



Rapport de stage de Master 2

Impact du changement climatique sur la productivité des cultures européennes majeures

Hager NAJLAOUI

Etudiante en Master 2 Forêt Agronomie Environnement
Spécialité : Biologie des Interactions Plantes-Environnement

Maitre de stage :

Nathalie De Noblet-Ducoudré (LSCE)

Co-encadrant :

David Leclere (LSCE/INRA)

En collaboration avec :

Pierre-Alain Jayet (INRA - UMR Economie Publique)

Thierry Dore (INRA/Agroparistech)

Table des matières

1	Changement climatique et agriculture	8
2	Quels impacts du changement climatique sur l'agriculture Européenne?	10
2.1	Impacts sur la physiologie des plantes	11
2.1.1	Effet de l'augmentation de la concentration du CO_2	11
2.1.2	Effet de l'augmentation de la température	11
2.2	Effets attendus sur la production végétale agricole en Europe	11
2.2.1	Effet de l'augmentation du CO_2	11
2.2.2	Effet de l'augmentation de la température	12
3	Protocole expérimental, Scénarios climatiques et présentation du modèle STICS	13
3.1	Protocole et scénarios climatiques	13
3.1.1	Description de la zone d'étude	13
3.1.2	Données climatiques et methodologie	13
3.2	Présentation du modèle STICS, Choix des variables d'intérêt et Les entrées du modèle STICS dans notre étude	14
3.2.1	STICS :Stimulateur MULTIdisciplinaire pour les Cultures Standard	14
3.2.2	Choix des variables d'intérêt pour notre étude	15
3.2.3	Les facteurs limitants	16
3.2.4	Les entrées du modèle STICS	18
4	Résultats et discussions	18
4.1	Généralité sur l'évolution des rendements	21
4.2	Répartition géographique de l'évolution des rendements avec le changement climatique	21
4.3	Examen des composantes de rendement	22
4.4	Impact du changement climatique sur la culture de blé tendre et de maïs	23
4.4.1	Changement climatique et la culture de blé tendre	23
4.5	Changement climatique et la culture de maïs	27
A	Annexe	35
B	Annexe	36
C	Annexe	38
D	Annexe	39
E	Annexe	40
F	Annexe	41
G	annexe	44

Table des figures

1	4
2	Descriptif du changement climatique par l'IPCC	8
3	Etape de la projection d'un changement climatique d'origine anthropique à l'étude d'impact	10
4	Carte des Régions RICA de l'UE à 15 (Godard, 2005)	13
5	Boxplots du rendement observé (OBS), du rendement simulé par le modèle STICS au climat présent (CTL) et du rendement simulé au climat futur (A2H2), exprimés en $[t\ ha^{-1}]$, pour les cultures de (bd(blé dur), bl(blé tendre), bt(betterave à sucre), cz(colza), ma(maïs), oh(orge d'hiver), op(orge du printemps), pt(pomme de terre), tr(tournesol) et sj(soja))	20
6	Carte de la répartition géographique de rendement moyen $[t\ ha^{-1}]$ par région de la culture de blé tendre au climat présent et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$	24
7	Composante de rendement de la culture de blé tendre au climat présent pour une dose d'azote = $160\ kgN\ ha^{-1}$; les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale	24
8	Carte de la répartition géographique de la variation du rendement par région de la culture de blé tendre et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$	26
9	Composante de rendement de la culture de blé tendre au climat futur pour une dose d'azote = $160\ kgN\ ha^{-1}$; les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale	26
10	Carte de la répartition géographique de rendement moyen $[t\ ha^{-1}]$ par région de la culture de maïs au climat présent et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$	28
11	Illustration des courbes de composantes de rendement pour la culture de maïs au climat présent (CTL) pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$	28
12	Fraction des cas irrigués par région pour la culture de maïs	29
13	Carte de la répartition géographique de la variation du rendement par région de la culture de maïs et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$	29
14	Illustration des courbes de composantes de rendement au climat futur (A2H2) pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$, les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale	30
15	Illustration du scénario climatique présent [CTL], en termes de la moyenne saisonnière des températures en $[^{\circ}C]$ (à gauche) et du cumul saisonnier des précipitation en $[mm]$ (à droite)	36

16	Illustration du changement climatique [A2H2 - CTL], en termes de moyenne sur 30 ans de la différence : de la moyenne saisonnière des températures en [°C] (à gauche) et du cumul saisonnier des précipitation en [en relatif, %] (à droite) . . .	37
17	Schéma de principe du modèle STICS : les entrées, le système modélisé, les modules et les sorties	38
18	Variation de rendement par region [(A2H2 - CTL)/CTL] [%] et pour une dose d'azote égale à 160 kgN ha^{-1}	40
2		
42		
20	Courbes d'élaboration de rendement au climat futur (A2H2) pour toutes les cultures et pour l'EU à 15; la première courbe (Yield vs PGmean) représente la variation du rendement [t ha^{-1}] en fonction du poids moyen du grain [g], la deuxième courbe (Yield vs NBgrain) représente la variation du rendement [t ha^{-1}] en fonction du nombre du grain m^{-2} et la troisième courbe (NBgrain vs INN) représente la variation du nombre du grain m^{-2} en fonction de l'indice du stress azoté (INN)	43
21	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de la France (fra1)(Nord de la france)	44
22	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de la France (fra2)(Sud de la france)	45
23	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de l'Espagne (Nord de l'Espagne)	45
24	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de l'Espagne (Sud de l'Espagne)	46
25	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de maïs et pour la région du (Sud de l'Espagne)	46
26	Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de maïs et pour la région du (Sud de l'Espagne)	47

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE

Master STVE d'AgroParisTech Nancy Spécialité « Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes »	TRAVAUX D'ÉLÈVE 3
TITRE : Impact du changement climatique sur la productivité des cultures européennes majeures	Mots clés : Changement climatique – Productivité – Cultures européennes majeures.
AUTEUR(S) : Hager NAJLAOUI	Année : 2010
Caractéristiques : XX volumes ; XX pages ; XX figures ; XX annexes ; XX cartes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : LBCE : Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement INRA GRIGNON Nom du responsable : Nathalie De Nyplai découde Fonction :		
Nom du correspondant AgroParisTech Nancy : NON		
Stage	OUI <input checked="" type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>	Date de remise : 27/03/2010
Contrat avec Gesti Services Nancy <input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études APT)

- Consultable et diffusible
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusible

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

J'exprime ainsi ma profond gratitude à Madame Nathalie De Noblet-Ducoudré, mon responsable de stage, tant pour m'avoir accordé sa confiance que pour m'avoir encadrée et guidée dans mon travail. Sa compétence, sa motivation, ses précieux conseils, sa disponibilité, ont permis le bon déroulement de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur David Leclere qui m'a encadrée et encouragé. Ses critiques, ses corrections et surtout son aide et ses conseils avisés ont constitué une grande motivation pour moi. Merci de m'avoir supportée durant ces mois et de m'avoir guidée tout au long du stage et surtout pour les explications aux caprices de R.

Je remercie également vivement Monsieur Thierry Doré qui a eu la patience de m'aider et de chercher avec moi les explications agronomiques. Merci beaucoup pour les corrections de la troisième partie de mon rapport concernant les résultats et l'interprétation.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Pierre-Alain Jayet pour m'avoir accepté et accueillie dans l'UMR d'Economie Publique INRA-Agroparistech.

Je n'oublie évidemment pas de remercier ceux qui ont donné de leur temps et de leur énergie pour m'aider. Je remercie toute l'équipe de l'UMR d'Economie Publique INRA-Agroparistech et aussi bien celle du LSCE.

