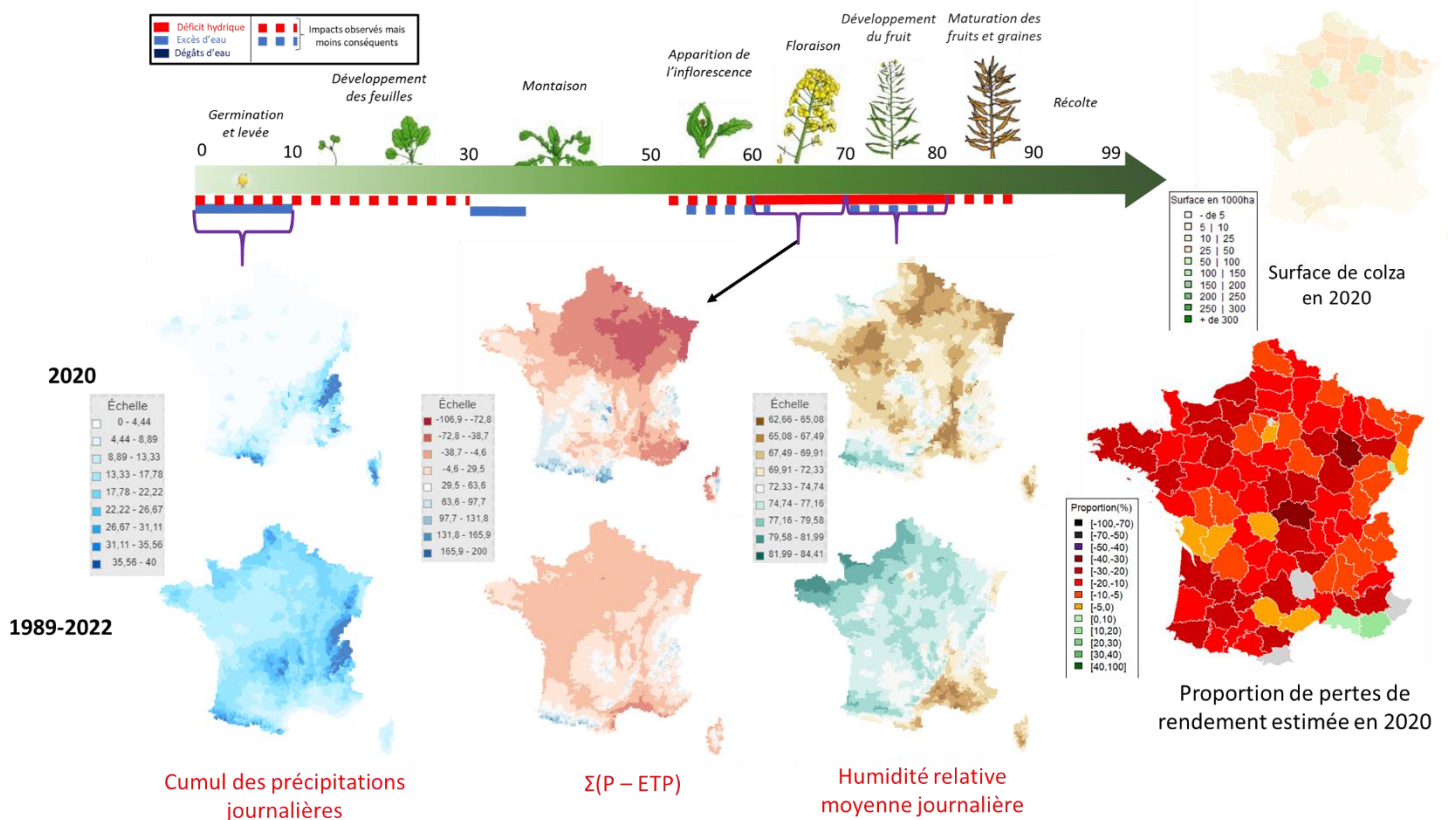


Figure 29: Proportion de pertes de rendement estimée en 2020 pour le Colza et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

3.4 Soja

3.4.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces



a) Le déficit hydrique

Tout d'abord, le déficit hydrique peut affecter le peuplement final du soja, car des conditions de sécheresse du sol compromettent la germination et la croissance des plantes. En effet l'allongement de la partie de la tige située sous les cotylédons (hypocotyle) peut être inhibé (Vieira *et al.*, 1991).

De plus, si la sécheresse est associée à des températures élevées, il y a un risque de chancre

thermique. Cela peut affecter les semis de soja émergents et le stade d'apparition du deuxième nœud (BBCH 32).

Dans ce cas l'hypocotyle peut présenter des symptômes comme la présence d'un anneau ou d'une tache foncée, cette situation peut entraîner la mort du semis (Vieira *et al.*, 1991). La nodulation, est également réduite en cas de sécheresse.

D'autre part, le stress hydrique après l'émergence du soja peut réduire la croissance végétative, par l'intermédiaire d'une réduction de la hauteur des plantes et de la taille des feuilles.

Il semblerait que le stade végétatif soit moins sensible que le stade de formation du grain et le stade de floraison (Pejic, B *et al.*, 2011).

En effet, un déficit hydrique important peut induire un avortement des fleurs et des gousses du soja (Licht M *et al.*, 2013)

Ensuite, lorsqu'un stress hydrique se produit pendant les étapes de formation des gousses et de remplissage des graines, la capacité de compensation du soja est réduite. La sécheresse peut réduire le nombre de gousses jusqu'à 20 % en raison de l'avortement des fleurs et des gousses (Wiebold, W.J, 2018). Le nombre et la taille des graines peuvent également être affectés par le stress hydrique tout comme le nombre de gousses. Enfin, le déficit hydrique conduit souvent à une maturité plus précoce ou/et à un raccourcissement de la période de remplissage des grains, ce qui entraîne par conséquent une réduction du poids des graines et du rendement (Wiebold, W.J, 2018).

Tous les effets évoquer du déficit hydrique peuvent réduire le rendement global de la culture (SPECIALTY, 2021).

b) Les excès d'eau

Les sols inondés et humides augmentent le risque de maladies des semis, ce qui peut poser problème dans les champs inondés (Jeff Coulter *and al.*, 2018).

Lorsque les graines de soja sont complètement submergées pendant 48 à 96 heures, elles ont généralement la capacité de survivre. Cependant, si les plantes restent submergées pendant une période plus longue, comme une inondation de quatre jours ou plus, cela retarde leur croissance, les rend plus petites et réduit le

nombre de nœuds. En conséquence, une inondation qui dure six jours ou plus devrait avoir un effet négatif sur le rendement des cultures de soja (Stahl, L *et al.*, 2018).

Les conditions favorables aux maladies des semis comprennent des sols humides et compacts, une émergence et une croissance lentes des plantes, un sol en croûte et une mauvaise qualité des semences. Les inondations peuvent causer des pertes de rendement allant de 0.8 à 1.25 quintaux/ha par jour sur des sols argileux et limoneux respectivement, notamment pendant les phases de reproduction des cultures (Jeff Coulter *et al.*, 2018). Des pertes encore plus importantes sont prévues pour le soja aux stades R3 à R5 où un excès d'eau provoque des effets néfastes sur la taille des graines (Linkemer G *et al.*, 1998). Les excès d'eau en fin de saison, même de courte durée à la fin septembre, peuvent endommager la culture de soja. Les dommages potentiels causés par les inondations sur le soja comprennent la rupture et la verse des tiges, les graines gonflées par l'humidité qui peuvent faire éclater les gousses, la germination ou la pourriture des graines et la contamination par la boue (Linkemer G *et al.*, 1998). La plante est la plus sensible aux excès d'eau pendant la période de reproduction précoce (BBCH 60 - 70) et la période végétative précoce (BBCH 32). Les excès d'eau affectent principalement le nombre de gousses par nœud reproducteur et le nombre de branches, ce qui à son tour affecte le rendement. (Linkemer G *et al.*, 1998). Les

effets d'un ennoiment sur le soja selon Tewari et Arora sont inscrits dans le tableau 4.

Tableau 4: Effet d'une inondation sur le soja (Tewari, S. and Arora, 2016)

Effet des inondations sur le soja avant et après la floraison	
Stade de croissance	Symptômes/conséquences
Quatrième nœud (V4)	Réduction du poids sec
Cinquième nœud (V5)	Chlorose et retard de croissance
Sixième nœud (V6)	Moins de pousses et de matière sèche
Stade pleine floraison (R2)	Diminution de la biomasse
Stade début gousse (R3)	Diminution du rendement en graines
Stade pleine gousse (R4)	Masse de grain réduite

3.4.2 Les indicateurs

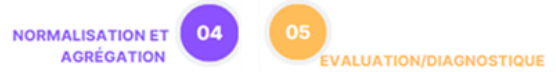
a) Choix des indicateurs

Les indicateurs agroclimatiques et les seuils retenus pour le moment sont présentés sur la figure 30.

Tout comme pour les cultures précédentes, les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau

sur l'espèce (partie 3.5.1) et des résultats de travaux de la littérature.

3.4.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



a) Les années extrêmes

Les années inférieures au quantile 10% pour la France sont visibles sur la figure 31. Il apparaît que les années 2003 et 1992 sont les années les plus exceptionnelles de la série analysée.

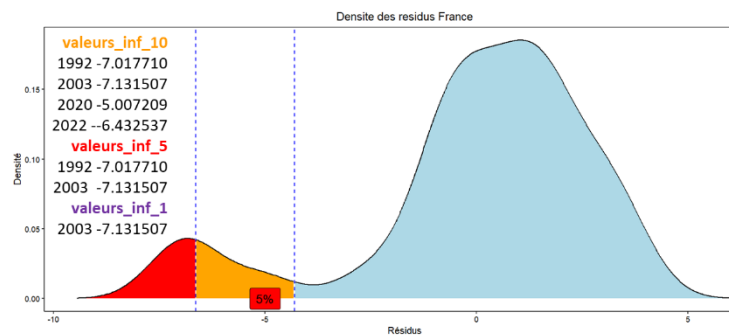
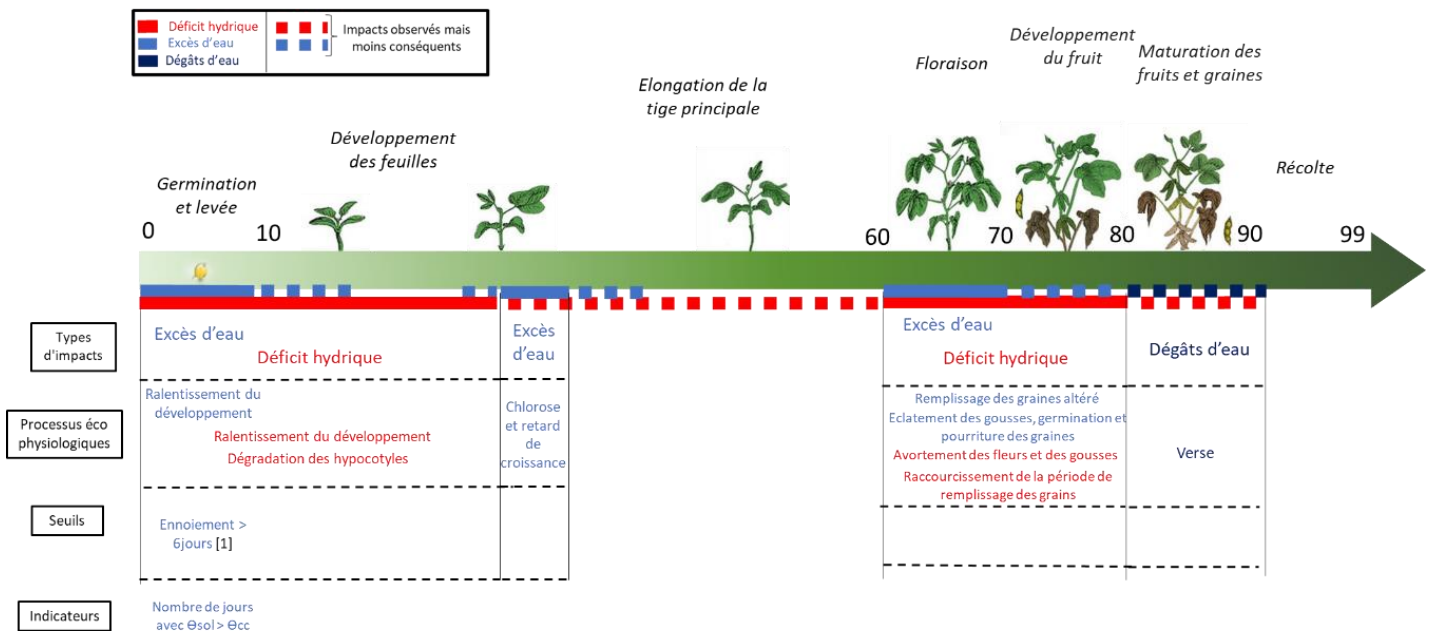


Figure 31: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en soja à l'échelle de la France.



[1] Stahl, L et al, 2018

Figure 30: Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le Soja.

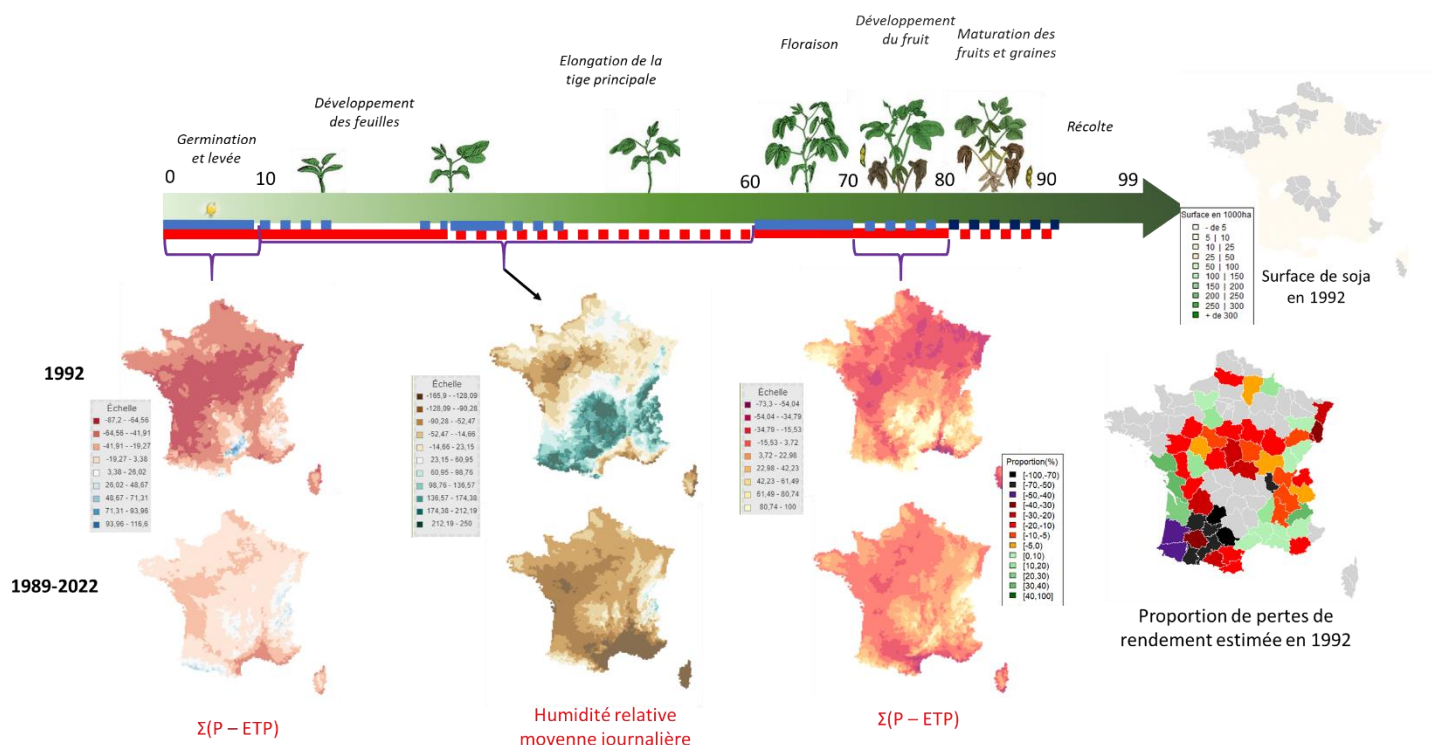


Figure 32: Proportion de pertes de rendement estimée en 1992 pour le Soja et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

b) Année 1992

En 1992, d'après les données disponibles, c'est le Sud-ouest qui a subi des pertes de rendement exceptionnelles. Le centre de la France a également été touché par des conditions climatiques défavorables. Très peu de données conjecturales sont disponibles pour la culture du soja. Cependant, par l'intermédiaire des indicateurs agroclimatiques (figure 32), il est possible d'expliquer les faibles rendements par :

- Un déficit hydrique important lors de la période de levée (Indicateur P-ETP).
- Un excès d'eau au cours de la phase végétative (Humidité relative moyenne journalière)

- Un déficit hydrique au centre de la France en période de remplissage (Indicateur P-ETP).

c) Année 2003

L'année 2003 est marquée par une perte importante de rendement dans le Sud et l'Est de la France (figure 33). L'utilisation de l'indicateur P-ETP permet d'observer un déficit hydrique important en période végétative. Ce déficit est également important au stade de floraison où l'indicateur humidité relative relève une humidité très faible dans les régions impactées par les pertes de rendement. Après la floraison, des précipitations importantes (jour avec $P > 30\text{mm}$) sont observées dans les départements aillant eu les plus fortes pertes de rendement en 2003 (figure 33).

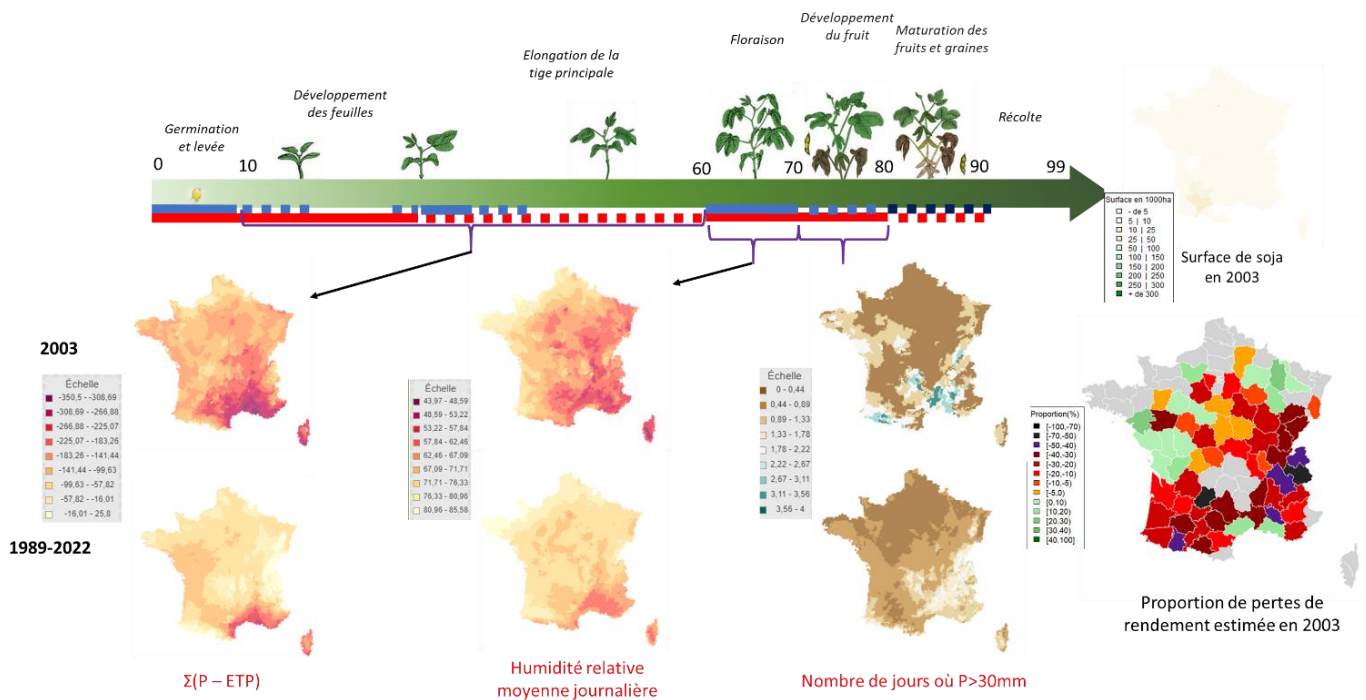


Figure 33: Proportion de pertes de rendement estimée en 2003 pour le Soja et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

3.5 Pois

3.5.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèces



a) Le déficit hydrique

Les effets du déficit hydrique sont multiples et affectent toutes les grandes fonctions de la plante, de la morphogenèse à l'organogénèse, en passant par la photosynthèse et la transpiration (Jérémy Lecoeur et Lydie Guillioni, 2005).

Le manque d'eau affecte le pois à la levée. La graine ne germe pas ou donne naissance à une plantule qui dessèche rapidement. La levée est altérée partiellement ou en totalité (M. Neumann Andersen et JA Aremu, 1991)

Un déficit hydrique sévère réduit la vitesse d'initiation des phytomères et l'apparition des feuilles, proportionnellement au niveau de dessèchement du sol (Jérémy Lecoeur et Lydie Guillioni, 1998).

Les vitesses de progression de la floraison, du stade limite d'avortement et de la maturité physiologique ne sont pas affectées par un déficit hydrique modéré. Seuls les déficits sévères peuvent réduire la vitesse de progression des stades du développement reproducteur.

Cependant, la vitesse de progression de la floraison apparaît plus réduite en cas de stress que durant les autres stades de développement. Toutefois, cette différence ne s'exprime que pour des déficits hydriques très intenses. Ceci explique pourquoi dans la pratique agricole, le développement végétatif du pois n'est pas considéré comme sensible au déficit hydrique

(Jérémie Lecoœur et Lydie Guilioni, 2005). Cependant M. Neumann Andersen et JA Aremu affirme que la croissance du pois est fortement limitée en cas de manque d'eau entre la levée et le début floraison. D'après eux, la surface foliaire est touchée : la taille des feuilles est réduite. Le fonctionnement des nodosités est perturbé, le pois subit une carence en azote, le nombre d'étages fructifères diminue, moins de graines sont produites.

D'autre part, un déficit hydrique induit un arrêt de la production de nouveaux phytomères, donc une réduction du nombre final de phytomères reproducteurs et un raccourcissement du cycle. Quel que soit son intensité, un déficit hydrique réduit la taille de tous les organes végétatifs en développement sur la plante au moment où il intervient. La réduction de taille des organes peut atteindre 80 % de la taille des plantes bien alimentées en eau, à condition que le déficit hydrique soit long et fort. Un stress hydrique induit un processus de fermeture des stomates, ce qui va réduire la photosynthèse (Jérémie Lecoœur et Lydie Guilioni, 2005).

Un déficit hydrique qui se produit entre le début de la floraison et la fin du franchissement du stade limite d'avortement réduit généralement le nombre de graines par plante (Guilioni et al., 2003). L'impact direct d'un déficit hydrique avant la floraison, par une limitation du nombre de fleurs ou d'ovules fécondables, est possible mais ne se produit que pour des stress hydriques importants. La réduction du nombre de graines

par plante est proportionnelle à l'intensité du déficit hydrique (Guilioni et al., 2003).

b) Les excès d'eau

La croissance des pois est très sensible à de courtes périodes d'excès d'eau. Sur des semences non levées, un sol gorgé d'eau entraîne l'asphyxie et la pourriture graines de pois, rendant la levée impossible (Belford *et al.*, 1980). Sur de jeunes plantes, une saturation en eau entraîne la perturbation du fonctionnement du système racinaire et des nodosités et peut restreindre la fixation symbiotique de l'azote. En état de sous-alimentation en azote, les plantes jaunissent et s'atrophient (Belford *et al.*, 1980).

L'effet de l'excès d'eau sur les plantes de pois a été étudié par Cannell et son équipe en 1979. Les résultats ont montré que les plantes soumises à un excès d'eau ont présenté des symptômes de flétrissement, de dessiccation et de vieillissement des feuilles, en particulier des feuilles les plus anciennes et lorsque l'excès d'eau s'est produit à un stade ultérieur de la croissance. Lors de la récolte, ces plantes ont montré une réduction du nombre de nœuds par rapport aux plantes non affectées par l'excès d'eau, ce qui a entraîné une limitation du nombre de fleurs et de gousses formées. De plus, l'excès d'eau pendant la phase de remplissage des gousses a provoqué la chute des fleurs tardives et des gousses immatures

Dans d'autres expériences avec la même variété de pois, la photosynthèse a ralenti dans les 24 heures suivant le début de l'engorgement d'eau et la transpiration a été inhibée après 2 jours, probablement en raison de la fermeture des stomates. (CANNELL *et al.*, 1979)

Tableau 5: Effet d'un ennoiment sur le poids des grains de pois (CANNELL *et al.*, (1979))

Dry weight of seed	Growth stage when waterlogged				S.E. (11 D.F.)
	Vegetative	Pre-flowering	Flowering	Pod-filling	
Control (g plant ⁻¹)	2.26	3.17	2.62	3.57	±0.21
Waterlogged for 2 days	1.63 (72)	1.98 (62)	1.87 (71)	2.62 (73)	
Waterlogged for 5 days	1.00 (44)	1.27 (40)	1.57 (60)	2.15 (60)	

Le pois est sensible à l'excès d'eau juste avant la floraison, une période de 24 heures de sol inondé peut entraîner une diminution du poids des gousses et des grains d'environ 25% (tableau 5). Un excès d'eau à la floraison provoquera la coulure des fleurs et l'avortement

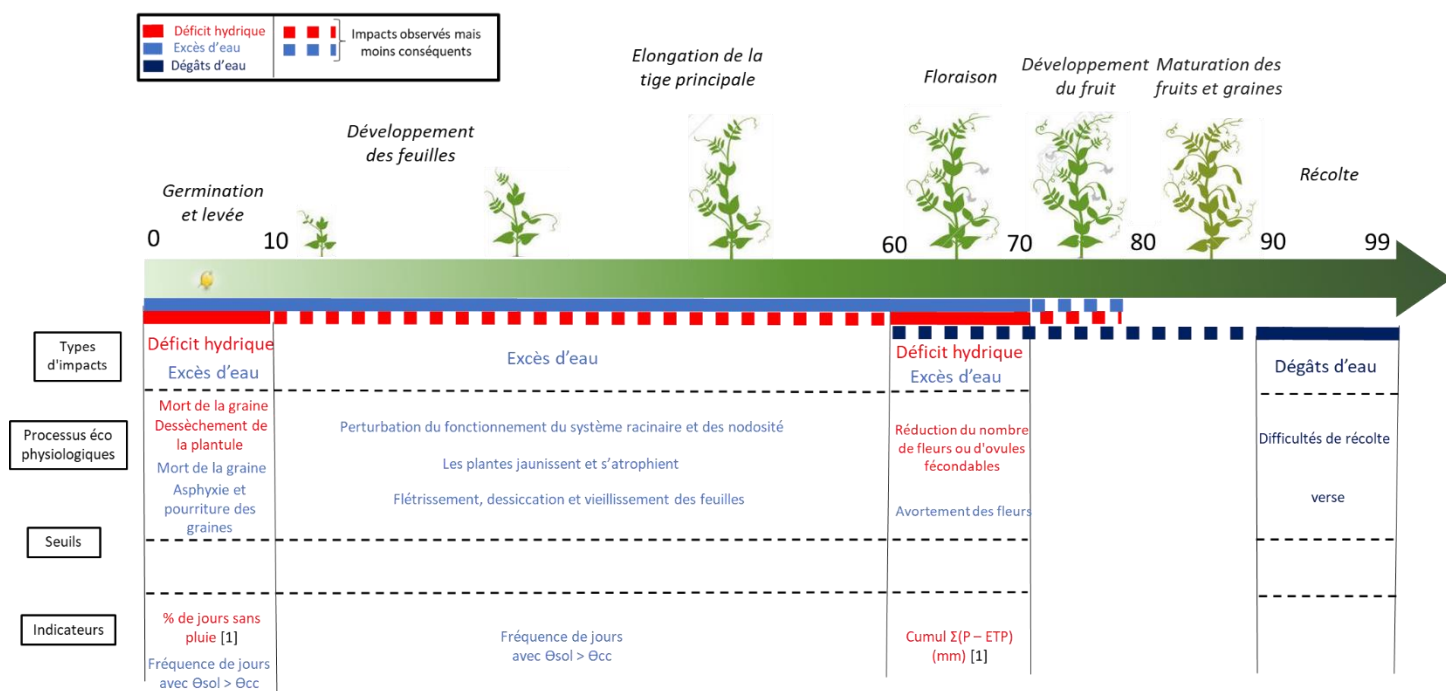
des gousses (Baranger *et al.*, 2010) (CANNELL *et al.*, 1979).

c) Les dégâts d'eau

Des précipitations intenses peuvent engendrer des difficultés de récolte ou la verse lorsque qu'elles interviennent en fin de cycle après le stade de maturation des grains (ABRAS Morgan *et al.*, 2015). Cette situation peut être très pénalisante pour le rendement final. De plus, certaines variétés sont très sensibles à la verse en cas de fortes pluies pendant et après la floraison. Le pois fourrager est plus sensible à la verse que le pois protéagineux (ABRAS Morgan *et al.*, 2015).

3.5.2 Les indicateurs

Les indicateurs agroclimatiques retenus pour le moment sont présentés sur la figure 34.

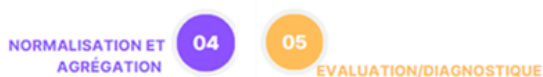


[1] Chambres d'agriculture pays de la Loire, Bretagne et Normandie, 2022

Figure 34 : Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour le pois.

Les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau sur l'espèce (partie 3.5.1), et des résultats d'autres travaux de la littérature.

3.5.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



a) Les années extrêmes

Les années inférieures au quantile 10% pour la France sont visibles sur la figure 35. Il apparaît que les années 2016 et 1989 sont les années les plus exceptionnelles de la série analysée

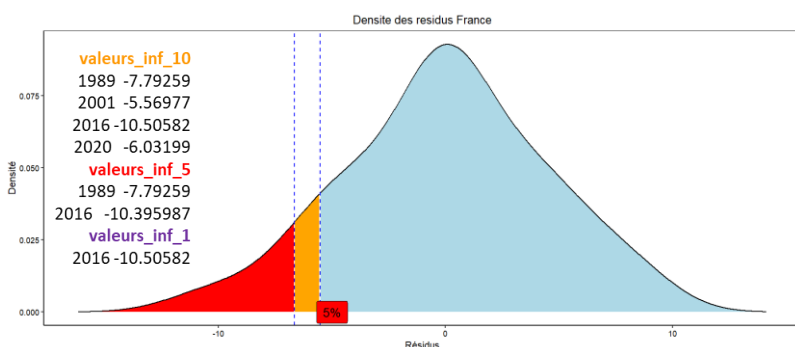


Figure 35: Evaluation des années avec des pertes de rendement exceptionnelles en pois à l'échelle de la France.

b) Année 2016

D'après les résultats de l'analyse de rendement (figure 35), l'année 2016 apparaît comme la plus exceptionnelle de toutes les années analysées (1989-2022) pour le pois. En analysant la proportion de perte de rendement au niveau du département (figure 36) on s'aperçoit que c'est la partie nord de la France qui fut la plus touchée. L'analyse des conjonctures agricoles (disponible en intégralité en annexe) a permis d'expliquer ces

pertes par des conditions beaucoup trop humides au printemps. En effet la floraison s'effectua dans de mauvaises conditions avec comme conséquences une perturbation de la fécondation (avortement) et des problèmes au cours du remplissage des grains. Les indicateurs « P-ETP » et « cumul de précipitation » confirment les indications des conjonctures agricoles (figure 36).

c) Année 1989

En 1989, le calcul de l'indicateur « cumul de précipitation » a permis d'identifier un cumul de précipitation au cours du stade germination très supérieur à la normal dans le sud-ouest de la France. Cet incident pourrait en partie expliquer les pertes de rendement dans ces régions. De plus, d'après les résultats du calcul des indicateurs « P-ETP » et « humidité relative moyenne journalière », il y a eu un déficit hydrique important en période de floraison et de développement des graines sur presque l'ensemble du territoire métropolitain.