Ce stage, m'a permis d'intégrer une formidable équipe de l'UMR d'Economie Publique INRA-Agroparistech, je n'aurais jamais cru qu'une aussi bonne ambiance puisse exister sur un lieu de travail.

Impact du changement climatique sur la productivité des cultures européennes majeures

Résumé

Les systèmes agricoles sont intimement liés au changement climatique. Ils sont d'une part affectés par la dérive de son état moyen et la modification de sa variabilité, et sont d'autre part des contributeurs nets à la composition chimique de l'atmosphère et influencent le cycle énergétique du climat. Ainsi les modes de gestion des agro-systèmes sont donc déterminants tant pour des questions d'adaptation au nouveau contexte climatique que d'atténuation du changement climatique lui-même.

Ce stage a pour but d'établir un diagnostic agronomique régionalisé de l'impact de l'évolution projetée du climat sur la productivité des principales cultures européennes à l'horizon de la fin du 21ème siècle. Pour ce faire, on va utiliser des résultats de simulation d'un modèle de culture (STICS), sous différents scénarios climatiques, pour des hypothèses pédologiques et de conduite de culture régionalisées, afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les principales cultures européennes. Ce diagnostic qui s'appuie sur les méthodes agronomiques d'explication de la variabilité du rendement servira donc à proposer une stratégie d'adaptation via l'amélioration des pratiques culturales utilisées. Les résultats indiquent que l'évolution du rendement pour une culture est une intégration très compliquée d'un ensemble de facteurs climatiques (température, précipitation) et de mode de gestion de la culture (fertilisation azotée, irrigation). Ainsi, un effet du changement climatique jugé globalement peut cacher des évolutions localement contrastées selon les régions.

Abstract

Agro-systems are closely linked to climate change : they are affected by the evolution of the mean state and the variability of the atmosphere, but they also contribute to climate change through the modification of its energy cycle and the chemical composition of the atmosphere. Thus the management of agro-systems has to include both the adaptation to new climatic conditions and the issues related to climate change mitigation.

This course aims to establish a regionalized diagnosis of the impact of projected climate changes on the productivity of the major European crops up to the end of the 21st century. to do this, we will use simulation results of a crop model (STICS), under various climate scenarios, assuming for regional soil characteristics and farming techniques in order to assess the impact of climate change on main european crops. This diagnosis will serve to provide an adaptation strategy through improving farming practices used. The results indicate that crop yield evolution is a very complicated integration of a set of climatic factors (temperature, precipitation) and of management practices (nitrogen fertilization, irrigation). Thus, one effect of climate change at global level can hide local contrastive changes between regions.

Introduction

Les systèmes agricoles sont intimement liés au changement climatique. Ils sont d'une part affectés par la dérive de son état moyen et la modification de sa variabilité, et sont d'autre part des contributeurs nets à la composition chimique de l'atmosphère et influencent le cycle énergétique du climat. Par conséquent, l'évolution du climat projeté pour les prochaines décennies aura un impact, très variable selon les régions, sur la production agricole des processus physiologiques à la phénologie et même de la répartition géographique des cultures. L'agriculture ce faisant continuera d'influencer divers processus du système climatique. Ainsi les modes de gestion des agro-systèmes sont donc déterminants tant pour des questions d'adaptation au nouveau contexte climatique que d'atténuation du changement climatique lui même.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse dont le principal volet est l'étude des impacts de scénarios associant changements climatiques et économiques (régulation de l'impact environnemental, incorporant par exemple un dispositif incitatif de type taxe carbone) sur la productivité de l'offre agricole européenne et sur les échanges sol-végétation-atmosphère.

On propose dans ce stage d'établir un diagnostic agronomique régionalisé de l'impact de l'évolution projetée du climat sur la productivité des principales cultures européennes à l'horizon de la fin du 21ème siècle. Pour ce faire, on va utiliser des résultats de simulation d'un modèle de culture (STICS), sous différents scénarios climatiques, pour des hypothèses pédologiques et de conduite de culture régionalisées, afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les principales cultures européennes (blé tendre, blé dur, orge, maïs grain, colza, tournesol, betterave à sucre et soja). Dans un premier temps, on se propose d'établir un diagnostic agronomique régionalisé des causes de l'évolution de la productivité, en lien avec les limitations des conditions climatiques à la productivité. Dans un deuxième temps, ce diagnostic servira à proposer une stratégie d'adaptation via l'amélioration des pratiques culturales utilisées.

Ce mémoire de master s'articulera autour de trois parties. Dans la première partie, on dressera une synthèse bibliographique dans laquelle on s'intéresse successivement au changement climatique et l'agriculture, aux impacts du changement climatique sur la physiologie de la plante et les impacts attendus sur la production végétale agricole en Europe. Dans la deuxième partie, on présente les modèles utilisés, les données et les variables utilisées et la méthodologie avec laquelle ont été traitées les données dont on dispose. La troisième partie s'intéressera à l'interprétation des résultats et discussions.

1 Changement climatique et agriculture

Le climat de la Terre dépend de nombreux facteurs, tels que la teneur en gaz à effet de serre (GES) de l'atmosphère, la quantité d'énergie provenant du soleil, aussi bien les propriétés de la surface de la terre. Quand il y a une modification de ces facteurs, ceux-ci provoquent un réchauffement ou un refroidissement de la planète, car il modifie la quantité d'énergie solaire qui sera absorbée ou réfléchiée dans l'espace. Le changement climatique est le résultat, en grande partie, de l'activité humaine et en particulier de la production industrielle, et de l'évolution de l'usage et de la couverture des sols. Ces types d'activités contribuent à une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, de méthane, d'oxyde nitreux et d'autres gaz à effet de serre ainsi que d'aérosols dans l'atmosphère, perturbant ainsi le bilan énergétique de l'enveloppe superficielle terrestre, ainsi que ses bilans hydrologique et chimique (IPCC, 2007). Pour autant, les activités humaines sont sensibles à l'état du système climatique, et l'impact de l'évolution de ce dernier entraîne une boucle de rétroaction, décrite dans la figure 1¹.

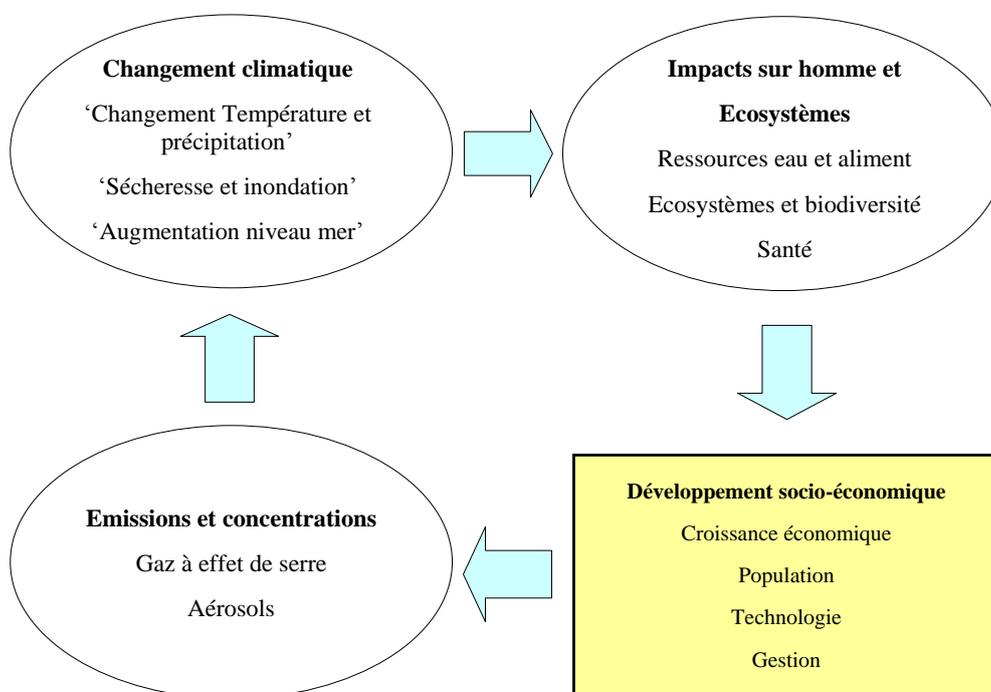


FIGURE 1 – Descriptif du changement climatique par l'IPCC

Parmi les activités humaines qui participent à cette boucle de rétroaction, l'agriculture intervient par les mécanismes suivants :