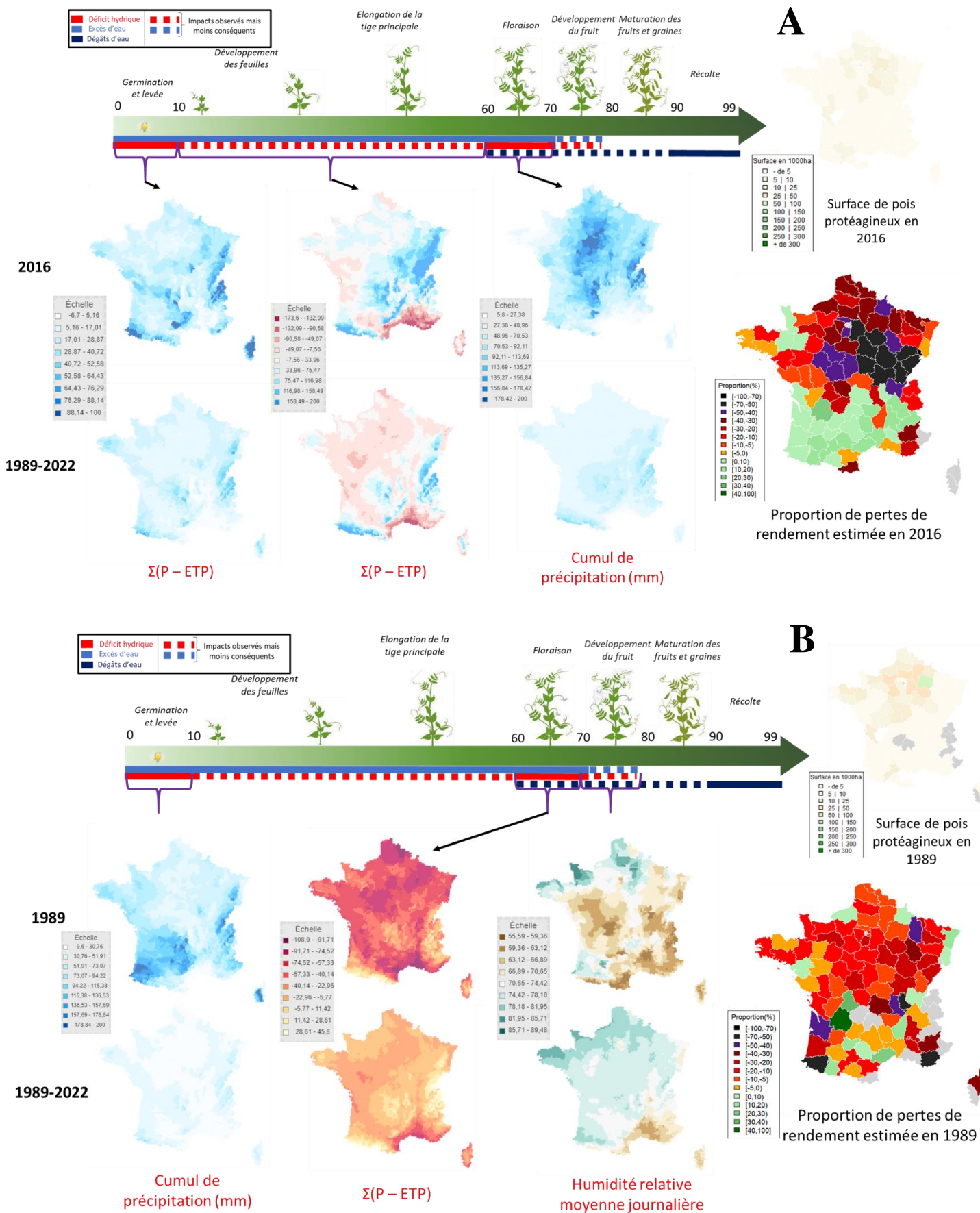


Figure 36: Proportion de pertes de rendement en pois et explication des pertes par calcul d'indicateurs agroclimatiques pour l'année 2016 (A) et l'année 1989 (B).

3.6 Pomme de terre

3.6.1 Impacts des déficits ou excès d'eau sur l'espèce



a) Le déficit hydrique

La sécheresse a des impacts significatifs sur la pomme de terre. Elle entraîne une réduction de la croissance du feuillage, de la superficie du couvert végétal et de l'indice de surface foliaire, ce qui limite la photosynthèse et la fixation du carbone. Les plantes réagissent à la sécheresse en réduisant la conductance stomatique et en fermant les stomates pour conserver l'eau, ce qui entraîne une diminution de la transpiration et de l'absorption de CO₂, affectant ainsi la croissance et le rendement (organigramme en annexe 11) (Obidiegwu et al., 2015).

De plus, la sécheresse peut entraîner une diminution du nombre de tubercules, une réduction de la biomasse aérienne et de la teneur en matière sèche, ce qui se traduit par une diminution du rendement final.

La réponse des plantes à la sécheresse dépend du stade de développement auquel elles sont exposées (figure 37 et tableau 6).

Tout stress hydrique à partir du stade de levée pénalise la mise en place du développement foliaire et le niveau de tubérisation de manière irrémédiable. Ce stade de développement de la pomme de terre doit être surveillé car la sensibilité au stress hydrique est très forte au

stade initiation de la tubérisation (ARVALIS, 2006).

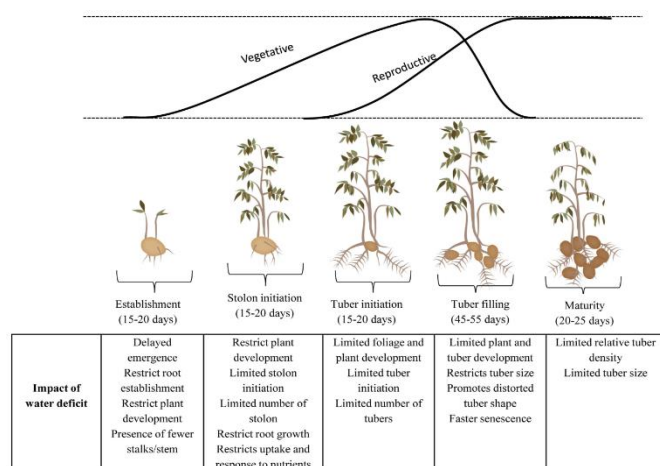


Figure 37: Effet du stress hydrique à différents stades de croissance de la pomme de terre (Obidiegwu et al., 2015).

Tableau 6: Conséquences de la sécheresse sur différents stades de croissance de la pomme de terre (Ontario, 2022).

Stade de croissance	Exigence en matière d'eau disponible du sol	Baisse de rendement si l'eau disponible est sous les niveaux recommandés
Stade de croissance 1 : Développement des germes	75 % de l'eau disponible du sol	De brèves périodes de stress hydrique n'affectent pas le rendement
Stade de croissance 2 : Croissance végétative	75 % de l'eau disponible du sol	5 %
Stade de croissance 3 : Début de la tubérisation	80 % de l'eau disponible du sol	10 %
Stade de croissance 4 : Grossissement du tubercule	90 % de l'eau disponible du sol	40-60 % Demande en eau la plus élevée. Des quantités d'eau suffisantes sont nécessaires pour l'obtention d'un rendement élevé. Tout état de sécheresse favorisera la malformation des tubercules.
Stade de croissance 5 : Maturation du tubercule	60-65 % de l'eau disponible du sol	Tout déficit hydrique causera la déshydratation du tubercule.

La sécheresse affecte également le développement des plantes, en particulier pendant les phases végétatives et reproductives. De plus, la sécheresse peut endommager la qualité des produits, augmenter l'incidence de maladies et entraîner la mort prématurée des plantes (Obidiegwu et al., 2015).

Le stress hydrique pendant les stades d'initiation des stolons et d'initiation des tubercules a un impact particulièrement important sur le nombre de stolons formés et, par conséquent, sur le nombre de tubercules produits. De plus, la sécheresse peut affecter la longueur des racines, réduisant ainsi l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes.

D'après le ministère de l'agriculture canadien, un stress qui survient au début de la période de grossissement des tubercules, est le plus dommageable. Les conséquences sont une diminution du rendement, une baisse de la qualité et du poids spécifique des tubercules (Ontario, 2022).

Sur le plan physiologique, la sécheresse entraîne une diminution de la conductance foliaire, de la photosynthèse et de l'efficacité de la carboxylation. Les plantes réduisent leur transpiration et ferment leurs stomates pour éviter la perte excessive d'eau, ce qui peut entraîner une accumulation de stress et des dommages cellulaires. D'autre part, la sécheresse peut perturber l'équilibre hormonal des plantes, notamment la production d'acide abscissique (ABA) et d'éthylène, qui régulent les réponses au stress hydrique. (Obidiegwu *et al.*, 2015).

b) Les excès d'eau

Une trop forte humidité pose des défis aux producteurs de pommes de terre en raison de divers troubles observés. Le cœur noir est un

problème fréquent en période de pluies abondantes, en particulier sur les sols limoneux lourds. Lorsque les sols sont inondés ou saturés pendant de longues périodes, l'oxygène a du mal à se diffuser dans les tubercules, ce qui provoque la mort des tissus intérieurs et leur décoloration en brun, violet ou noir. Ce trouble rend le tri des tubercules difficile, car les zones touchées ne sont visibles qu'une fois les tubercules coupés (University of Delaware, 2013)

Un autre trouble lié aux conditions humides est l'élargissement des lenticelles, de petites ouvertures à la surface des tubercules. Cela se produit lorsque le sol est excessivement humide. Les lenticelles agrandies entraînent des taches blanches surélevées sur les tubercules, souvent entourées d'un halo. Elles dégradent l'aspect de la récolte et favorise la pénétration d'agents de pourriture (Ephytia – INRAE, 2023) (University of Delaware, 2013).

Enfin, en cas de sol saturée en eau pendant une période supérieure à 24 heures, les tubercules sont asphyxiés et subissent des attaques de' organismes pathogène présents à l'état latent dans le sol ou sur les tubercules (Pectobacterium, Pythium, Phytophthora erythroseptica) (Ephytia – INRAE, 2023).

Dans le cas d'un ennoïement du sol au cours la phase végétative dès le début de la phase de croissance des tubercules pendant 2 jours peut

réduire le rendement en tubercules commercialisables de 70%, et pendant la phase de floraison, de 74 %. Dès que l'enneiement dépasse les 4, 6 et 8 jours, le rendement est complètement absent, quelle que soit le stade de développement où l'inondation se déroule (tableau 7). Puis, plus la durée de l'enneiement est longue, plus le nombre de tubercules diminue tout comme le rendement (Jovovic et al., 2021).

Tableau 7: Conséquences d'une saturation en eau du sol sur différents stades de croissance de la pomme de terre (Jovovic et al., 2021).

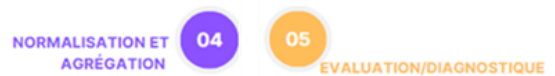
Parameter	Control (no flooding)	Stage of potato development (A)									
		Intensive growth phase (number of days) (B)					Flowering (number of days) (B)				
		2	4	6	8	Aver.	2	4	6	8	Aver.
Number of tubers	6.9	4.2 ^a	2.2 ^b	1.6 ^c	0.5 ^d	2.1	4.5 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	1.1
Aver. tuber mass (g)	75.9	44.7 ^a	20.4 ^b	17.1 ^{bc}	11.7 ^{cd}	23.5	46.7 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	11.7
Yield (g plant ⁻¹)	520.0	188.3 ^a	43.3 ^b	27.7 ^{bc}	7.7 ^{bc}	66.8	210.7 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	52.7
Yield of marketable tubers (g plant ⁻¹)	465.0	133.7 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	33.4	121.3 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	30.3
		A			B			AxB			
		Lsd 0.01			Lsd 0.01			Lsd 0.01			
Number of tubers		0.283			0.448			0.633			
Yield (g plant ⁻¹)		17.619			27.857			39.396			
Average tuber mass (g)		5.944			9.400			13.293			
Yield of marketable tubers (g per plant)		13.539			21.406			30.273			

3.6.2 Les indicateurs

Les indicateurs agroclimatiques retenus pour le moment sont présentés sur la figure 38.

Les indicateurs ont été sélectionnés à partir de l'analyse des impacts des déficits et excès d'eau sur l'espèce (partie 3.6.1), et des résultats d'autres travaux de la littérature.

3.6.3 Calculs et confrontations des résultats aux pertes de rendement



a) Les années extrêmes

Après analyse des rendements en pomme de terre sur la période 1989-2022 (figure 39), il apparaît que les années 2022 et 1989 sont les

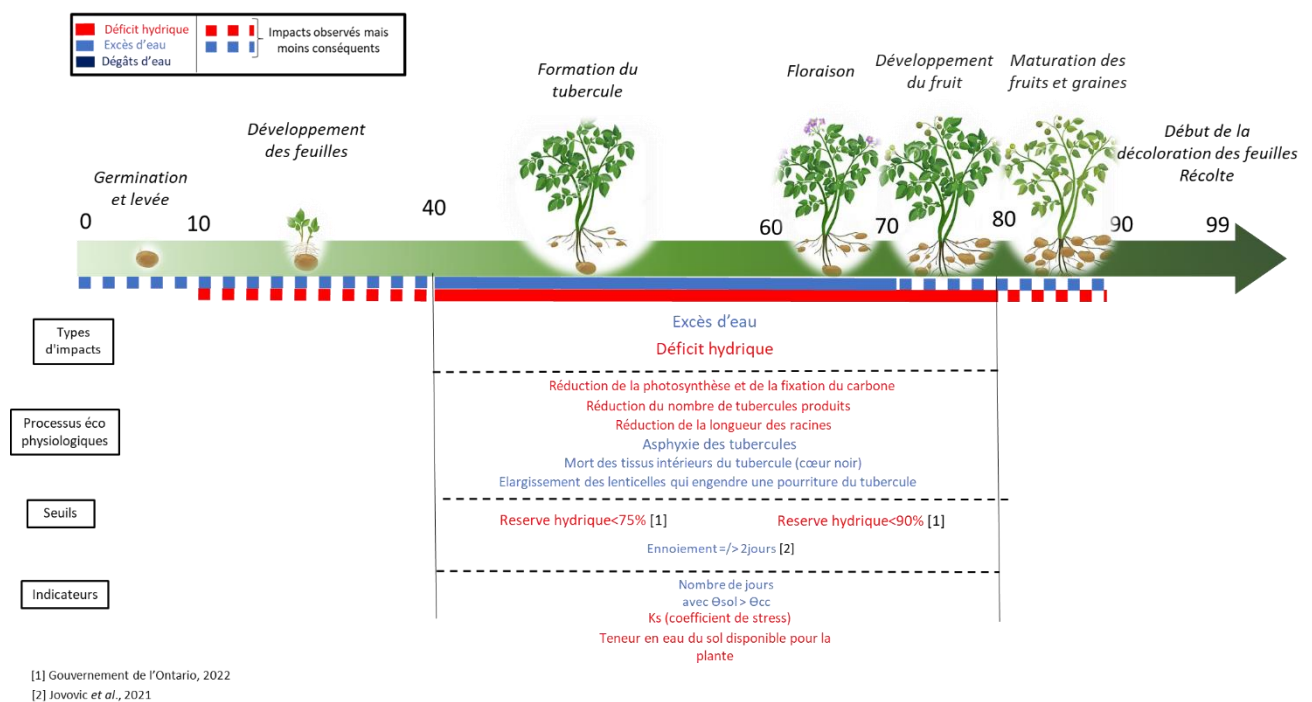


Figure 38 : Diagramme synthétique des périodes de vulnérabilité, des processus, des seuils et des indicateurs sélectionnés pour de la pomme de terre.

années les plus exceptionnelles de la série analysée.

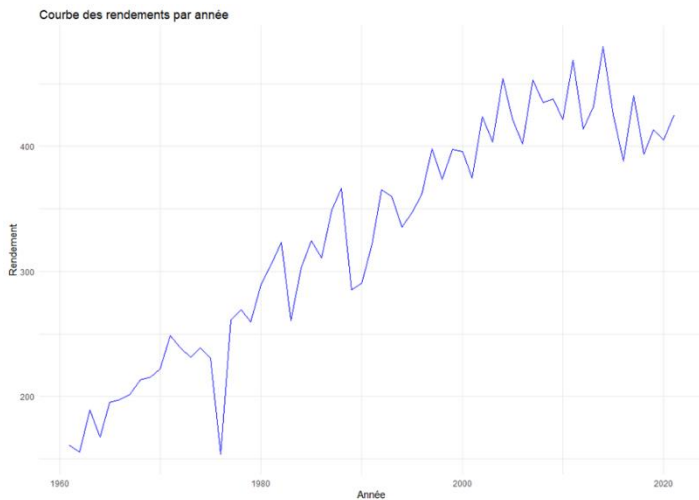


Figure 39 : Evolution du rendement en pomme de terre en France (qt/ha).

b) Année 2022

D'après le bilan annuel de l'agriculture française publié par Agreste, le rendement des pommes de terre en France est le pire depuis

1995. Il a fait trop chaud et trop sec sur les champs de patates. Le rendement moyen des pommes de terre en France en 2022 est de 39,2 t/ha, le plus bas depuis 27 ans. L'indicateur P-ETP semble confirmer l'implication d'un déficit hydrique important comme origine des pertes de production de pomme de terre. En effet un déficit hydrique climatique extrême est survenu pendant la phase de développement des fruits (figure 40).

c) Année 1989

L'année 1989 fait partie des années les plus sèche de la série étudiée. Après le calcul de plusieurs indicateurs agroclimatiques pour différents stades de culture, les résultats permettent d'observer un déficit hydrique climatique extrêmement fort au cours de la

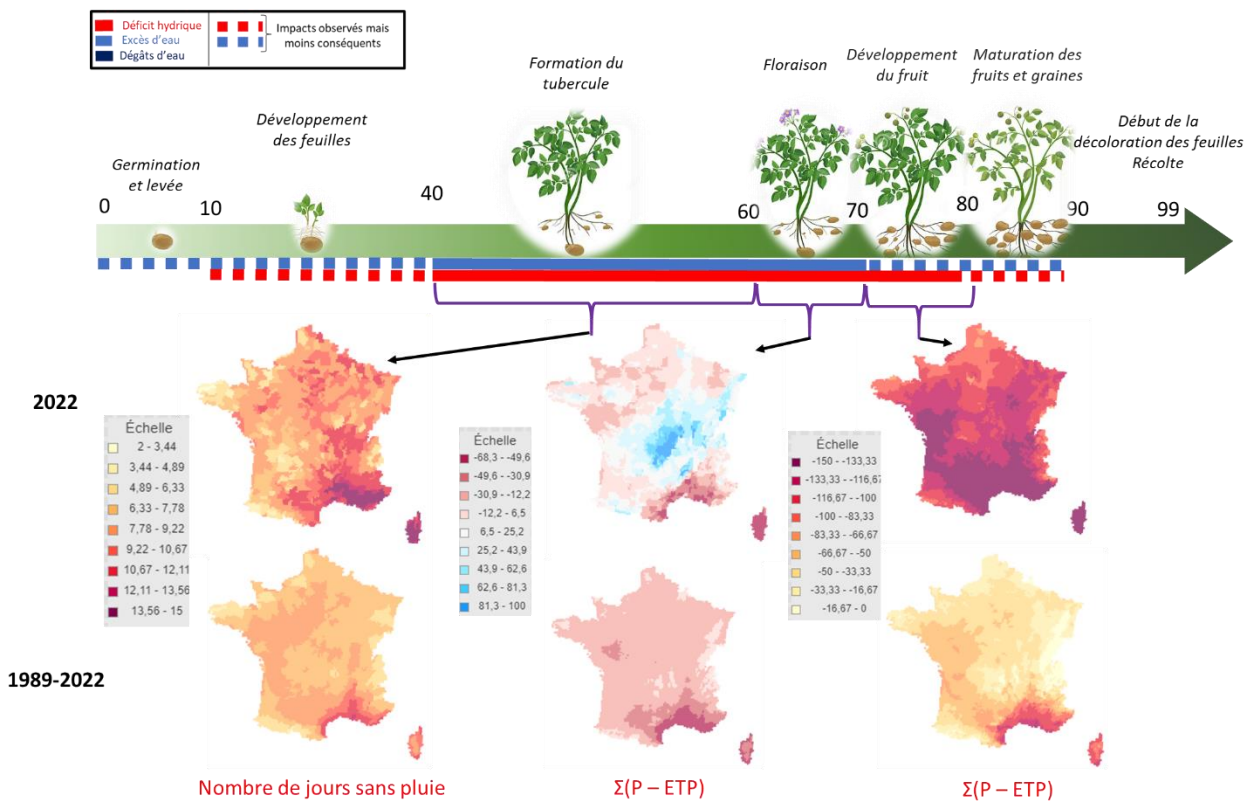


Figure 40: Explication des pertes de rendement de pomme de terre en 2022 par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

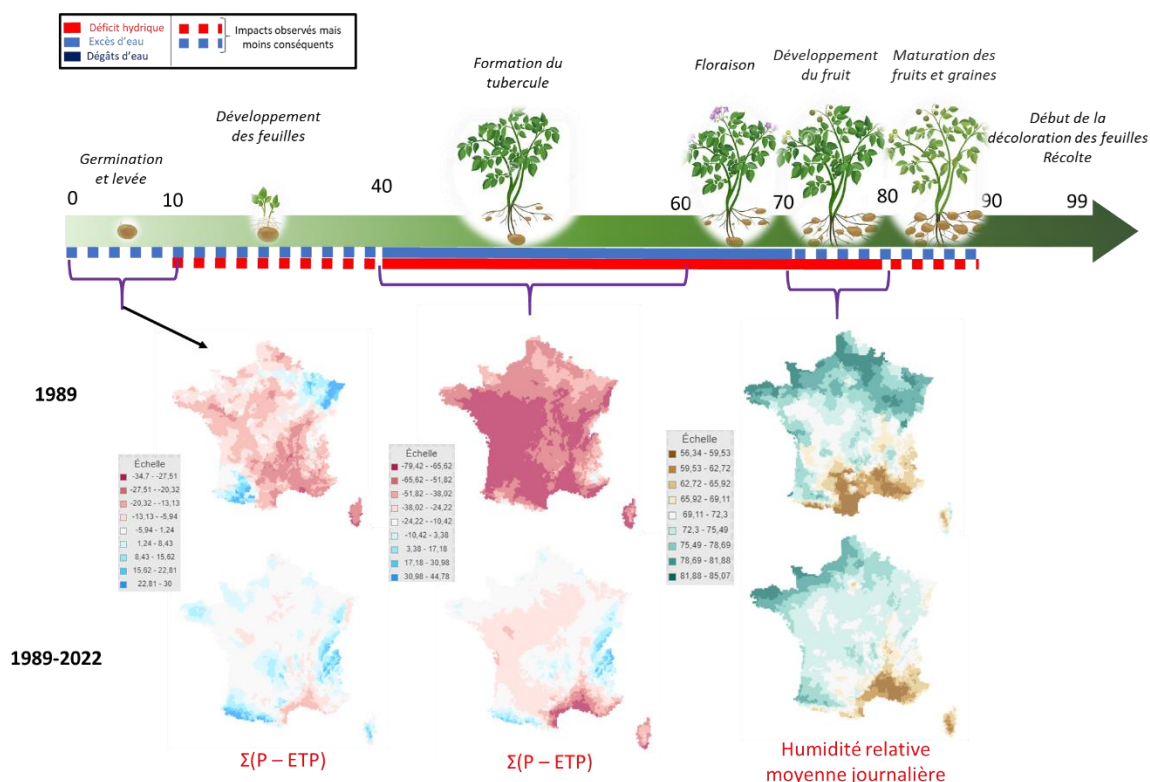


Figure 41: Explication des pertes de rendement de pomme de terre en 1989 par calcul d'indicateurs agroclimatiques.

période de formation des tubercules. Ce déficit est intense sur toute la France et en particulier dans l'ouest et le sud de la France (figure 41).

3.7 Vulnérabilité et adaptation des systèmes maraîchers

Un atelier participatif c'est déroulé le 12 juillet 2023, le sujet de l'atelier était le suivant : Quelle vulnérabilité et quelles adaptations face au changement climatique pour un système maraîcher sous abri du bassin de production d'Avignon ?

3.7.1 Contexte

L'étude a été financée par le GIS PIClég « Changement climatique en maraîchage », visant à synthétiser les impacts du changement climatique sur les systèmes maraîchers du Sud

de la France et à proposer des pistes d'adaptation. Une présentation par visioconférence et un atelier d'échanges sont organisés avec des acteurs de la filière maraîchage dans les secteurs du Gard/Vaucluse/Bouches-du-Rhône (conseillers, chercheurs INRAE, expérimentateurs...). Les ateliers sont animés par Léa Husson, ingénieure d'études dans l'unité Expérimentale Maraîchage.

3.7.2 Objectifs des ateliers

Les ateliers avaient pour objectifs :

- a) Identifier comment les connaissances produites aident à évaluer le niveau de vulnérabilité d'un système maraîcher.
- b) Réfléchir aux pistes d'adaptation existantes ou à créer.

c) Dédurre les risques pour le système face au changement climatique.

3.7.3 La démarche

L'approche utilisée a consisté à utiliser des indicateurs pour évaluer les effets futurs du changement climatique. Les indicateurs ont été sélectionnés à partir d'une liste issue du projet Climaleg. Le tableau des indicateurs utilisés est disponible en annexe 12. L'année extrême choisie pour l'évaluation est la 24ème année la

plus extrême sur une période de 30 ans (2031-2060).

3.7.4 Vulnérabilité du maraîchage

Pour évaluer la vulnérabilité d'un système maraîcher face au changement climatique, les résultats des indicateurs pour la période 2031-2060 (annexe 10) ont été utilisés. Un cas d'étude a été sélectionné, correspondant à un système très vulnérable avec une note de 4/4 sur l'échelle de vulnérabilité (figure 42).

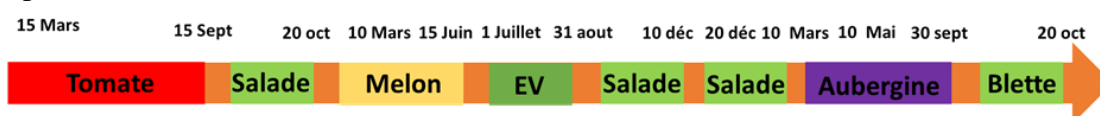


Figure 42 : Succession des cultures pour le cas d'étude.

Tableau 8: les différentes impacts en fonction des cultures et des résultats des inducteurs

Tomate	Salade	Melon	Aubergine	Blette
<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes pendant la période de nouaison et de qualité du pollen, entraînant des pertes de rendement. - Affaiblissement de la durée du cycle. - Augmentation des ravageurs et apparition de nouveaux ravageurs en raison de la diminution des jours de gel et des températures moins froides. - Diminution de l'efficacité des bourdons. - Attention à l'augmentation des températures qui peuvent affecter les conditions de travail des salariés. - Fort risque de pénurie d'eau. - Problèmes pour les auxiliaires de culture. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de montaison dû à l'augmentation des températures, pouvant affecter la qualité. - Diminution des maladies fongiques due à la baisse de l'humidité. - Possibilité d'une augmentation de la production de salade en raison de périodes plus courtes. - Les auxiliaires de culture semblent mieux s'en sortir face aux changements climatiques pour la salade (chrysopes). 	<ul style="list-style-type: none"> - Accélération du cycle et avancement des dates de récolte, pouvant entraîner des problèmes de concurrence avec les melons espagnols. - Problèmes d'organisation de la rotation avec des cycles se chevauchant. - Pas d'eau disponible pour semer les engrais verts. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution des pathogènes en raison de la température du sol moins froide. - Augmentation des opérations de blanchiment pour limiter les brûlures dues à l'augmentation des températures, entraînant une perte de rayonnement et des problèmes logistiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes de qualité avec les fortes chaleurs.

3.7.5 *Impacts sur les cultures*

Pour le cas d'étude, les différents impacts en fonction des cultures et des résultats des inducteurs (annexe) sont mentionnés dans le tableau 8.

3.7.6 *Pistes d'adaptation*

Pour clôturer l'atelier, une liste de piste d'adaptations a été proposée :

- Améliorer la gestion de la serre pour réduire la pression des ravageurs et des maladies (aération, blanchiment, ouverture, enherbement).
- Passer de l'abri en plastique à l'abri aux filets.
- Revoir la stratégie de succession des cultures, en évitant les cultures importantes pendant la période chaude (mi-juin à mi-août) et en utilisant un engrais vert pendant cette période.
- Envisager des associations d'espèces pour créer de l'ombrage (par exemple, poivron/aubergine).
- Utiliser pleinement le volume de l'abri.
- Revoir la taille de la tomate et le palissage.
- Adapter les fenêtres de mise sur le marché en fonction des productions étrangères (concurrence avec l'Espagne).
- Diversifier les cultures.

- Utiliser des outils d'aide à la décision (OAD).
- Décaler la période de solarisation si nécessaire.

4) Discussion, perspectives et limites de l'étude

Les résultats présentés dans ce rapport s'intègrent dans la première partie de la démarche visant à déterminer quels indicateurs relatifs à la sécheresse et aux excès d'eau sont pertinents pour les cultures sélectionnées. En effet cette première partie consistait à étudier l'écophysiologie des espèces, trouver une méthode d'évaluation/diagnostic des indicateurs et tester les indicateurs déjà disponibles dans SICLIMA.

3.8 Les indicateurs disponibles dans SICLIMA

3.8.1 *Indicateurs qui utilisent des données climatiques*

Les résultats obtenus avec les indicateurs climatiques présents dans SICLIMA sont plutôt satisfaisants. Des indicateurs comme P-ETP, le cumul de précipitation ou encore l'humidité relative semblent plutôt bien expliquer les accidents climatiques hydriques. Cependant, certaines des valeurs seuils présents dans la bibliothèque de SICLIMA semblent être à revoir car elles sont mal ajustées pour certaines cultures.

3.8.2 Indicateurs qui utilisent des données de bilans hydriques

Il semble y avoir un problème avec les résultats obtenus à partir de données de bilans hydriques via SICLIMA. En effet, à quelques exceptions près, l'ensemble des indicateurs indiquaient des résultats constants, peu importe l'année, le stade phénologique et la culture. De plus, plusieurs mailles ne sont pas calculées par SICLIMA. C'est problèmes ont été relevés par

Mael AUBRY et moi. Une réunion au sein de l'unité s'est déroulée afin de résoudre ces problèmes. Des modifications et améliorations du calcul du bilan hydrique sont actuellement en cours.

3.8.3 Tableau bilan

Le récapitulatif des indicateurs retenus pour expliquer les pertes de rendement exceptionnelles est disponible dans le tableau 9.

Tableau 9: Tableau bilan des meilleurs indicateurs testés pour expliquer les pertes de rendement pour des années exceptionnelles

	Blé	Mais	Colza	Soja	Pois	Pomme de terre
Déficit hydrique	2020 BBCH 40 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$	1990 BBCH 20 à 65 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 65 à 85 : Humidité relative moyenne journalière 2022 BBCH 0 à 10 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 10 à 20 : Humidité relative moyenne journalière BBCH 65 à 85 : $\Sigma(P - ETP)$	2001 BBCH 70 à 80 : $\Sigma(P - ETP)$ 2020 BBCH 0 à 10 : Cumul de précipitations BBCH 60 à 70 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 70 à 80 : Humidité relative moyenne journalière	1992 BBCH 0 à 10 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 70 à 80 : $\Sigma(P - ETP)$ 2003 BBCH 10 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 60 à 70 : Humidité relative moyenne journalière	1989 BBCH 60 à 70 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 70 à 80 : Humidité relative moyenne journalière	1989 BBCH 40 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$ 2022 BBCH 40 à 60 : Nombre de jours sans pluie BBCH 70 à 80 : $\Sigma(P - ETP)$
Excès/dégâts d'eau	2016 BBCH 40 à 60 : Cumul de précipitations BBCH 40 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 0 à 10 : Fréquence (%) de jours avec $\Theta_{sol} > \Theta_{cc}$ 2020 BBCH 10 à 20 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 20 à 40 : $\Sigma(P - ETP)$		2001 BBCH 0 à 10 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 30 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$	1992 BBCH 10 à 60 : Humidité relative moyenne journalière 2003 BBCH 70 à 80 : Nombre de jours où $P > 30\text{mm}$	2016 BBCH 0 à 10 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 10 à 60 : $\Sigma(P - ETP)$ BBCH 60 à 70 : Cumul de précipitations 1989 BBCH 0 à 10 : Cumul de précipitations	

3.9 Perspectives pour la suite des recherches

3.9.1 *Nouveaux indicateurs*

L'outil SICLIMA est récent, il est encore en cours de développement, il possède alors encore des limites. En effet, les indicateurs et les valeurs seuils 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. De nouveaux indicateurs n'ont donc pas pu être testés au cours du stage

Par conséquent, de nouveaux indicateurs et de nouveaux seuils identifiés ou développés grâce aux recherches bibliographiques, vont être ajoutés à SICLIMA à la suite du stage. L'équipe d'AgroClim va tester l'indicateur ETM-ETR ainsi que Ks (coefficient de stress de la plante).

3.9.2 *Utilisation de R pour définir des seuils*

Les seuils de tolérance aux risques de déficit ou d'excès d'eau sont difficiles à estimer. Très peu de seuils sont proposés dans la littérature et sont souvent contradictoires d'une étude à une autre. Dans ce cas, une méthode pourrait être développée à la suite du stage afin de pouvoir estimer les seuils à partir des pertes de rendement estimées. Pour cela, les indicateurs pourront être calculés avec R sur plusieurs cycles culturaux, les seuils de ces indicateurs pourront être définis lorsqu'il y a des pertes de

rendements importantes dues à un événement hydrique.

3.9.3 *Confirmation et adaptation de la liste d'indicateurs*

Afin de savoir quels indicateurs définis sont les plus robustes, l'ensemble des résultats de tous les indicateurs peuvent être comparés aux données de pertes de rendements. Pour cela, tous les indicateurs peuvent être calculés avec le logiciel R et comparés avec un test de corrélation ou un test de rangs (test non paramétrique qui permet de comparer des données ordinales). L'objectif est que le logiciel indique directement les indicateurs qui expliquent le mieux les pertes de rendements pour définir une liste d'indicateurs à retenir. Ensuite, cette liste pourra être présentée à des écophysiologistes et agronomes pour être confirmée.