- Les mécanismes d'influence de l'agriculture sur le climat qui appartiennent à deux grandes catégories : les processus biogéochimiques et les processus biophysiques. Dans le premier cas, l'effet principal de l'influence de la végétation est la modification du contenu en GES (vapeur d'eau, CO_2 , CH_4 , N_2O) de l'atmosphère par échange avec le sol. Dans le deuxième cas, les processus sont les variations d'albédo de surface qui ont un impact régional sur le bilan radiatif de surface ; les variations de rugosité changeant l'efficacité du transfert convectif dans l'atmosphère des flux échangés avec le sol ; enfin les variations

1. <http://www.lenntech.fr/effet-de-serre/ipcc-sres-scenarios-causes.htm>

d'évaporation du sol en changeant le cycle hydrologique, impliquant un couplage avec les processus biogéochimiques (IPCC, 2007).

- Les mécanismes d'impact du changement climatique sur l'agriculture : cette partie sera bien développée dans le chapitre suivant.

Pour comprendre et prévoir les impacts du changement climatique, la modélisation est l'outil le plus utilisé pour l'évaluation quantitative des impacts du changement climatique. Selon l'objectif à évaluer (la production agricole sous l'effet d'un changement climatique, le comportement des agriculteurs, l'évolution du changement climatique,...), selon le formalisme, selon l'échelle d'étude, plusieurs types de modèles sont identifiés : les modèles écophysologiques (SUCROS, ARCWHEAT), les modèles agronomiques (STICS, CERES, APSIM, GOSSYM), les modèles agro-environnementaux (EPIC, CROPSYST) et les modèles économiques (AROPAj, OCDE, AGLINK) (Godard, 2005).

Comme le montre la figure 2 (basé sur le GIEC²), il existe un enchaînement des étapes depuis les scénarios des émissions (GES) jusqu'à l'étude de l'impact. Première étape, la réalisation des scénarios des émissions qui correspondent à des évolutions des sociétés humaines cohérentes au niveau socio-économique. De ces scénarios sont calculés des trajectoires d'émissions de GES qui servent à forcer les modèles globaux de climat.

Ces scénarios sont une première source d'incertitude, la plus importante car il existe une relation de corrélation établie entre la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans le futur et le réchauffement climatique, associée à notre représentation de l'évolution des sociétés humaines (IPCC, 2000). A cette incertitude se rajoute celle de notre compréhension du système climatique, ainsi qu'à l'incertitude intrinsèque au système climatique. Enfin, les modèles de climat génèrent des données de changements climatiques qui sont souvent inexploitable tel quel pour l'étude d'impact (la résolution spatiale et temporelle est insuffisante, le maillage étant trop grossier et les processus représentés insuffisants). Il faut alors régionaliser ces projections globales de climat, et il existe pour cela plusieurs méthodes, ceci rajoute un niveau d'incertitude lié aux choix des méthodes de la régionalisation (Brisson & Levrault, 2010; Soussana et al., 2010; James et al., 2006). Par ailleurs, il existe d'autres sources d'incertitude telles que les incertitudes liées aux choix des modèles d'impact comme les modèles agronomiques, économiques qui sont construites avec des objectifs et des formalismes de modélisation différents aboutiront, pour des conditions identiques, à des variables de sorties différentes. Finalement, les incertitudes liées à une connaissance insuffisante sur l'intégration de certains processus et facteurs comme les éléments nutritifs du sol, les ravageurs, les mauvaises herbes aussi bien les interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques.

Par conséquent, malgré les différentes incertitudes réduisant la confiance aux résultats de la modélisation. Cette dernière offre la possibilité d'étudier l'évolution du climat dans le futur, d'évaluer quantitativement l'impact du changement climatique et donc la réalisation des stratégies d'adaptation afin de minimiser les impacts négatifs et même améliorer la situation.

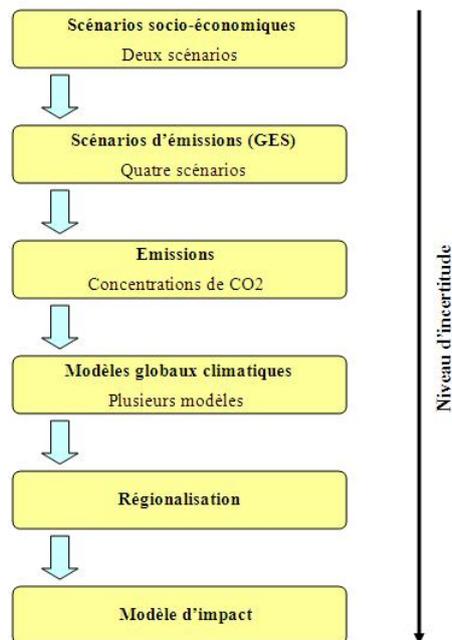


FIGURE 2 – Etape de la projection d'un changement climatique d'origine anthropique à l'étude d'impact

2 Quels impacts du changement climatique sur l'agriculture Européenne ?

Nous commencerons par détailler les caractéristiques du changement climatique que nous étudions, en terme de variable d'intérêt, et de leur valeur dans nos scénarios. Dans cette étude bibliographique, d'après DaMatta et al. (2009) et Lavalle et al. (2008), ce changement se caractérise par :

- Accroissement de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère caractérisé par une homogénéisation entre les régions.
- Augmentation de la température à la surface du globe avec une forte disparité entre les régions et entre les saisons : cette variabilité indique une évolution du climat plus complexe qu'une simple augmentation.
- Augmentation de la variabilité des régimes pluviométriques avec une tendance très claire à une variabilité dans le temps et dans l'espace.
- Augmentation de la concentration troposphérique de l'ozone.
- Augmentation des fréquences des événements extrêmes.

Les deux dernières caractéristiques du changement climatique ne seront pas détaillées dans le cadre de cette étude du changement climatique sur la production agricole.

Ensuite nous détaillerons les mécanismes physiologiques des plantes qui sont le plus dépendant des variables, et enfin, nous détaillerons les impacts attendus en terme de production agricole.

2.1 Impacts sur la physiologie des plantes

2.1.1 Effet de l'augmentation de la concentration du CO_2

Avec l'hypothèse d'un doublement de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère pour la fin du 21^{me} siècle (IPCC, 2007), cette hausse aura un effet bénéfique sur le couvert végétal en favorisant l'activité photosynthétique des plantes (DaMatta et al., 2009). D'après Seguin (2007), les résultats montrent une simulation de la photosynthèse de l'ordre de 20% à 30% conduisant à une augmentation de l'assimilation nette de l'ordre de 10% à 20% en fonction du type du métabolisme photosynthétique. Bien que cette augmentation de la concentration du CO_2 sera combiné à d'autres facteurs comme la conductance stomatique (avec une réduction moyenne de 20% pour un doublement de la concentration actuelle de CO_2 (IPCC, 2007)), la limitation de la transpiration qui conduit à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. La combinaison de tous ces facteurs conduira à une augmentation significative de la production potentielle de biomasse (Cornic, 2007). Rien que cet effet se fait sentir aussi bien chez les plantes en C_3 que chez les plantes en C_4 , à cause d'un plateau de saturation de la photosynthèse atteint à des concentrations en CO_2 inférieures pour les plantes en C_4 .