3.10 Limite de la méthode

3.10.1 *L'approche par résidus de rendement*

La méthode utilisée d'estimation des résidus est basée sur l'estimation du rendement prédit par régression linéaire. Même si les résultats obtenus sont généralement confirmés avec les informations des conjonctures agricoles, ils peuvent sous-estimer ou surestimer les pertes. Il serait intéressant de tester d'autres méthodes, comme une méthode qui prend en compte les ruptures de tendance (Marjou, 2018) ou qui utilise les modèles linéaires dynamiques (DLM)(Schauberger, B *et al.*, 2018).

3.10.2 *Les indicateurs agroclimatiques liés à l'eau*

Les travaux réalisés dans le cadre du stage se concentrent uniquement sur les indicateurs hydriques. Cependant, parfois il n'a pas été possible d'expliquer les pertes de rendement à partir d'indicateurs hydriques. Une des explications possibles est qu'il existe une multitude de facteurs influençant la croissance, le développement et le rendement final d'une culture. En effet, d'autres facteurs climatiques rentrent en compte (température, gel, vent...) mais aussi les disponibilités en nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium...), les maladies et les ravageurs...

Cette explication permettrait d'expliquer pourquoi l'indicateur « humidité relative moyenne journalière » explique très bien les pertes de rendement, car c'est un indicateur qui prend en compte plusieurs facteurs. Il serait donc intéressant de combiner plusieurs indicateurs pour obtenir de meilleurs résultats.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de définir des indicateurs caractérisant les risques liés au déficit hydrique et à l'excès d'eau sur des cultures d'intérêts en France.

Les premières recherches ont porté sur les cultures de blé, maïs, colza, pomme de terre, soja et pois.

En déterminant dans un premier temps les périodes de vulnérabilités des cultures de blé tendre et de maïs, des indicateurs et quelques seuils de tolérance ont plus être proposés. Ils ont par la suite été calculés et spatialisés lorsqu'ils étaient disponibles sur la plateforme Siclima. À l'aide d'une méthode d'estimation des pertes de rendement et des conjonctures agricoles, la robustesse des indicateurs de SICLIMA basés sur des données climatiques a été validée. D'autre part, il semblerait qu'il y ait un problème avec ceux basés sur le bilan hydrique. Par conséquent, ces problèmes ont été étudiés et des modifications sont en cours. Cependant, le nombre d'indicateurs d'excès d'eau et de déficit hydrique disponible dans les logiciels développés par AgroClim reste limité. Il serait donc judicieux d'expérimenter d'autres indicateurs agroclimatiques. Pour cela, les indicateurs ETM- ETR et Ks vont être testés par l'unité. D'autre part, un code R pourrait être créé à la suite de cette première partie de travail, il permettra de vérifier la robustesse des indicateurs et de déterminer des seuils de tolérance. D'autant plus que des indicateurs très

utilisés par l'unité semblent rencontrer quelques limites. À l'inverse, certains semblent pouvoir garantir une bonne estimation des accidents climatiques hydriques. Parmi eux, l'humidité relative moyenne journalière semble être un indicateur très efficace. Des recherches sur cet indicateur devront être menées pour tenter de comprendre pourquoi ils semblent être un bon indicateur de déficit hydrique et d'excès d'eau.

Pour terminer, cette étude développe une approche qui pourrait permettre d'évaluer quand et quels stress météorologiques affecteront des cultures d'intérêts à l'avenir en France. Cependant, pour appliquer la méthode, des données climatiques et pédologiques sont nécessaires. Il est parfois difficile d'estimer ces variables (comme la teneur en eau des sols) ce qui rajoute de la complexité. Le choix d'autres variables comme la température semblent aussi être perfectible. Notamment en tenant compte du fait que lorsque le flux de chaleur latente est élevé, la température en surface de la canopée est supérieure à celle relevée à la station météo (cf. section 1.2.2). Il serait donc intéressant d'utiliser des données de températures de surface de la canopée plutôt que des températures ambiantes.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRAS Morgan, CARTRYSSE Christine, FROIDMONT Eric, JAMAR Daniel, RONDIA Pierre, WAVREILLE José. 2015. *LE POIS PROTÉAGINEUX : UNE LÉGUMINEUSE À GRAINES RICHES EN PROTÉINES ET EN ÉNERGIE*. Les protéagineux : De la production à la valorisation, 34p
- Andersen, MN, Aremu, JA. *Sensibilité à la sécheresse, développement racinaire et ajustement osmotique chez les pois cultivés au champ*. Irrig Sci 12 , 45–51 (1991).
<https://doi.org/10.1007/BF00190708>
- Alam and Mahub-ul Alam. 1985. *Evapotranspiration and yield of corn as related to irrigation timing during silking*. Dissertation Abstr. Int. B. Sci. Eng., 4, 1750p
- ARVALIS. 2013. *Céréales à paille - Inondations des parcelles : Des impacts dépendants du stade et du niveau d'eau*. Disponible sur : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/inondations-des-parcelles-des-impacts-dependants-du-stade-et-du-niveau-deau> (Consulté 9 mai 2023)
- ARVALIS (Anne-Monique BODILIS, Charlotte LAFON). 2022. *Maïs : quels dégâts possibles suite à la grêle et aux fortes pluies ?* Disponible sur : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/maïs-quels-dégâts-possibles-suite-la-grêle-et-aux-fortes-pluies> (consulté le 14/06/2023)
- ARVALIS - Institut du vegetal. 2022. *Fiches accidents Maïs, Verse*. Disponible sur: http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=3&type_acc=5&id_acc=328#:~:text=La%20verse%20sur%20ma%C3%AFs%20est,l'origine%20de%20plantes%20vers%C3%A9es. (consulté le 14/06/2023)
- Baranger, Alain & Pilet-Nayel, Marie-Laure & Lecomte, Christophe & Hanocq, Eric & Moussart, Anne & Lejeune-Hénaut, Isabelle. (2010). *Quel impact des innovations génétiques pour lever les facteurs limitant la production du pois protéagineux ?*
- Barnabás, Beáta & Jäger, Katalin & Fehér, Attila. 2008. *The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals*. *Plant, cell & environment*. 31. 11-38. 10.1111/j.1365-

- Bernhard Schauburger, Tamara Ben Ari, David Makowski, Tomomichi Kato, Hiromi Kato, *et al.*. 2018. *Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century*. Scientific Reports, 8, pp.1-12. ff10.1038/s41598-018-35351-1ff. ffhal-02620950f
- Belford, R.K., Cannell, R.Q., Thomson, R.J. and Dennis, C.W. (1980), *Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of peas (Pisum sativum L.)*. J. Sci. Food Agric., 31: 857-869. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740310902>
- Bradford K.J. 2002. *Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy*. Weed Science 50, 248–260. doi: 10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2
- Ben-Ari, T., Boé, J., Ciais, P., Lecerf, R., Van der Velde, M., & Makowski, D. 2018. *Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France*. Nature Communications, 9(1), 1-10.
- CANARI. *Indicateurs*. 2022., Disponible sur : <https://canari-france.fr/indicators> (Consulté le 14 juin 2023)
- Çakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Cannell, R.Q., Belford, R.K., Gales, K. *et al.* 1984. *Effects of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on a clay and a sandy loam soil*. Plant Soil 80, 53–66 <https://doi.org/10.1007/BF02232939>
- Caubel, J., García de Cortázar Aauri, I., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., & Graux, A. E. 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.
- Caubel, J., *et al.*, 2017, *Assessing future*

meteorological stresses for grain maize in France, Agricultural Systems?
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.010>

CANNELL, R.Q., GALES, K., SNAYDON, R.W. and SUHAIL, B.A. (1979), Effects of short-term waterlogging on the growth and yield of peas (*Pisum sativum*). *Annals of Applied Biology*, 93: 327-335.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1979.tb06549.x>

Chao Huang, Yang Gao, Anzhen Qin, Zugui Liu, Ben Zhao, Dongfeng Ning, Shoutian Ma, Aiwang Duan, Zhandong Liu. 2022. *Effects of waterlogging at different stages and durations on maize growth and grain yields*, *Agricultural Water Management*, Volume 261, ,107334,ISSN 0378-3774,
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107334>.

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>.

CLIMAE. 2021. *Agriculture et forêt face au*

changement climatique : Adaptation et atténuation—Pistes pour s'adapter au changement climatique. Disponible sur :

<https://www6.inrae.fr/climae/Prezentati/on/Historique/Pistes-pour-s-adapter-au-changement-climatique> (Consulté 25 avril 2023)

Cobb B Greg Cobb Malcolm C. Drew David L Andrews David L Andrews Show all 8 authors Meredith Turnbough Meredith Turnbough. 1995. *How Maize Seeds and Seedlings Cope with Oxygen Deficit*. *Horticultural Science (HORTSCI)* 30(6):1160-64. DOI: 10.21273/HORTSCI.30.6.1160

Conséquences du temps sec sur la récolte de pommes de terre | ontario.ca. (s. d.). Consulté 18 juillet 2023, à l'adresse <http://www.ontario.ca/fr/page/consequences-du-temps-sec-sur-la-recolte-de-pommes-de-terre>

Crook, M.J., Ennos, A.R., 1993. *The mechanics of root lodging in winter wheat, Triticum aestivum L.* *J. Exp. Bot.* 44, 1219–1224

Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1979) *Yield response to water*. FAO Irrigation and

Drainage, Paper 33, Rome, 193 p.

Early Drought Stress in Soybean. (s. d.).

Consulté 6 juillet 2023, à l'adresse
<https://www.specialtyhybrids.com/en-us/agronomy-library/early-drought-stress-soybean.html>

El Neomani, A.A., El Zeyny, H.A., and Abd.

Halim, A.K., 1990. Response of maize (*Zea mays* L.) to irrigation intervals under different levels of nitrogen fertilization. *Egyptian J. Agronomy*, 15: 147-158.

Etienne Brulebois, Thierry Castel, Yves

Richard, Carmela Chateau-Smith, Philippe Amiotte-Suchet, 2015, *Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88*, *Journal of Hydrology*, Volume 531, Part 3, Pages 892-901, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.026>.

Excess Water Problems in Potato | Weekly

Crop Update. (2013, juillet 19).
<https://sites.udel.edu/weeklycropupdate/?p=6021>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (Éd.). 2017. *The future of food and agriculture : Trends and challenges.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gate, P, 1995. *Ecophysiologie du blé, de la plante à la culture.* Edition Technique & Documentation - Lavoisier, ISBN, 430p

Gibelin, A.-L. 2015. *Evolution du climat passé en France métropolitaine depuis les années 50.* Météo France, 22p

GIEC. 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

GIEC. 2018 : *Résumé à l'intention des décideurs,*

Réchauffement planétaire de 1,5 °C : Rapport spécial du GIEC sur les

- conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté.*
Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p
- GIEC. 2021. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse.
- Hess, L., Meir, P., & Bingham, I. J. 2015. *Comparative assessment of the sensitivity of oilseed rape and wheat to limited water supply.* *Annals of Applied Biology*, 167(1), 102-115. <https://doi.org/10.1111/aab.12212>
- Holzämper, A., Calanca, P., & Fuhrer, J. 2011. *Analyzing climate effects on agriculture in time and space.* *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10), 1337-1351. doi:10.1016/j.agrformet.2011.05.006.
- Hsiao, 1973 T.C. Hsiao *Plant responses to water stress* *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 24 (1973), pp. 519-570
- INRAE. 2022. *Gestion de l'eau en agriculture: Lancement de la chaire partenariale Eau, agriculture et changement climatique.* Disponible sur : <https://www.inrae.fr/actualites/gestion-leau-agriculture-lancement-chaire-partenariale-eau-agriculture-changement-climatique> (Consulté le 24 avril 2023).
- Jeff Coulter, Extension agronomist; Seth L. Naeve, Extension agronomist; Dean Malvick, Extension plant pathologist and Fabian Fernandez, Extension nutrient management specialist, *Flooded soybean.* (s. d.). Consulté 6 juillet 2023, à l'adresse <https://extension.umn.edu/growing-soybean/flooded-soybean>
- JOUZEL Jean, OUZEAU G., DEQUE (M), JOUINI M., PLANTON S., VAUTARD R. 2014 *Le climat de la France au XXIe siècle. Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les*

régions d'outre-mer. Direction Générale de l'Energie et du Climat, 68p Disponible sur : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF.pdf (Consulté le 4 mai 2023)

Jovovic, Zoran & Brocic, Zoran & Velimirovic, Ana & Željko, Dolijanović & Komnenić, A.. (2021). *The influence of flooding on the main parameters of potato productivity*. Acta Horticulturae. 133-138. 10.17660/ActaHortic.2021.1320.17.

Kabongo Tshiabukole Jean Pierre. 2018. *EVALUATION DE LA SENSIBILITE AUX STRESS HYDRIQUES DU MAÏS (Zea mays L.) CULTIVE DANS LA SAVANE DU SUD-OUEST DE LA RD CONGO, CAS DE MVUAZI*. Agronomie. Université Pédagogique Nationale Kinshasa (République démocratique du Congo),. Français. ffNNT : ff. fftel-02062632f

Licht, M., Wright, D. et Lenzen, A. 2013. *Soybean response to drought*. Iowa State University Extension and Outreach. https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1190&context=extension_ag_pubs

Linkemer G, Board JE, Musgrave ME. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. Crop Sci. 1998 Nov-Dec;38(6):1576-84. doi: 10.2135/cropsci1998.0011183x003800060028x. PMID: 11541446.

Mäkelä P, McLaughlin JE, Boyer JS. *Imaging and quantifying carbohydrate transport to the developing ovaries of maize*. Ann Bot. 2005 Oct;96(5):939-49. doi: 10.1093/aob/mci246. Epub 2005 Aug 12. PMID: 16100223; PMCID: PMC4247060.

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

Mid-Vegetative Soybean Flooding and Water-Logging. (s. d.). Consulté 6 juillet 2023, à l'adresse <https://cloudprod.dekalbasgrowdeltapine.com/en-us/agronomy/mid-vegetative-soybean-flooding-and-water-logging.html>

- Ministères Écologie Énergie Territoires. 2022. *Impacts du changement climatique : Atmosphère, Températures et Précipitations*. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations> (Consulté le 4 mai 2023)
- Moule, C. 1980. *Les céréales*. Ed. La maison rustique, pp57.
- Munier-jolain Nathalie *et al.*, 2005. *Agrophysiologie du pois protéagineux*. INRA, ARVALIS, page 153-164
- Musick J T and Dusek D A. 1980. *Irrigated corn yield response to water*. Trans. ASAE 23, 92–98.
- Neenan, M., & Spencer-Smith, J. 1975. *An analysis of the problem of lodging with particular reference to wheat and barley*. The Journal of Agricultural Science, 85(3), 495-507. doi:10.1017/S0021859600062377
- Obidiegwu, Jude & Bryan, Glenn & Jones, Hamlyn & Prashar, Ankush. (2015). Coping with drought: Stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in plant science*. 6. 542.
- 10.3389/fpls.2015.00542.
- Oracle Grand Est. 2018. *Etat des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en Grand Est*. Disponible sur <https://www.calameo.com/read/00275707910aad4260d72> (Consulté le 5 mai 2023)
- Pejic, B., Maksimović, L., Cimpeanu, S., Bucur, D., Milić, S., & Ćupina, B. (2011). Response of soybean to water stress at specific growth stages. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9, 280-284.
- Ren, B., Zhang, J., Li, X., Fan, X., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2014). Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(1), 23-31. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-175>
- Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L.: *An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint*, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 1397–1415, <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>, 2022.

- Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D. et al. 2018. *Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century*. *Sci Rep* 8, 16865. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>
- Shaw R. H. and Newman. J. E. Cooperative Extension Work in Agriculture and Home Economics, State of Indiana, Purdue University and U.S. Department of Agriculture Cooperating. 1976. *Weather Stress in the Corn Crop disponible sur: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/nch/nch-18.html>*
- Sick L. et al., 2021. *La rupture climatique de 1987 en France : quels effets sur l'humidité des sols ?* *Climatologie*, 18, 5.
- Stahl, L., Coulter, J., Naeve, S., and Fernandez, F. 2018. *Flooded fields and saturated conditions impact crops*. University of Minnesota Extension. <http://blog-crop-news.extension.umn.edu/2018/07/flooded-fields-and-saturated-conditions.html>.
- Tewari, S. and Arora, N.K. 2016. *Soybean production under flooding stress and its mitigation using plant growth-promoting microbes*
- Trnka Miroslav, Hlavinka Petr and Semenov Mikhail A. 2015. *Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change*. *J. R. Soc.* <http://doi.org/10.1098/rsif.2015.0721>
- van der Velde, M., Wriedt, G., & Bouraoui, F. (2010). Estimating irrigation use and effects on maize yield during the 2003 heatwave in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(1), 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.08.017>
- van der Velde, M., Tubiello, F. N., Vrieling, A., & Bouraoui, F. (2012). Impacts of extreme weather on wheat and maize in France: Evaluating regional crop simulations against observed data. *Climatic Change*, 113(3), 751-765. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0368-2>
- Vidal Jean-Philippe, Eric Martin, Laurent Franchistéguy, Martine Baillon, Jean-Michel Soubeyrou. *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*.

International Journal of Climatology,
2010, 30 (11), pp.P. 1627-1644. DOI:
10.1002/joc.2003.
ff10.1002/joc.2003ff. ffmeteo-
00420845f

Vieira, RD, TeKrony, DM et Egli, DB 1991.
*Effect of drought stress on soybean seed
germination and vigor.* Journal of Seed
Technology. Volume 15: 12-21.

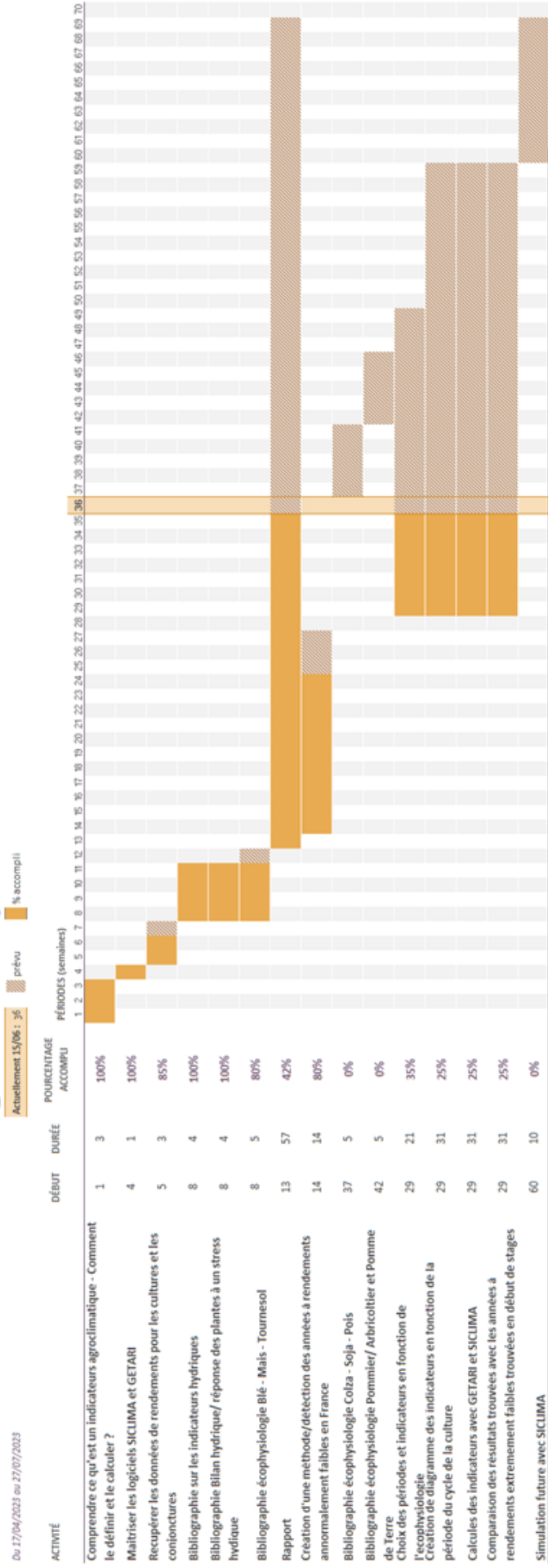
Wiebold, W.J. 2018. Two specific concerns about
drought/heat effects on soybean and corn
seedlings. University of Missouri
Extension.
[https://ipm.missouri.edu/IPCM/2018/5/dro
ughtHeatSoybeanCorn/](https://ipm.missouri.edu/IPCM/2018/5/droughtHeatSoybeanCorn/)

ANNEXES

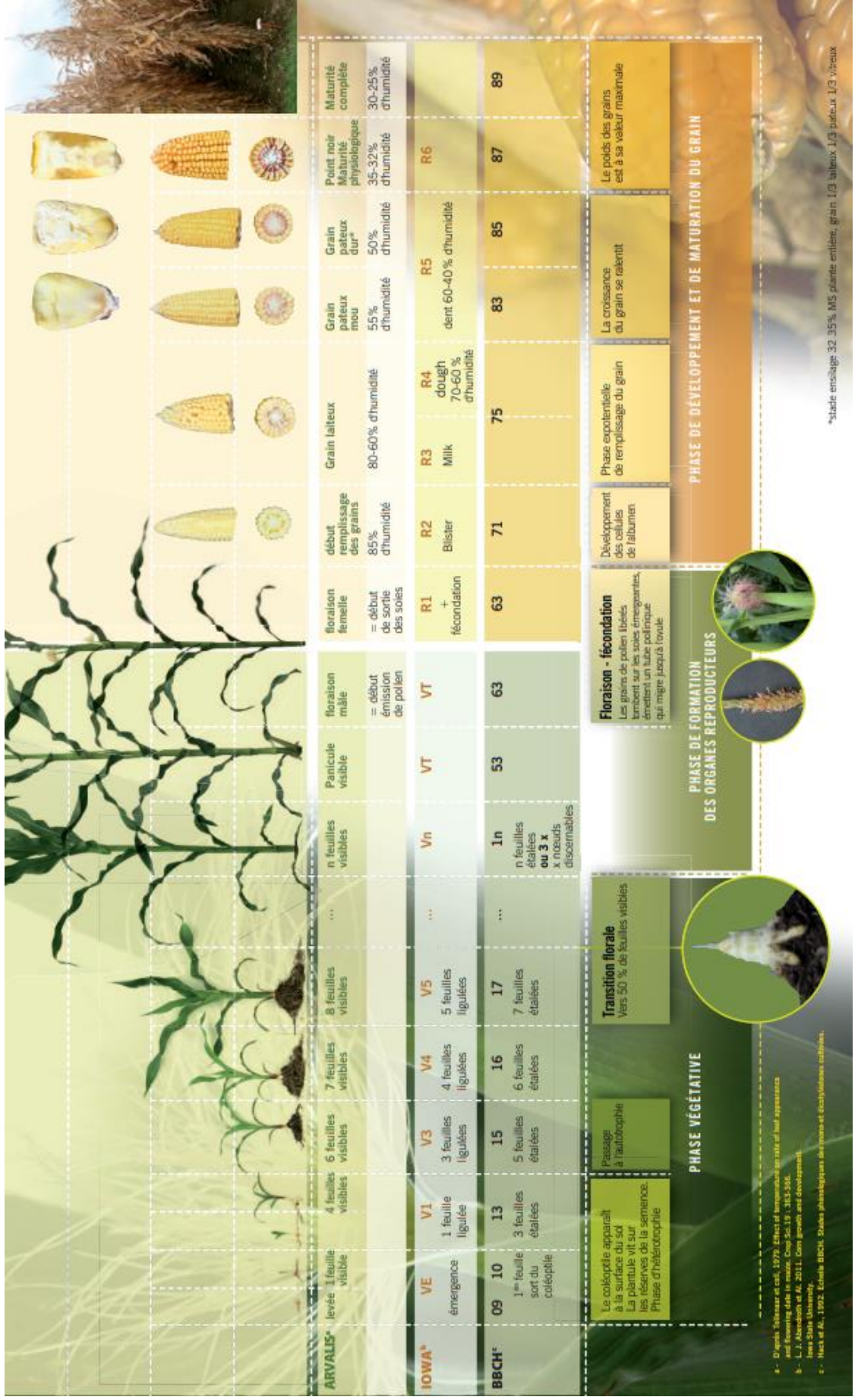
Annexe I : Diagramme de Gantt - La semaine 1 correspond au 17 avril et la semaine 70 correspond à la fin du stage (27 juillet).

Définition d'indicateurs agroclimatiques

Du 17/04/2023 au 27/07/2023



Annexe II : Les échelles des stades de maïs (Arvalis, 2022)



a - D. G. Schaefer et coll., 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. Crop Sci 19 : 383-386.
 b - L. J. Alvarado et al., 2011. Corn growth and development. Iowa State University.
 c - Nietz et al., 1992. Echelle BBCH. Datas physiologiques des mono- et dicotylédons cultivés.

*stade ensilage 32-35%, MS plante entière, grain 1/3 tigeaux 1/3 tigeaux

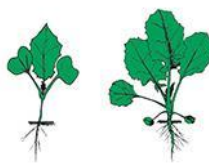
Annexe III : Les stades repères du colza (Terres Inovia, 2022)

A l'automne



A- Stade cotylédonnaire - stade A (10)

Levée : les jeunes plantes marquent la ligne.
Pas de feuilles "vraies".
Seuls les deux cotylédons sont visibles.



B- Formation de la rosette - stades B1 et B4

Stade B : apparition des feuilles.
Pas d'entre-nœuds entre les pétioles. Absence de vraie tige.
Stade B1 (11) : 1 feuille vraie étalée ou déployée (*voir ci-contre*).
Stade B2 (12) : 2 feuilles vraies étalées ou déployées.
Stade B3 (13) : 3 feuilles vraies étalées ou déployées.
Stade B4 (14) : 4 feuilles vraies étalées ou déployées (*voir ci-contre*).
Stade Bn (1n) : n feuilles vraies étalées ou déployées.
Jusqu'à B9 (19) ou davantage de feuilles étalées
ou fin de la formation de la rosette.

Au printemps



C- Montaison

Stade C1 (30) : reprise de végétation.
Apparition de jeunes feuilles.
Stade C2 (31) : entre-nœuds visibles.
On voit un étranglement vert clair
à la base des nouveaux pétioles.
C'est la tige (*voir ci-contre*).



D- Boutons accolés

Stade D1 (50) : boutons accolés encore cachés par les feuilles
terminales (*voir ci-contre*).
Stade D2 (53) : inflorescence principale dégagée.
Boutons accolés. Inflorescences secondaires visibles.
Au cours de ce stade, la tige atteint et dépasse la hauteur
de 20 cm mesurée entre la base de la rosette et les bouquets floraux
(*voir ci-contre*).



E- Boutons séparés - Stade E (57)

Les pédoncules floraux
s'allongent en commençant par
ceux de la périphérie.



F- Floraison - Stade F1 (60)












Premières fleurs ouvertes.
Stade F2 (61) : allongement de la hampe florale.
Nombreuses fleurs ouvertes.



G- Formation des siliques

Stade G1 (65) : chute des premiers pétales. Les 10 premières siliques ont une longueur inférieure à 2 cm.
La floraison des inflorescences secondaires commence à ce stade (*voir ci-contre*).
Stade G2 (71) : les 10 premières siliques ont une longueur comprise entre 2 et 4 cm.
Stade G3 (72) : les 10 premières siliques ont une longueur supérieure à 4 cm.
Stade G4 (73) : les 10 premières siliques sont bosselées (*voir ci-contre*).
Stade G5 (81) : grains colorés

Annexe IV : Les stades repères du soja (CETIOM/ITAB, 2011)

Stades repères du soja				
				
Germination (05)	VC (10) Les premières feuilles unifoliées apparaissent entre les cotylédons et les bords de leur limbe ne se touchent plus.	V1 (12) Premier noeud. Etalement complet des feuilles unifoliées.	V2 (32) Deuxième noeud. La première feuille trifoliée est développée de telle manière que les bords des limbes ne se touchent plus.	Vn (39) Nième noeud.
				
R1 (60) Début de floraison. Une fleur est épanouie à n'importe quel noeud sur la tige principale.	R3 (65) Premières gousses. Une gousse a 5 mm de long sur l'un des 4 noeuds les plus élevés sur la tige principale et portant une feuille pleinement développée.	R5 (69) Premières graines. Une graine mesure 3 mm dans une des gousses portées par l'un des 4 noeuds les plus élevés sur la tige principale.		
				
R6 (75) une gousse contient une graine verte qui remplit la cavité sur l'un des 4 noeuds les plus élevés de la tige principale. R6+ (80) Généralement, fin du franchissement du seuil limite d'avortement par tous les organes. La graine verte atteint 11 mm de long.	R7 (81) Première gousse mûre. Une gousse contenant au moins une graine sur la tige principale a atteint sa couleur de maturité (marron-beige). La graine s'arrondit dans la gousse.	R8 (90) Maturité. 95 % des gousses sont à R7 (au-delà de ce stade, 5 à 10 jours sont nécessaires pour que l'humidité de la graine soit inférieure à 15 %). La graine est libre dans la gousse.		

Source guide de culture du soja bio ITAB-CETIOM

Annexe V : Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 2016 pour le Blé tendre.



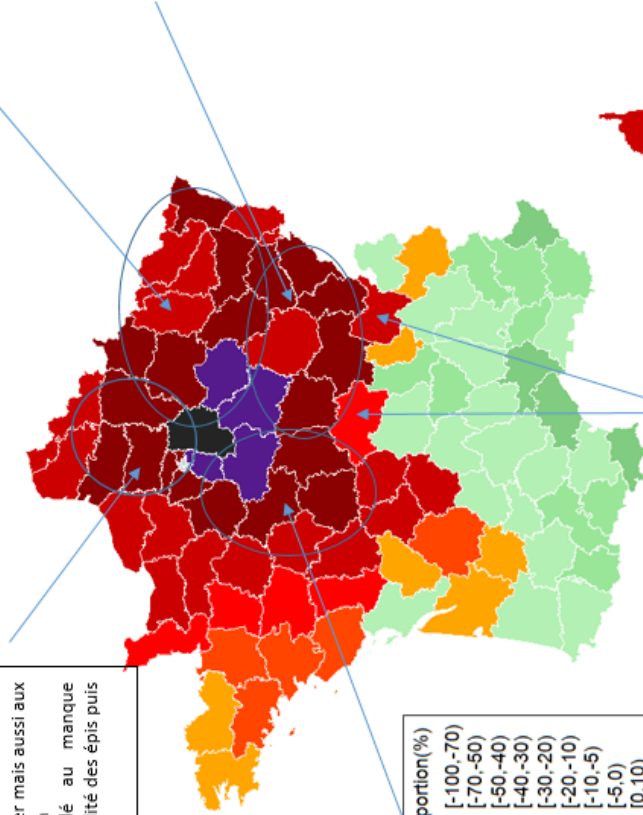
Bilan de la campagne agricole 2016 Hauts de France.

L'année 2016 Des épisodes climatiques défavorables aux céréales, oléagineux, protéagineux (C.O.P.). Après un hiver doux qui permettait d'envisager une deuxième année favorable aux cultures d'hiver, les précipitations excédentaires et la fraîcheur du printemps ont nui non seulement à la croissance des cultures d'hiver mais aussi aux levées des cultures de printemps. La pression sanitaire est élevée et le froid cumulé au manque d'ensoleillement et à la pluie, affecte la fertilité des épis puis le remplissage des grains.

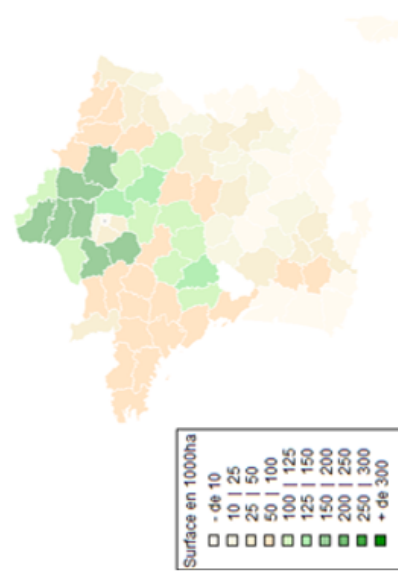
Centre-Val-de-Loire FranceAgrimer: Le bilan de la campagne 2015-2016 a été particulièrement décevant et hétérogène. La production a été en chute libre. Une météo implacable, enchaînant douceur, pluies diluviennes et faible ensoleillement, a très durement touché les rendements. Les cultures d'hiver et de printemps ont été concernées, les premières par la pluie, les secondes par la sécheresse surtout pour les cultures non irriguées. Le rendement du blé tendre s'est élevé à 44 quintaux par ha, avec la production la plus faible depuis 4 décennies.

Conjoncture Champagne-Ardenne, Lorraine, Alsace 2016: Les intempéries du printemps et la forte pression des maladies liées aux pluies abondantes. Avec 50 q/ha, il se situe à 25 quintaux en dessous de la moyenne quinquennale et en retrait de 34 quintaux par rapport à son niveau de 2015.