2.1.2 Effet de l'augmentation de la température

D'après le rapport de GIEC (2002), la température moyenne mondiale à la surface devrait augmenter de 1,4 à 5,8°C pour la période entre 1900 et 2100. L'augmentation de la température aura des effets différents en fonction de leur interaction avec d'autres paramètres climatiques (concentration du CO_2 , pluies) aussi bien en fonction de l'espèce. En effet, les températures élevées peuvent perturber les capacités photosynthétiques de la plante. Si l'optimum thermique pour la photosynthèse est atteint (cas de l'hémisphère Sud), la fertilité des épis pour certaines cultures décroît fortement, par exemple pour le riz, au delà de 34°C, pour le maïs, la viabilité du pollen baisse au delà de 36°C (Seguin et al., 2004a)(Seguin & Stengel, 2002). Dans certaines conditions, l'augmentation de la température peut favoriser la plupart des processus physiologiques, mais cet effet sera accompagné par des impacts négatifs sur les cultures en accélérant leur rythme de développement et donc raccourcissement de leur durée de fonctionnement.

2.2 Effets attendus sur la production végétale agricole en Europe

2.2.1 Effet de l'augmentation du CO_2

D'une manière générale, sous l'effet de l'augmentation de la concentration du CO_2 et sous l'effet de la fertilisation du CO_2 , il y a une tendance à une augmentation légère du rendement dans l'Europe avec une grande disparité entre les régions (l'Europe du Sud et l'Europe du Nord) et entre les cultures. D'après les travaux effectués dans le cadre de l'IPCC (3^{me} rapport), les résultats des simulations effectuées avec différents modèles de culture permettent de conclure :

- Des augmentations relatives des rendements prévues principalement en Europe du Nord par exemple pour la culture de blé; +2 à 9% en 2020; + 8 à +25% en 2050 et +10 à +30% d'ici 2080 et la betterave à sucre de 14 à 20% jusqu'au 2050.
- Tandis qu'une réduction générale des rendements est prévue dans le Sud de l'Europe par exemple (les légumineuses (-30 à + de 5%); le tournesol (-12 à 3% en 2050) avec une augmentation de la demande en eau pour les cultures semées au printemps comme la culture de maïs (de 2% à +4%) et de 6 à 10% pour la pomme de terre en 2050.

Outre la quantité, les rendements peuvent être affectés en terme de la qualité du produit final surtout en modifiant la teneur en azote des productions et donc la teneur en protéines. Cependant, pour pouvoir quantifier l'impact du changement climatique du CO_2 sur la productivité, il ne faut pas prendre en compte uniquement la variation du CO_2 , mais faire intervenir les interactions qui peuvent exister entre toutes les composantes de variation du climat :

- Une hausse du taux de CO_2 , accompagnée d'une augmentation modérée de la température, si les ressources en eau sont suffisantes, entraînera alors une production globalement plus forte, avec des disparités selon les cultures (effet très bénéfique pour le riz, le soja, le coton/effet moins bénéfique pour le maïs, la canne à sucre, le sorgho).
- Une hausse du taux de CO_2 , accompagnée d'une augmentation de température d'environ $3^\circ C$ et d'une diminution des pluies de 20%, conduira à une réduction de rendement pour toutes les cultures de champs.
- Une hausse du taux de CO_2 , accompagnée d'une augmentation importante de la température et d'une augmentation modérée des pluies raccourcira la période de croissance, et à terme entraînera une baisse de la production.

Le tableau (annexe A) récapitule les résultats des simulations effectuées pour quantifier l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Europe (les cultures à grains les plus répondues ; blé, maïs, tournesol, soja) (Olsen & Bindi, 2002; IPCC, 2007).

2.2.2 Effet de l'augmentation de la température

L'accroissement de la température affecte de manière significative la longueur de la saison de croissance, principalement par l'augmentation de la température en automne et au printemps, de plusieurs plantes annuelles comme les grandes cultures. Selon les travaux du GIEC, l'Europe sera plus chaude dans toutes les saisons pour tous les scénarios, mais le réchauffement sera plus important dans l'Ouest et le Sud de l'Europe en été et dans le Nord et l'Est de l'Europe en hiver. Plus d'allongement de la saison de croissance est donc s'attendre dans ces régions du Nord et de l'Est, tandis qu'en Europe occidentale et méridionale, la disponibilité en eau limitée et les températures élevées durant l'été va affecter la croissance. Ensuite, en ce qui concerne l'impact sur le rendement, l'action de la chaleur aura plus d'impact au moment de la floraison, pendant laquelle le nombre des grains est établie, et du remplissage des grains, quand le poids moyen du grain est déterminé. De plus, les températures élevées provoquent des forts risques d'échaudages ainsi que des perturbations des périodes floraison, pollinisations et fructifications (Lavalley et al., 2008; Seguin & Stengel, 2002).

Pour les arbres fruitiers et la vigne (Seguin et al., 2004a,b), l'effet fondamental de la température devrait être l'avancée des stades phénologiques (la période de maturité sera avancée de 3 à 5 semaines dans le sud de la France (Seguin & Soussana, 2006)) qui peut poser des problèmes de risque du gel au moment de la floraison et aussi la qualité du produit par l'avancée des stades sensibles (Lavalley et al., 2008).

Enfin, l'humidité et les ressources en eau seront affectées par une augmentation de la température, indépendamment de tout changement dans les précipitations, puisque cette hausse augmenterait la cadence d'évaporation, réduisant ainsi le niveau d'humidité disponible pour la croissance des plantes. Un réchauffement de $1^\circ C$, sans changement dans les précipitations, pourrait diminuer les rendements de blé et de maïs d'environ 5%.

En somme, les résultats observés sur les différentes cultures confirment les généralités : dans l'ensemble, l'impact du changement climatique sur l'agriculture est positif (hausse des rende-

ments), mais il existe de fortes disparités régionales. Les régions septentrionales de l'Europe devraient voir leurs conditions climatiques devenir plus propices à l'agriculture, grâce à une hausse modérée des températures et à une hausse des précipitations. A l'inverse, les régions méridionales devraient subir des régimes de température supérieurs aux optimums des processus physiologiques en été et souffrir d'une diminution des précipitations. Les effets largement positifs au Nord sont estimés susceptibles de compenser des effets négatifs au Sud.

3 Protocole expérimental, Scénarios climatiques et présentation du modèle STICS

3.1 Protocole et scénarios climatiques

3.1.1 Description de la zone d'étude

La zone de l'étude est à l'échelle des régions RICA³ de l'Union Européen à 15. Ces régions étudiées ont été choisies notamment en fonction de la disponibilité des données (figure 3).