Campagne 2015/2016 Bourgogne franche comté:
Le printemps humide en phase critique de floraison et de remplissage impacte fortement le rendement. Les conditions le rendement du blé est très faible et s'établit à 41q/ha dans la région (retrait de 38% par rapport au 5 dernières années)



Bilan agricole 2016 Auvergne-Rhône-Alpes: Les conditions trop humides du printemps pénalisent les céréales d'hiver des deux départements du nord de la région qui subissent des baisses de rendement en blé tendre de 23 % dans l'Ain et 16 % dans l'Allier

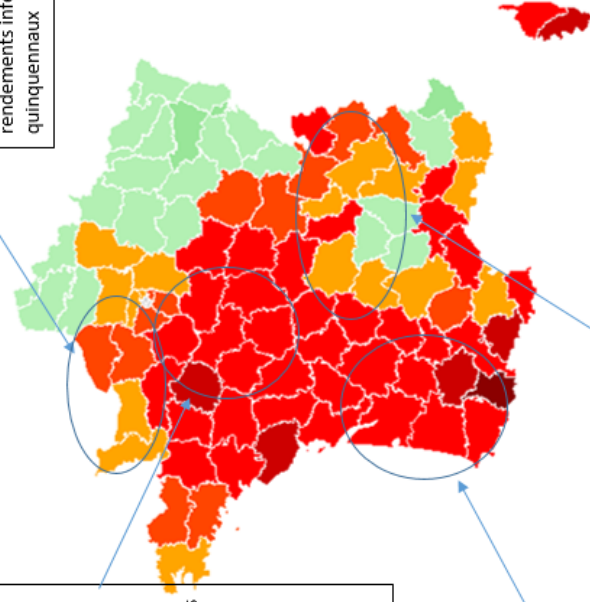


Annexe VI : Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 2020 pour le Blé tendre.



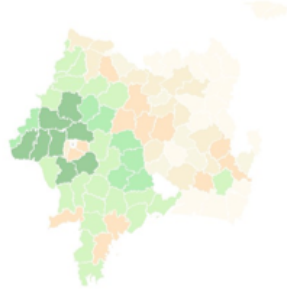
Centre-Val-de-Loire FranceAgrimer: Les conditions météo automnales très humides compliquent les semis des céréales d'hiver, qui prennent du retard surtout en sols argileux. La gestion des adventices s'avère difficile et des interventions herbicides sont abandonnées ou reportées. Puis les cultures pâtissent d'une sécheresse prolongée de plusieurs semaines et de forts vents d'Est / Nord-Est accentuant le dessèchement des sols, et particulièrement les terres superficielles où les plantes souffrent déjà d'un mauvais enracinement. Le nombre de tiges est quelquefois déficitaire et les apports d'azote peuvent manquer d'efficacité. Le blé doit être arrosé dans certains secteurs. Les conditions sèches pénalisent la formation et le remplissage des grains. Avec des températures supérieures à 30° C, la fin mai-début juin se caractérise par des conditions **échaudantes**.

Normandie 2020 FranceAgrimer: L'année 2020 est marquée par les excès climatiques : trop d'eau en hiver, pas assez au printemps et en été, des températures élevées, supérieures aux normales de janvier à septembre. Les cultures souffrent de ces excès et affichent des rendements inférieurs aux rendements moyens quinquennaux

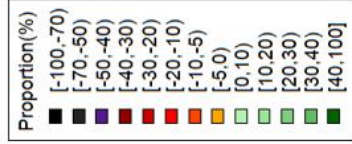


Bilan agricole 2020 Nouvelle Aquitaine: les conditions automnales extrêmement humides ont perturbé les premiers semis de céréales et leur implantation. Les semis tardifs, à très tardifs, ont entamé dès le début, de cycle les potentialités des cultures. La période sèche de mi-mars à mi-avril puis les excès d'eau de mai vont, une nouvelle fois, pénaliser les cultures souvent mal enracinées. La fin de cycle sera malgré tout favorable au bon remplissage des grains mais ne permettra pas de rattraper les défauts accumulés dans les autres composantes du rendement.

Bilan agricole 2020 Auvergne-Rhône-Alpes: C'est la plus mauvaise année de la décennie ! Après l'automne très humide qui limite les implantations de blé (- 12 %), l'hiver très doux favorise le maintien et la prolifération des pucerons vecteurs de virose dans les céréales à paille. Le début de printemps sec, avec de fortes gelées pénalise certaines parcelles jusqu'au retour de la pluie en mai et juin.

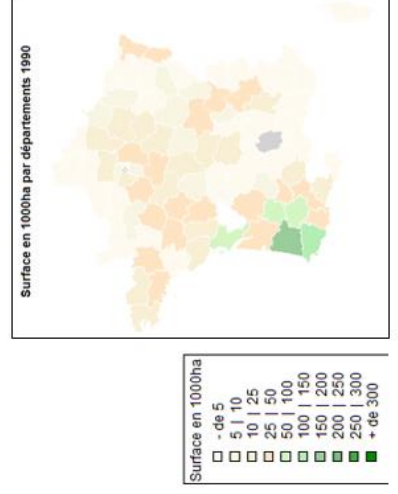
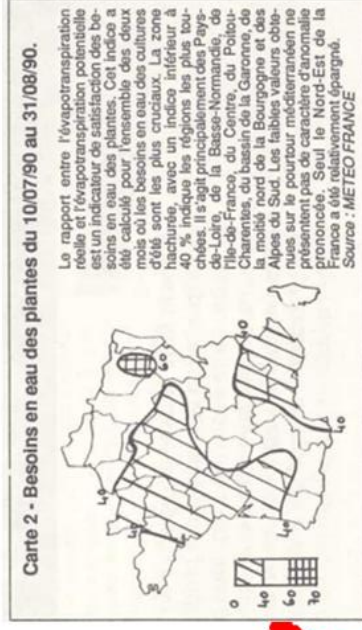
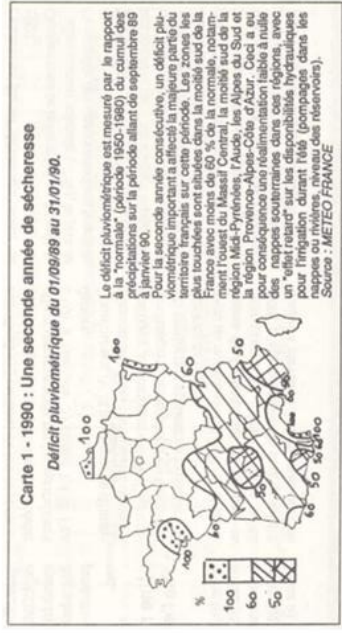


Annexe VII : Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 1990 pour le Maïs.



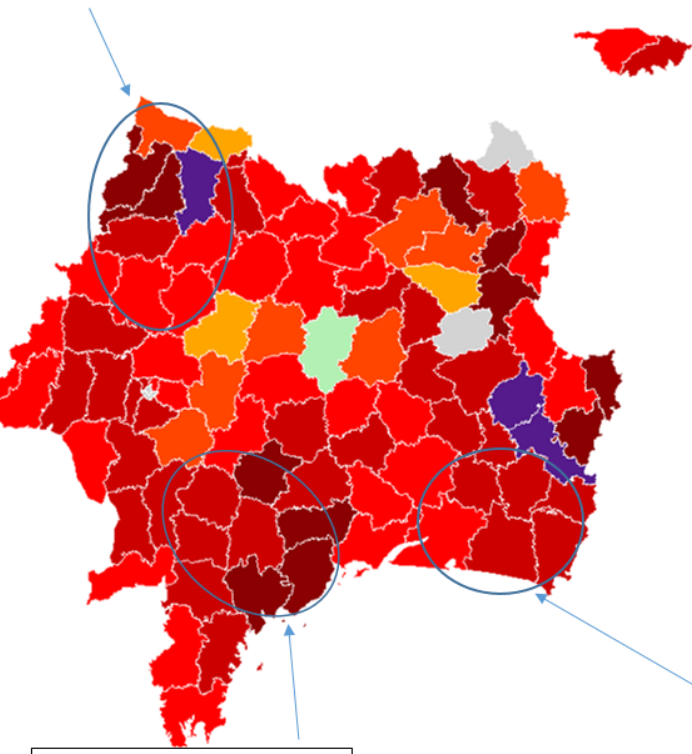
Plus sensible à la sécheresse, le maïs enregistre des disparités importantes. En culture non irriguée, le dessèchement prématuré des plantes a entraîné de faibles rendements. En production irriguée, les restrictions en eau ont empêché des arrosages suffisants. Bien que les mauvaises parcelles soient passées à l'ensilage, le rendement moyen est inférieur de 9 % à celui de 1989 : 68,8 quintaux/ha.

L'Agriculture du POITOU-CHARENTES Bilan 1990:

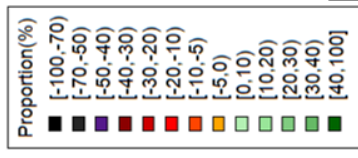


Annexe VIII : Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 2022 pour le Maïs.

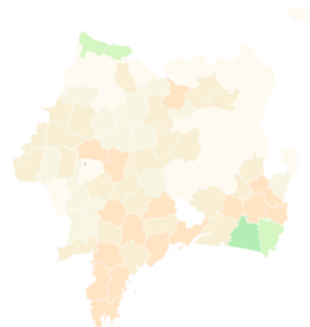
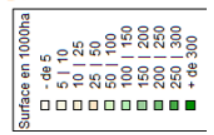
Bilan agricole DRAAF 2022 Pays de la Loire: La Loire passe au seuil d'alerte sécheresse dès le mois de mai, déclenchant le premier arrêté préfectoral de restriction des usages de l'eau en Loire-Atlantique. Les pluies orageuses de juin bénéficient à la végétation, mais les terres restent sèches en profondeur. Durant l'été, l'ensoleillement reste remarquable, la chaleur devient caniculaire et la sécheresse historique par sa durée. Les cultures d'été souffrent. Les pluies orageuses d'août humidifient juste les sols.



Conjoncture Champagne-Ardenne, Lorraine, Alsace 2022: La pluviométrie est nettement déficitaire les cinq premiers mois de l'année, de l'ordre de 30 et 40 %. Seuls quelques millimètres de plus que les normales saisonnières 1991-2020 compensent ce manque d'eau sur la moitié est de la région en avril. La pluie réapparaît plus généralement en juin, avant deux mois très secs.



Bilan agricole 2022 Nouvelle Aquitaine: Tout s'est corsé à partir de fin juin, ou le manque d'eau criant s'est fait ressentir jusqu'à la fin août et l'arrivée des pluies... tardives dans le cycle. L'irrigation a donc été intense et continue entre le début juillet et le 15 août, avec en moyenne 5 à 6 tours d'eau nécessaire pour combler des ETP journalières records. À cette sécheresse s'ajoutent les divers épisodes caniculaires, intenses et continus également, de juillet et août qui ont touché de plein fouet, entre autres, la phase de floraison. Cela a impacté fortement le rendement final avec une phase de pollinisation et fécondation très aléatoire, même au sein d'une même parcelle. Les rendements ont été médiocres et ont atteint 60 à 70 % de l'objectif.



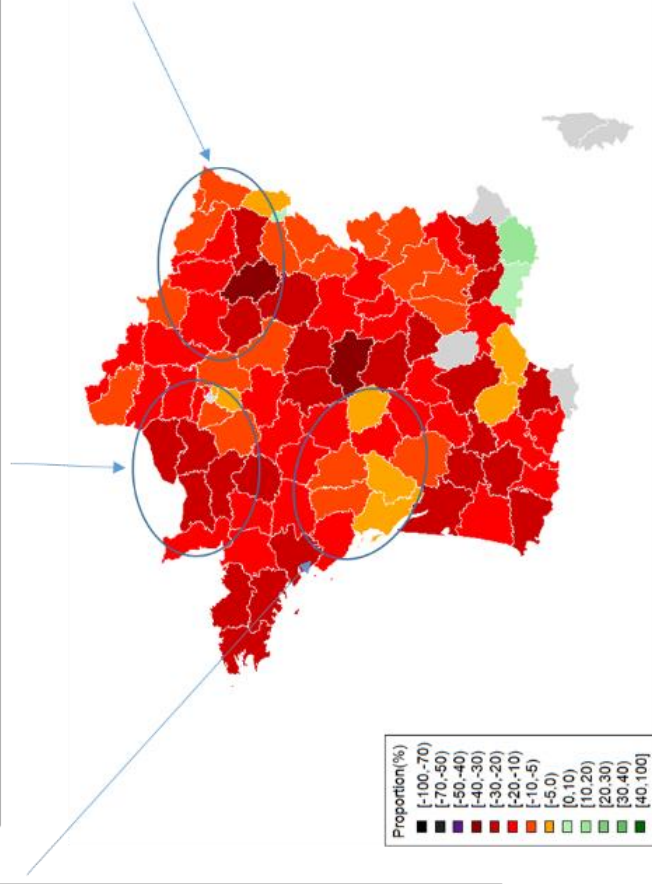
Annexe IX : Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 2020 pour le Colza

Terres Inovia COLZA - Bilan de campagne 2020 Régions Poitou-Charentes/Vendée/Limousin : En 2020, les rendements en colza en France ont été impactés par plusieurs facteurs liés à l'eau. Les températures moyennes élevées ont entraîné une floraison précoce avec une avance de 2 à 3 semaines par rapport aux années précédentes. Cependant, cette période de floraison s'est déroulée dans un contexte de stress hydrique, de mi-mars à fin avril, en particulier pour les terres superficielles. Ce stress hydrique a entraîné une limitation du nombre de siliques par mètre carré et a affaibli le système racinaire du colza, ce qui a eu un impact sur le potentiel de rendement. De plus, les racines ont régulièrement été endommagées par les excès d'eau pendant l'automne et l'hiver. Ces conditions ont également pu retarder la nouaison et entraîner un remplissage limité des siliques, car l'activité photosynthétique était réduite en raison des siliques malades et du système racinaire détérioré.

Terres Inovia COLZA - Bilan de campagne 2020 Régions Normandie/Ile-de-France Ouest: Les défauts de qualité d'implantation, et l'hiver doux et humide n'ont guère laissé de chance au colza pour exprimer son potentiel en 2020. Difficile dans ce contexte de faire face aux aléas climatiques du printemps (stress hydrique, gelées tardives) et les dommages causés par les ravageurs.

A la moisson, les bonnes surprises se trouvent en Ile-de-France Ouest (10 à 50 q/ha, moyenne centrée autour de 36-37 q/ha). En Normandie, pas de miracle : une forte disparité des rendements est constatée aussi (de 5 à 50 q/ha). Mais par rapport à la moyenne quinquennale, le colza accuse un retrait de productivité de 10 à 30 % respectivement pour les départements de l'Eure (moy autour de 31-33 q/ha) et Seine-Maritime (moy 27-28 q/ha) et 15-20 % en Basse-Normandie (moy. 29-30 q/ha).

COLZA - Bilan AGRESTE 2020 – Grand Est : Les colzas subissent pour la troisième année consécutive des conditions défavorables, parviennent en moyenne à 27,7 q/ha. Les rendements sont très variables d'un secteur à l'autre tant les conditions de culture, cette année, sont disparates. Ils sont de - 6,1 % par rapport à 2019 et de - 20,5 % par rapport à la moyenne quinquennale. Les faibles rendements sont dus à un automne pluvieux, un hiver doux, des épisodes de gel fin mars, et un printemps globalement sec.