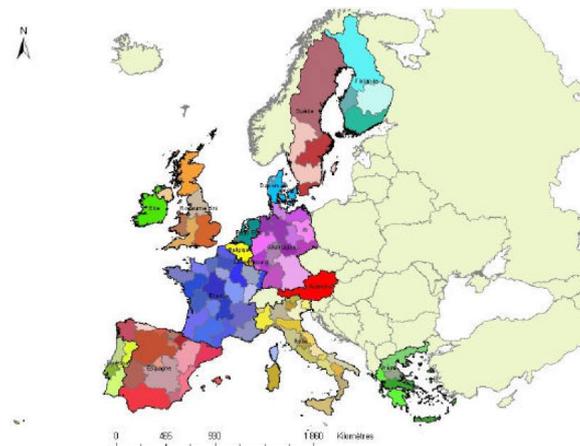


FIGURE 3 – Carte des Régions RICA de l'UE à 15 (Godard, 2005)

3.1.2 Données climatiques et methodologie

Les scénarios climatiques Les séries climatiques sont issues du modèle régional de climat RCA3 (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Ce modèle fourni des données de climat sur une grille régulière de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. En gardant un seul modèle global de climat (ECHAM5, modèle du Max-Planck Institute), dans cette étude, la seule source d'incertitude est le scénario des émissions GES. Les deux scénarios d'émissions considérés sont les scénarios SRES A2 et B1, et ce pour deux horizons temporels différents : 2021-2050 (H1) et 2071-2100 (H2), en comparaison d'une période de référence 1976-2005 (CTL), ce qui donne 5 scénarios climatiques : CTL, A2H1, A2H2, B1H1, B1H2. Une première analyse a permis de différencier ces scénarios en terme de variabilité spatiale de variables saisonnières importantes d'un point de vue agronomique : respectivement cumul saisonnier des précipitations et moyenne saisonnière des

3. RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole (en anglais : FADN) est une enquête effectuée par les états membres de l'UE. Dérivé des enquêtes nationales, RICA est la seule source des données économiques (Godard, 2005).

températures, moyennés sur 30 ans. On trouvera en figures 13 et 14 (annexe B) la distribution spatiale de l'évolution de ces variables pour le scénario de référence (CTL) et pour la différence entre (A2H2) et (CTL).

Methodologie Pour lever toute ambiguïté : Nous nous appuyons sur des jeux de simulations STICS réalisées précédemment, dont le protocole a été le suivant, issu du travail de thèse de Godard :

- Définition des itinéraires techniques : STICS a été exécuté pour chaque culture de chaque exploitation agricole " ferme-type " en utilisant les diverses combinaisons de facteurs de production agricole (Climat, sol, interventions techniques). Pour chaque culture de chaque type d'exploitation dans chaque région, on réalise 30 courbes de réponse du rendement à l'azote, chacune étant basée sur une conduite de culture parmi 30. Chaque courbe est elle même l'interpolation de 31 simulations de rendement pour des doses d'intrant azoté croissantes. Cette procédure a abouti à une gamme de N courbe de réponse à l'azote (30 N courbe de réponse).
- Sélection : Comme une deuxième étape, les données économiques obtenues par AROPAj de la région administrative RICA et de la base des données des prix vont être utilisées pour sélectionner la courbe de réponse d'azote optimale. Deux critères économiques principaux sont pris en compte : le rendement référence (r_0) pour chaque culture et l'hypothèse sur le rapport prix (Godard et al., 2008). Afin d'évaluer l'effet du changement climatique sur la productivité et les agents économiques, les combinaisons sol-interventions techniques sélectionnées pour le scénario climatique CTL et pour la courbe de réponse d'azote sélectionnée vont être maintenues inchangeables pendant l'exécution de STICS avec les données climatiques A2H2 pour une hypothèse de concentration de CO2 égale à 724ppm. Dans le cadre de ce stage, c'était pas moi qui a fait les deux étapes (choix des interventions techniques, exécution et sélection de la meilleure courbe de reponse).

3.2 Présentation du modèle STICS, Choix des variables d'intérêt et Les entrées du modèle STICS dans notre étude

3.2.1 STICS : Stimulateur mulTIdisplinaire pour les Cultures Standard

Développé par l'INRA, STICS est un modèle agronomique à caractère générique au sens où il peut traiter de nombreuses cultures avec un formalisme commun, tout en considérant les spécificités de chacune. C'est un modèle de fonctionnement des cultures, son principal objectif est de simuler la production d'une parcelle agricole en intégrant l'effet des pratiques culturales sur la culture et son milieu. Il capitalise un ensemble de connaissances en physiologie, agronomie et bioclimatologie (Brisson et al., 2009).

Comme le montre la figure 15 (annexe C), les principaux processus simulés dans STICS sont le développement et la croissance du couvert puis les bilans hydrique et azoté dans le sol et dans la plante (Brisson et al., 2009, 2002) :

- Développement de la plante : Différents stades de développement de la plante sont distingués dans STICS correspondant à deux échelles (végétative et reproductive) qui sont indépendantes. Ces stades sont utiles pour la simulation à la fois de la croissance végétative et du remplissage des grains. La température est le facteur primordial qui pilote

le développement de la plante depuis le stade de démarrage jusqu'à la maturité physiologique. D'autres facteurs ou stress peuvent limiter le développement : la photopériode, les besoins en froid, les stress azoté et hydrique.

- Croissance de la plante : STICS simule les deux types de croissance aérienne et racinaire. Pour la première, le module calcule la croissance des feuilles ainsi que la croissance en biomasse. L'accumulation de la biomasse aérienne (DLTAMS) répond au rayonnement intercepté qui fait intervenir une efficacité d'utilisation maximale du rayonnement propre à chaque espèce.

Dans STICS, la croissance racinaire n'est pas considérée en terme de biomasse mais en terme de longueur indépendamment de la partie aérienne. Le rôle des racines se limite à l'alimentation hydrique et azotée.

- Bilan hydrique : Le calcul du bilan hydrique dans STICS est relativement complet. Il est décomposé en différents termes d'offre et de demande dont l'objectif est d'estimer les indices de stress hydrique aussi bien la teneur en eau dans le sol et dans la plante que les pertes du système par ruissellement et infiltration profonde.
- Bilan azoté : Le bilan d'azote s'effectue en deux étapes : Au niveau du sol (minéralisation, nitrification et transfert), et au niveau de la plante. Il compare chaque jour l'offre du sol et la demande de la plante et calcule l'absorption de l'azote par la plante, la distribution de l'azote minéral et organique dans le sol, ainsi que les pertes par volatilisation ou lessivage.
- Irrigation (fichier des techniques) : Les quantités et les doses des apports d'eau peuvent être imposées en entrée ou calculées par le modèle. Dans le premier cas, le modèle utilise un calendrier d'irrigation donné en entrée et lu dans le fichier des techniques. Pour le cas d'option "irrigations calculées" : le modèle calcule automatiquement les apports d'eau de façon à satisfaire les besoins en eau. Le modèle déclenche une irrigation chaque fois que l'indice de stress stomatique, SWFAC, est inférieur à RATIOOL (taux de satisfaction des besoins en eau). Les irrigations sont alors calculées de façon à remplir la réserve en eau du sol jusqu'à la capacité au champ, sans toutefois dépasser la dose maximale autorisée par le système d'irrigation, DOSIMX.

3.2.2 Choix des variables d'intérêt pour notre étude

Dans cette partie, on présente les variables utilisés pour établir le diagnostic régionalisé. Ainsi, afin d'analyser l'élaboration du rendement pour chaque culture, l'idée était de répondre à trois questions qui sont les suivantes :

- Quelles sont les variables d'intérêts dans STICS qui aboutissent à l'élaboration du rendement ?
- Quelle est la relation ou l'interaction entre ces variables ou composantes du rendement ?
- Les stress : Quels sont ? et pendant quelle phase d'élaboration du rendement peuvent-ils intervenir ?

STICS distingue les plantes à croissance déterminée et les plantes à croissance indéterminée. Dans le premier cas, le modèle repose sur l'hypothèse que le nombre et le remplissage des organes de récolte n'influence pas la croissance végétale. Pour le deuxième cas, il y a une interaction entre la croissance végétative et la croissance des organes de récolte (Brisson et al., 2009).

Dans le cadre de ce stage, les céréales, le tournesol, le colza et le soja font partie des cultures à croissance déterminée. Dans STICS, la betterave à sucre est considérée comme faisant partie des plantes à croissance indéterminée.

Plantes à croissance déterminée Le rendement grain noté dans STICS "MAFRUIT" et exprimé en ($t\ ha^{-1}$), peut être subdivisé en ses deux principales composantes : nombre de grains par unité de surface ($NG\ m^{-2}$) et poids moyen d'un grain (PMG). Dans le cas de plante à croissance déterminée (toutes les cultures à grain dans notre étude), les organes récoltés sont appelés "grains".

- Nombre de grains : Le nombre de grains par m^{-2} (NBGRAINS) est déterminé pendant une phase de durée variable ($NBJGRAIN_p$), qui précède le début du remplissage (IDRP). Il est calculé par le modèle essentiellement en fonction de la vitesse de croissance moyenne de la culture durant cette phase (VITMOY) selon une dynamique propre à l'espèce et à la variété (Brisson & Mary, 2002).

$$NBGRAINS = [CGRAIN \cdot VITMOY + CGRAINV_0] \cdot NBGRMAX \quad (1)$$

avec

NBGRAINS = Nombre de grains par unité de surface [m^{-2}]

VITMOY = Taux de croissance moyen quotidien pendant la période NBJGRAINS [$g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$]

CGRAIN = Pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance pendant la période NBJGRAINS [$g\ de\ matire\ sche^{-1} \cdot j^{-1}$]

CGRAINV₀ = Nombre de grains produits quand le taux de croissance CGRAIN est égal à zéro

NBGRMAX = Nombre maximal d'organes récoltés

Le nombre de grains est limité par les paramètres NBGRMIN et NBGRMAX qui est un paramètre génétique. Pour le maïs, NBGRMAX est égale à 4500.

- Poids moyen du grain : La matière sèche accumulée dans les grains est calculée en appliquant un "indice de récolte" évolutif à la matière sèche de la plante. Cet indice (IRCARB) est une fonction linéaire du temps entre les stades IDRP et IMAT.

La masse de grains, MAGRAIN découle de l'indice de récolte :

$$MAGRAIN = IRCARB * MASEC \quad (2)$$

avec

MASEC = La biomasse totale aérienne accumulée

La masse de chaque grain est ensuite calculée comme le rapport entre la masse et le nombre des grains, sans toutefois pouvoir excéder la limite génétique PGRAINMAXI.

Plantes à croissance indéterminée Dans le cadre de ce stage, pour la betterave à sucre, la seule plante à croissance indéterminée, le paramètre le plus important est le rendement toujours noté "MAFRUIT" exprimé ($t\ ha^{-1}$). Dans ce cas, les organes récoltés sont appelés "fruits". Ces derniers se mettent en place entre les stades DRP et NOU (nouaison) dont la durée est propre à l'espèce.

3.2.3 Les facteurs limitants

Plusieurs types de stress peuvent moduler le développement de la culture aux cours de différents stades phénologiques de son cycle et par conséquent peuvent limiter le rendement. Dans le cadre de ce stage, et afin d'identifier les facteurs limitant et les causes de la variabilité du rendement, on a choisi trois types de stress qui sont :

- Le stress azoté : Le choix de ce type de stress dans le cadre de ce stage est dû à l'importance de la nutrition azotée dans l'élaboration du rendement des cultures surtout les cultures à grains en affectant le nombre de grains et le poids moyen du grain.
- Le stress hydrique : La nutrition hydrique est très importante pour l'élaboration des composantes du rendement depuis le semis de la culture jusqu'à la maturité, mais l'importance de ce facteur dépend aussi des phases critiques du cycle de la culture.
- Le stress thermique : l'un des facteurs limitants pour l'élaboration du rendement surtout pour les cultures qui sont caractérisées par un cycle cultural estival.

Nous avons à notre disposition plusieurs variables du modèle STICS, qui représentent des indices de stress moyennés soit sur tout le cycle cultural, soit sur la durée des phases végétatives et reproductrices. Nous détaillons ici les variables utilisées :

Le stress azoté : Les indices de stress azotés journaliers du modèle STICS sont calculés comme fonctions linéaires du rapport journalier de l'offre d'azote dans le sol sur les besoins de la plante (INN). Nous ne retiendrons que INNS, qui impacte l'activité photosynthétique et l'établissement du nombre de grain. Nous disposons de 2 indices moyennés sur les phases végétatives (innsveg) et reproductrices (innsrep), et correspondant à l'INN, borné entre INN-MIN et 1. Le premier est utilisé pour les cultures pour lesquelles les deux phases végétative et reproductrice sont bien distinctes, cas des céréales et tournesol. Par contre, pour le soja et le colza, on prend le deuxième puisque sont des cultures où ces deux phases ne sont pas clairement séparées.

Le stress hydrique : Afin de pouvoir évaluer l'effet du stress hydrique sur l'élaboration des composantes du rendement, dans le cadre de ce stage, on a utilisé comme variable noté par "HydStress" le stock d'eau dans le sol c'est à dire la quantité d'eau disponible pour la plante. Cette variable est calculée à partir des différents éléments du bilan hydrique dans STICS selon l'équation suivante :

$$HydStress = [(P + Ir) - (Es + Tr + In + It)] \quad (3)$$

avec HydStress = Stock d'esu dans le sol [mm] P = Pluie [mm]

Ir = Irrigation [mm]

Es = évaporation [mm]

Tr = Transpiration [mm]

In = Drainage [mm]

It = Interception [mm]

Le stress thermique : La variable de stress thermique dans STICS est notée "tcult-tair". Ce dernier découle d'un calcul de la valeur moyenne de la différence entre la température du couvert (tcult) et la température de l'air (tair). Cette différence est calculée chaque jour, en degrés Celsius, puis moyenné sur une période donnée (soit la période végétative depuis la levée jusqu'au stade de début de remplissage des organes récoltés, soit la période reproductrice depuis le début de remplissage des organes récoltés jusqu'à la maturité physiologique. Dans ce stage, on va utiliser tculttairrep, dont "rep" indique bien la phase reproductrice, afin d'identifier l'effet de stress thermique sur le remplissage des grains.

3.2.4 Les entrées du modèle STICS

Quatre niveaux d'informations doivent être considérés pour la structuration des bases de données et la construction d'une " unité de simulation " (Godard, 2005; Leclere et al., 2010) :

- **Le climat** : Les données climatiques sont issues d'une interpolation sur une grille de maille $50km \times 50km$. Les deux scénarios climatiques considérés dans cette étude sont CTL (climat présent) et A2H2 (futur lointain) qui correspondent respectivement à une période de 30 ans (1976-2005) ; climat présent avec une concentration de CO_2 historiques jusqu'en 1990, et une période de 30 ans (2071-2100) ; futur lointain avec un scénario climatique A2. Pour chaque scénario, les données climatiques d'entrées pour STICS correspondent aux 3 années les plus représentatives des gradients méridionaux et latitudinaux moyens sur 30 des moyennes mensuelles de température et de cumul mensuel des précipitations.
- **Le sol** : Les cinq sols les plus représentatifs de la région administrative RICA ont été sélectionnés à partir des données de la base géographiques des sols d'Europe. (pour plus de détails, voir Godard 2005).
- **La culture** : Les cultures dont on cherche à simuler le rendement sont les principales grandes cultures européennes (blé tendre, blé dur, orge d'hiver, orge du printemps, maïs de grain, soja, colza, tournesol, betterave sucrière et la pomme de terre).
- **Les itinéraires techniques** : Contrairement aux données physiques (climat et sol), pour les données techniques, les bases de données n'existent pas à l'échelle européenne. Et par conséquent, elles sont basées sur quelques informations disponibles et des hypothèses assez fortes pour les variétés, ainsi qu'un calcul basé sur le cycle des températures annuel moyen sur 30 ans pour les dates de semis, avec des suils calibrés sur le crop calendar du JRC. Dans le protocole décrit plus loin, nous verrons qu'en climat présent, une partie des itinéraires techniques n'est choisi qu'après simulation, sur la base de critères économiques. Pour chaque culture de chaque type d'exploitation dans chaque région, nous réalisons 30 séries de simulations, correspondant aux options suivantes : (3 dates de semis ou 3 variétés) x 5 sols x 2 précédents. Dans le cadre de ce stage, et après avoir précisé les cultures dont on cherche à simuler le rendement, on a utilisé un ensemble d'itinéraires techniques ou options différentes qui seront détaillées au niveau du tableau (annexe D).