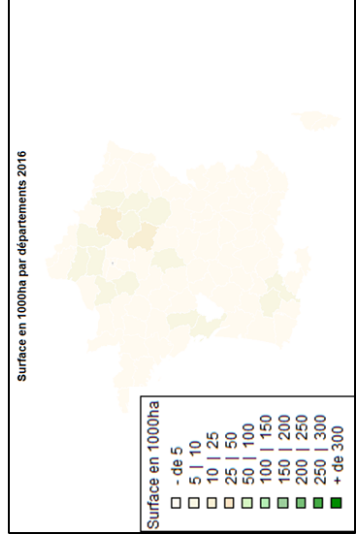
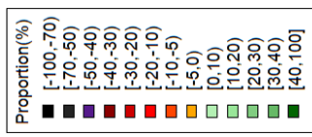
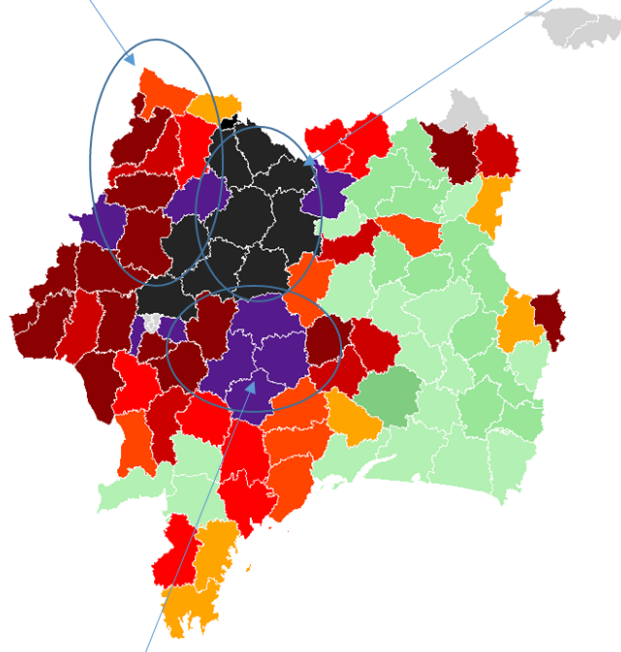
Surface en 1000ha par départements 2020

Annexe X: Utilisation des conjonctures agricoles régionales pour expliquer les pertes de rendements en 2016 pour le Pois protéagineux

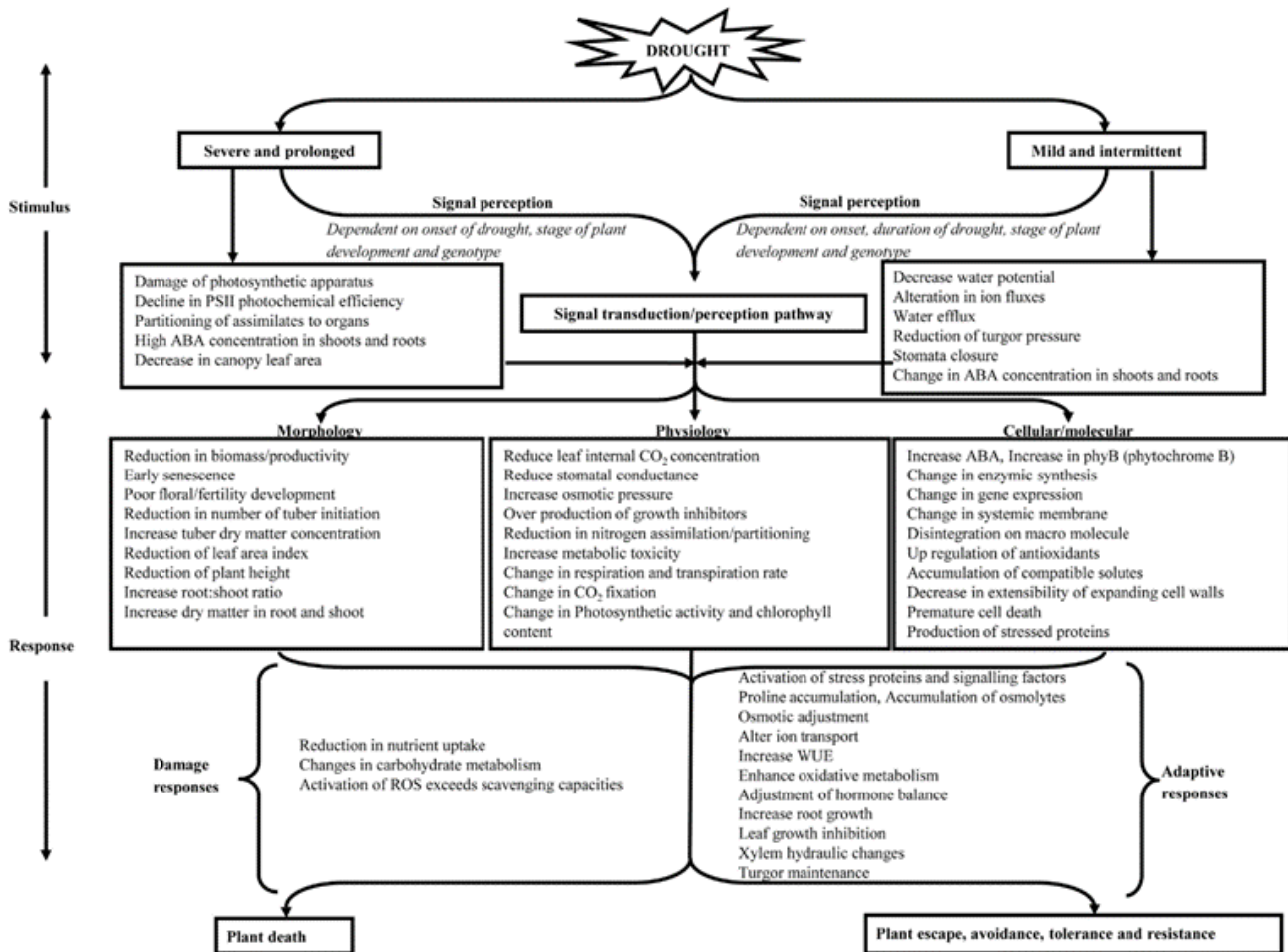
Centre-Val-de-Loire FranceAgrimer: La production a été en chute libre. Une météo implacable, enchaînant douceur, pluies diluviennes et faible ensoleillement, a très durement touché les rendements. Les cultures d'hiver et de printemps ont été concernées, les premières par la pluie, les secondes par la sécheresse surtout pour les cultures non irriguées. **Le rendement des pois protéagineux est de 21 quintaux par ha, soit 16 de moins que la moyenne quinquennale.**

Chambre d'agriculture Grand Est- 55 % en pois protéagineux (avec de nombreuses parcelles en pois d'hiver non récoltées). Les cultures ont subi des températures basses à la montaison (gel au stade méiose affectant le nombre de grains par épis), et des pluies incessantes en mai et juin qui ont entraîné une forte pression maladies et surtout une baisse du rayonnement solaire (perturbation de la fécondation [avortement] et défaut de remplissage des grains

Chambre d'agriculture de Bourgogne Franche Comté : Les pois d'hiver n'ont pas échappé à l'excès d'eau au point qu'en Côte-d'Or la moitié a été broyée avant moisson tant la pourriture avait pris les pieds. La floraison s'effectuait dans de mauvaises conditions: rayonnement insuffisant et pluies abondantes; à la récolte, les épis étaient presque vides et les grains de petite taille. L'Yonne enregistre certainement une moisson pire qu'en 1976 en quantité comme en qualité, l'impact est évalué à plus de 40% de la valeur de la production en grandes cultures (par rapport à une moyenne olympique sur les 5 dernières années), soit 150 millions d'euros.



Annexe XI : Organigramme détaillant l'effet des différents types de sécheresse et la façon dont les pomme de terre réagissent au stimulus aux niveaux moléculaire, physiologique et morphologique (Obidiegwu et al., 2015).



Annexe XII : Evolution tendancielle du climat 2031-2060 - Avignon (maille SAFRAN 4812)

	Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre		
	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	1990-2020	2031-2060	
1	Temérature moyenne	6,4	7	7,3	6,9	10	11	13,4	14	17	18,5	21,9	23,1	24,6	26,3	28,9	30	30,9	31,9	32,6	33,9	35,6	37,2	38,6	39,9
2	Temérature maximale	6,4	8	6,3	7,9	11,2	13,5	14,2	15	18,2	19,4	21,8	24,8	25,9	27,2	28,2	29,8	31,7	32,2	32,6	33,5	34,9	37,1	38,6	40,9
3	Temérature minimale	15,2	16,6	8	16,3	22,8	22,9	25,9	25,4	29,4	30,4	32,8	34,3	34,8	37	36,2	30,3	31,7	26,2	27,6	26,2	19,9	21,9	15,2	16,3
4	Temérature maximale atteinte - années chaudes	17,4	17,9	19,1	20,2	24,6	25	27,6	26,1	30,7	32,3	33,9	35,1	37,3	38,3	38	38,6	31,8	34,5	27,7	28,4	21,7	24,1	17,4	18,6
5	Nombre de jours avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années chaudes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	12	17	23	20	23	2	4,5	0	0	0	0	0	0
6	Nombre de jours avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années chaudes	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	10,4	17,4	24	27	26,2	26	8	8	0	0	0	0	0	0
7	Premier jour avec $T_{max} > 30^{\circ}C$	1-juin	27-mai																						
8	Premier jour avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années précoces	13-mai	16-mai																						
9	Dernier jour avec $T_{max} > 30^{\circ}C$	7-sept.	12-sept.																						
10	Dernier jour avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années tardives	16-sept.	19-sept.																						
11	Nombre de jours avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années chaudes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Nombre de jours avec $T_{max} > 30^{\circ}C$ - années chaudes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	6,6	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Temérature minimale atteinte - années froides	-3,4	-2,7	-2,4	-3,5	0,2	0,6	3,4	4,3	7	8,2	13	14,1	15,9	17	16,2	16,6	10,6	11,9	5,3	6,2	-0,7	0,7	-3,9	-3
14	Temérature minimale atteinte - années froides	-2,6	-1,5	-1	-1,4	0,9	1,5	4,4	5,2	9	10	14,4	15,9	17,2	18,3	18,1	18	11,8	12,9	6,6	7,2	1,1	1,1	-2,5	-0,8
15	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits [°C]	12,9	13,1	14,1	14,5	16,6	15,8	16,4	16,4	16,3	16,1	14,8	15,1	15,1	15	15,7	15,9	15,4	14,6	15,4	14,1	13,9	11,9	12,1	12,8
16	Amplitude thermique maximale entre jours et nuits [°C] - années chaudes	14,2	14,2	15,9	15,5	17,7	17,1	17,5	17,2	17,5	17,1	16	15,5	15,8	16,4	16,4	16,7	16,8	16,4	15,8	16,3	15,2	14,9	13	12,8
17	Nombre de jours de gel [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années froides	9	5	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	Nombre de jours de gel [$T_{min} < 2^{\circ}C$] - années froides	13	7,2	6,4	9	2,2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,2	2	11,4
19	Nombre de jours de gel [$T_{min} < 2^{\circ}C$] - années froides	4	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
20	Date de la première gelée [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années tardives	6,2	3	4,2	4,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7
21	Date de la première gelée [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années tardives	18-nov.	8-déc.																						
22	Décalage de la première gelée par rapport à 1991-2020 (jours)	20																							
23	Date de la première gelée [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années précoces	12-nov.	23-nov.																						
24	Décalage de la première gelée par rapport à 1991-2020 - années précoces	11																							
25	Date de la dernière gelée [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années tardives	5-mars	23-fev.																						
26	Décalage de la dernière gelée par rapport à 1991-2020 (jours)	-10																							
27	Date de la dernière gelée [$T_{min} < 0^{\circ}C$] - années tardives	19-mars	6-mars																						
28	Décalage de la dernière gelée par rapport à 1991-2020 - années tardives	-13																							
29	Nombre de jours de pluie - années sèches	0	0	1	2	1	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
30	Nombre de jours de pluie - années humides	5	6	5	4	6	6	7	8	8	7,5	5	4,5	4	4	3	3	7	6	6	7	7	6,5	5	
31	Nombre de jours de pluie - années humides	11	12	12	12	12	12	12	13	14	16	19	19	19	19	18	12	12	14	16	12	12	15	11	
32	Cumul de précipitations mensuel - années sèches	17,9	22,4	15,3	13,2	25,4	17,5	25,8	27,6	24,9	24,9	13,9	10,6	10,1	6,6	5,9	7,6	34,2	27,7	36,9	26	31,1	21,5	25,4	
33	Cumul de précipitations mensuel - années normale	28,1	31,3	42,2	40,4	65,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6
34	Cumul de précipitations mensuel - années humides	39,9	36,2	40,2	42,2	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6
35	Nombre de jours de précipitations > 1mm - années normales	21	19,6	21,6	21	17,6	19,6	24,3	18,3	35,3	32,2	23,5	25,4	12,8	14,4	14,6	17,4	48,3	33,6	40,5	35,5	28,3	37,1	26,7	
36	Nombre de jours de précipitations > 1mm - années normales	35,6	47,9	35,8	45,9	35,7	51,9	48,7	35,9	54,3	43,6	48	39,4	31,2	41,5	46,1	73,5	44,1	74,8	77,5	59,2	61,3	42,8	38,6	
37	P - ETP - années sèches	-29,3	-24,4	-48,5	-51,2	-68,4	-68,4	-91,7	-104,6	-138,1	-147,1	-186,8	-224,3	-225,9	-247,3	-187,1	-204,5	-109,8	-126,5	-43,8	-65,2	-12,8	-23,7	-13,2	
38	P - ETP - années normale	1	0,9	-17,4	-18,4	-37,7	-43,3	-60,8	-59,7	-90,3	-100,4	-163,8	-181,4	-186,8	-214,6	-148,4	-179,8	-39,7	-41,8	-1,6	-5,2	21,7	16,4	14,3	
39	P - ETP - années humides	27,2	37,5	13,4	7,8	5,2	26,4	-25,2	-40,6	-55,3	-65,1	-103,7	-117,9	-152,4	-173,7	-94,6	-115,5	29,1	-25,9	72,7	98,1	65,7	73,8	46,2	
40	Cumul mensuel de l'ETP	38,5	40,2	58,3	58,9	70,4	73,8	110	113,7	163,1	164,8	196	217,6	210,7	238,5	180,8	199,1	124,6	80,2	74,8	80,2	39,2	41	33,5	
41	Cumul mensuel de l'ETP - années hautes	46,7	48,1	64	63	78,5	83,7	120,7	129,2	177,1	183,5	210,4	239,2	236	263,3	214,2	242,7	154,7	89,9	89,6	45,3	49,1	35,9	39,4	
42	Humidité moyenne de la journée - années normales	73,8	73,7	67,6	66,8	68	65,1	65,2	63,4	60,6	61,3	53,4	57,6	56,4	53,9	55	53,3	65,5	62,3	73,5	70,8	75,8	74,7	74,9	
43	Humidité moyenne de la journée - années humides	76	76,3	71,2	69,7	72,4	73,4	67,9	67	66	67,6	66,1	65	60,1	58,5	59,4	61	71,2	67,3	77,4	77,2	78,3	78,2	77,1	
44	Indice d'humidité des sols (SWI) moyen - années sèches	0,57	0,45	0,17	0,48	0,57	0,51	0,5	0,46	0,42	0,36	0,31	0,27	0,23	0,18	0,18	0,13	0,2	0,15	0,3	0,23	0,41	0,31	0,57	
45	Indice d'humidité des sols (SWI) moyen - années normale	0,72	0,71	0,71	0,69	0,65	0,65	0,58	0,6	0,48	0,47	0,37	0,31	0,26	0,24	0,22	0,2	0,27	0,22	0,42	0,31	0,54	0,47	0,67	
46	Indice d'humidité des sols (SWI) moyen - années humides	0,79	0,81	0,76	0,79	0,8	0,73	0,7	0,67	0,56	0,6	0,46	0,46	0,32	0,3	0,26	0,25	0,38	0,3	0,6	0,46	0,7	0,71	0,78	
47	Nombre de jours sol sec (SWI < 0,4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	29	31	31	31	31	28,5	30	9	9	27,5	0	7,5	0	
48	Nombre de jours sol sec (SWI < 0,4) - années sèches	0	0	0	0	0	0	0	0	6,4	13	24	30	30	31	31	31	30	30	29,4	31	16,8	0	27,3	
49	Nombre de jours avec humidité relative > 80%	6,5	6	6,5	8	6	4,5	4	5	5	4	5	5	4	4	3,5	6	2,5	3	5	5,5	5	5	7,5	
50	Nombre de jours avec humidité relative > 80% - années normales	12,2	9,4	11,2	11	7,2	8	7	8	7,2	6,2	7	7	6	7,2	6,2	5	5,2	7	7,2	7	7,2	7	9,2	
51	Nombre de jours avec humidité relative > 80% - années précoces	28-mars	15-mars																						
52	Nombre de jours avec humidité relative > 80% - années précoces	9-mars	2-mars																						
53	Nombre de heures de froid [$T_{min} < 5^{\circ}C$] - années chaudes	0	0	0	0	0																			

Résumé :

Le changement climatique accentue la fréquence et l'intensité des sécheresses mais également des épisodes pluvieux extrêmes, ce qui altère le fonctionnement physiologique des plantes cultivées et menace la production agricole. Dans ce contexte, l'unité AgroClim développe des outils et des méthodes pour étudier la faisabilité climatique des cultures. Ainsi, les indicateurs agroclimatiques synthétisent les effets du climat sur des dates clés, et permettent de comparer les effets du climat dans différents territoires et à différents horizons temporels. L'objectif de l'étude est de déterminer quels indicateurs relatifs à la sécheresse et aux excès d'eau sont pertinents pour des cultures d'intérêt. Les résultats de celle-ci ont permis dans un premier temps de déterminer les périodes de vulnérabilités des cultures de blé tendre, maïs, colza, soja, pois et pomme de terre et de proposer des indicateurs. Ces indicateurs ont ensuite été calculés et spatialisés lorsqu'ils étaient disponibles sur la plateforme Siclima. Une méthode d'estimation des pertes de rendement et des conjonctures agricoles ont permis de valider la robustesse des indicateurs basés sur des données climatiques et de détecter un problème avec ceux basés sur le bilan hydrique. Afin de pouvoir calculer de nouveaux indicateurs, vérifier leurs robustesses et déterminer des seuils de tolérance, un code R sera créé à la suite de cette première partie de travail.

Mots clés : Changement climatique ; déficit hydrique ; excès d'eau ; indicateurs ; phénologie