Pour chaque climat, la distribution des cultures simulées pour chaque type de système de culture dans chaque région rica est établi à partir des données RICA et que la typologie des exploitations représentatives de la région considérée est basée sur un modèle économique de l'offre agricole, AROPAj. Ce dernier sert aussi à obtenir des informations régionalisées de prix de vente de la culture et d'achat des intrants azotés issus d'engrais commerciaux, afin de déterminer la pratique optimale en climat présent.

4 Résultats et discussions

Cette première partie des résultats traite de façon globale les effets du changement climatique sur la productivité, la répartition géographique de la variation de rendements par région et finalement l'examen de la variabilité du rendement en fonction de ses composantes.

A ce stade, et avant de donner une lecture de la tendance générale des effets du changement climatique, il est nécessaire de mettre l'accent sur la capacité du modèle STICS à représenter la réalité.

La figure 4, présente les boxplots⁴ du rendement des différentes cultures pour une dose d'azoté égale à 160 kg ha^{-1} . Les trois boxplots correspondent respectivement au rendement observé des régions RICA, les rendements simulés par le modèle STICS au climat présent et le rendement simulé au climat futur. Cette figure montre qu'il y a pas de différence entre le rendement observé et le rendement simulé au climat présent ; cas des cultures de maïs, tournesol et soja. Tandis que, pour les autres cultures, on note une différence, à la fois en médiane et en dispersion. Ce résultat est expliqué par la combinaison de l'effet des bioagresseurs sur le rendement observé et la sensibilité de la culture. En effet, le modèle STICS simule le rendement sans intégrer l'effet des bioagresseurs ; première source de différence entre le rendement observé et le rendement simulé. La deuxième source de différence entre les cultures est la sensibilité de la culture aux bioagresseurs et aux maladies ; la culture de maïs, tournesol et soja sont des cultures moins sensibles aux maladies par contre les autres cultures sont plus sensibles telles que les céréales, le colza, la pomme de terre et la berrave à sucre. Une autre source de différence possible est le niveau de fertilisation azotée.

D'une façon générale, ce résultat est attendu sauf pour le cas de la culture d'orge de printemps (le rendement simulé est chocant par rapport au rendement observé).

4. La représentation en boxplot, qu'on appelle parfois aussi boîte à moustaches, est utilisée quand on souhaite visualiser d'un seul coup d'oeil le domaine de variation d'une grandeur lorsque l'on fait varier certains facteurs. Un boxplot est une représentation graphique sous forme de boîte autour d'une valeur centrale et prolongée par des segments. La valeur centrale est la médiane (la quantité telle que la moitié des valeurs étudiées sont inférieures à cette quantité), les côtés inférieur et supérieur sont appelées les quantiles. Les traits pointillés prolongent la boîte jusqu'aux valeurs minimum et maximum.

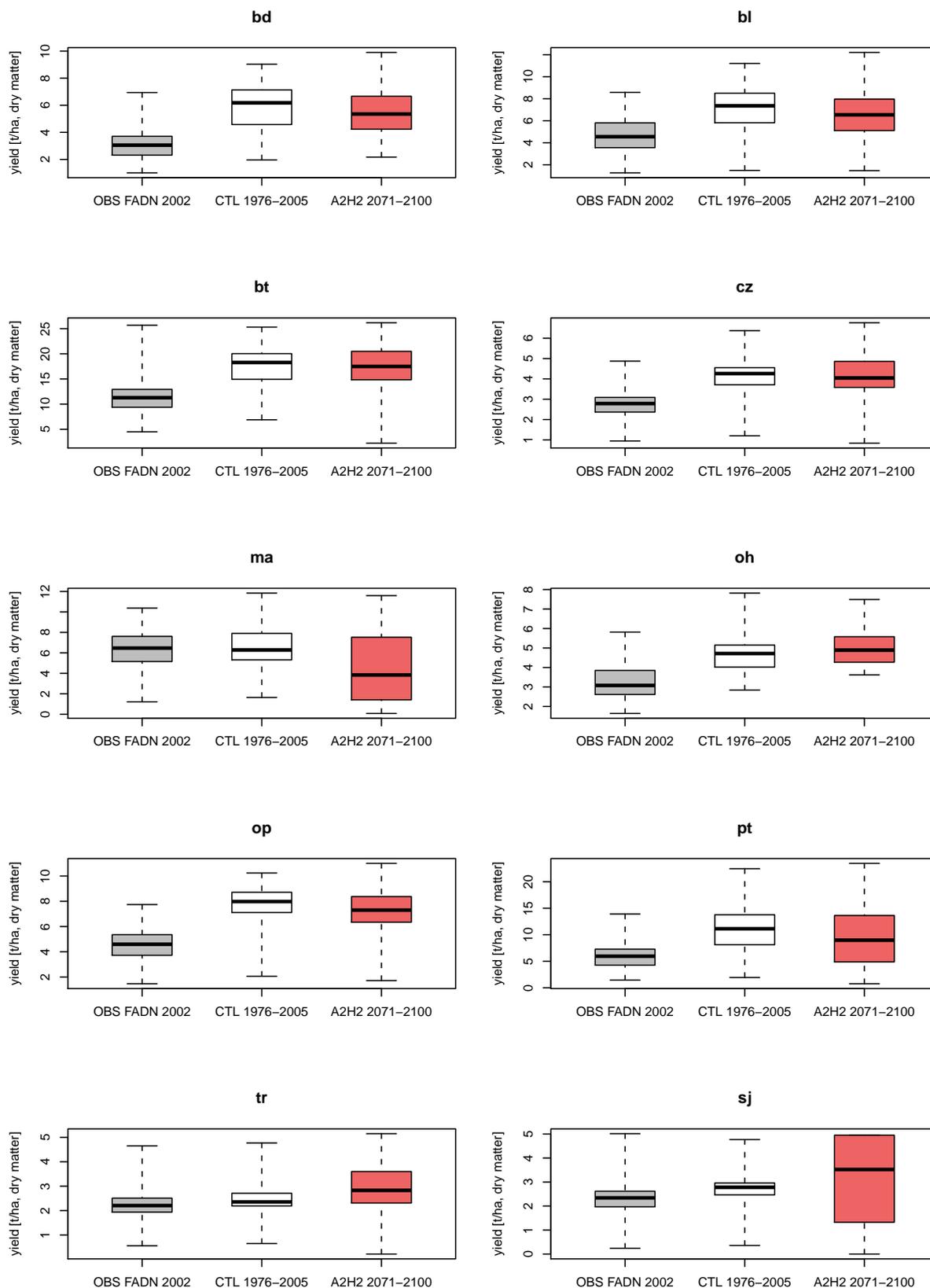


FIGURE 4 – Boxplots du rendement observé (OBS), du rendement simulé par le modèle STICS au climat présent (CTL) et du rendement simulé au climat futur (A2H2), exprimés en $[t\ ha^{-1}]$, pour les cultures de (bd(blé dur), bl(blé tendre), bt(betterave à sucre), cz(colza), ma(maïs), oh(orge d'hiver), op(orge du printemps), pt(pomme de terre), tr(tournesol) et sj(soja))

4.1 Généralité sur l'évolution des rendements

Dans cette partie, on propose dans un premier temps de donner une lecture de la tendance générale sur l'évolution des rendements des diverses cultures avec le changement climatique. Puis, on propose de comparer cette évolution entre les cultures sur la base de la typologie : par exemple la comparaison entre culture en C_3 et culture en C_4 (valorisation de l'augmentation du CO_2 atmosphérique), aussi la comparaison des cycles d'hiver ou d'été.

D'après la figure 4, l'évolution des différents rendements (du climat présent au climat futur) obtenue pour toutes les cultures et pour une dose d'azote de 160 kgN ha^{-1} montre qu'aucun changement de rendement sous l'effet du changement climatique n'est prévu pour la plupart des cultures sauf le cas de la culture de maïs. Pour cette dernière, l'évolution montre une réduction du rendement (de 7.90 t ha^{-1} à 3.84 t ha^{-1} pour la médiane).

L'étude de l'évolution des rendements en comparant les cultures en C_3 et les cultures en C_4 (valorisation de l'augmentation du CO_2 atmosphérique), aussi la comparaison des cycles d'hiver ou d'été est basée sur des hypothèses approfondies par des connaissances théoriques qui ne sont pas éprouvées dans le cadre de ce stage.

- C_3/C_4 : La comparaison des deux cultures estivales (en supposant que le seul facteur déterminant est la concentration du CO_2) ; le tournesol (plante en C_3) et le maïs (plante en C_4), montre que l'évolution de rendement dans le futur lointain est nettement à l'avantage de la première ($+0.5 \text{ t ha}^{-1}$ pour le tournesol et réduction de 8 à 4 t ha^{-1} pour le maïs). Ce résultat est bien cohérent avec ce qu'on sait sur la réponse des plantes en C_3 montrant une meilleure valorisation des augmentations de la concentration du CO_2 .
- **Hiver/été** : Pour répondre à la question de l'évolution du rendement en fonction des cycles d'hiver ou d'été, la comparaison de deux céréales telles que l'orge d'hiver et l'orge du printemps montre une évolution plus favorable pour les cultures d'hiver par rapport aux cultures d'été. De même, parmi notre gamme de cultures, on peut aussi comparer les deux cultures oléagineuses telles que le colza (culture d'hiver) et le tournesol (culture d'été) ; d'après nos résultats, l'évolution du rendement est à l'avantage du colza avec ($+1 \text{ t ha}^{-1}$ pour le colza et $+0.3 \text{ t ha}^{-1}$). Ce résultat est expliqué en supposant que le réchauffement climatique a un effet sur l'avancement des stades phénologiques pour les cultures d'hiver permettant ainsi l'esquive de stress. Par contre, les cultures d'été peuvent subir plusieurs types de stress comme le stress thermique ou hydrique sur des périodes critiques surtout en fin de cycle. Par ailleurs, les cultures d'été subissent un raccourcissement pendant la phase du remplissage, préjudiciable au rendement.

4.2 Répartition géographique de l'évolution des rendements avec le changement climatique

Les cartes (figure 16 ;annexe E), montrant la répartition géographique de la variation des rendements par régions en [%], permettent de faire les observations générales suivantes :

- On constate une baisse de rendement du maïs fortement accentuée dans les régions du Sud (Sud-Ouest, Sud-Est). En revanche, on observe une hausse du rendement dans les régions du Centre-Nord. Les régions du Centre sont caractérisée par une variabilité de l'évolution des rendements.
- Pour les deux cultures tournesol et colza, la variation du rendement montre une augmentation plus accentuée dans les régions du Nord-Est surtout pour la culture de tournesol(de

50 à 100%). Dans les régions du Sud-Est, on observe une baisse du rendement de la culture de tournesol (de -75 à -15%). En revanche, une variabilité de l'évolution du rendement caractérise les régions du Centre (cas de tournesol). Pour la culture de colza, une stagnation du rendement caractérise les régions du Centre.

- Moins présent que le blé tendre, la variation du rendement montre pour la culture de blé dur une hausse du rendement dans les régions du Sud-Ouest (de 15 à 100%). En revanche, les régions de Centre et Sud-Est sont caractérisées par une variabilité de l'évolution du rendement. Pour la culture de blé tendre, une réduction de rendement jusqu'à 50% est observée dans les régions de Centre. De plus, on constate une hausse du rendement, fortement accentuée dans les régions de Sud-Ouest et de Nord-Est (de 30 à 75%).
- Le changement climatique semble bénéficier davantage à la culture d'orge d'hiver que l'orge de printemps. En effet, on observe une hausse du rendement dans la plupart des régions de la production de l'ordre de 15 à 30% (Sud-Ouest, Nord-Ouest). En revanche, une baisse accentuée est observée dans les régions du Nord-Est. Bien que, de manière générale, une stagnation du rendement de l'orge de printemps caractérise les régions de Centre. Par contre, une réduction du rendement (de -15 à -30%) est observée dans les régions du Nord-Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest.
- Pour la culture de la betterave à sucre, la répartition géographique de la variation de rendement est plus claire. On observe trois régions de la variation du rendement ; Une hausse de rendement accentuée dans les régions de Nord-Est, une baisse de rendement dans les régions du Sud et une stagnation des rendements dans les régions du Centre.
- Contrairement à la culture de la betterave à sucre, la répartition géographique de la variation de rendement n'est pas claire montrant une grande variabilité entre les régions.
- Moins présente dans les régions de l'Europe, la variation de rendement de la culture de soja montre une baisse de rendement dans les régions de Sud, par contre les régions du Centre sont caractérisées par une variabilité de l'évolution des rendements.

4.3 Examen des composantes de rendement

Dans cette partie, on propose de diagnostiquer pour chaque culture l'origine de l'évolution de rendement sous changement climatique en examinant les composantes de rendement.

Les deux figures 17 et 18 (annexe F), montrent les courbes présentant les relations ; (le rendement en fonction du nombre du grain ($NG\ m^{-2}$) et (rendement en fonction de poids moyen du grain (pmg)). Les courbes permettent de distinguer trois groupes de cultures :

- Un premier groupe de cultures dont la variabilité du rendement sous changement climatique est expliquée par les deux composantes du rendement ; le nombre de grain m^{-2} et le poids moyen du grain ; cas des cultures de blé tendre, maïs, tournesol et soja. On constate une augmentation du nombre de grain m^{-2} avec une grande variabilité sous changement climatique. Ceci est valable pour toutes les cultures sauf la culture de maïs pour laquelle l'évolution du nombre de grain m^2 montre une réduction. Ce résultat est expliqué, dans une partie, par l'effet de la nutrition azotée montrée par la courbe (nombre de grain en fonction INN (indice de stress azoté)). Cette dernière montre une augmentation du nombre de grain m^{-2} pour la même situation de stress azoté (plus déterminant pour la culture de soja) ; climat présent ((17500;0.8)(25000;0.9)) futur lointain A2H2

((22000;0.8)(30000;0.9)) pour la culture de blé tendre, signalant que pour le même niveau de nutrition azotée, la production de grains est plus performante, ce qui traduit vraisemblablement une interaction avec un autre facteur.

Pour la culture de maïs, la baisse du (NG m^{-2}), CTL (1^{er} quantile (2082), médiane (2585), 3^{me} quantile (382)), A2H2 (762,1547,2656), est expliquée de même par l'effet de stress azoté plus déterminant avec le changement climatique pendant la phase de l'élaboration de nombre de grain. Une explication hypothétique derrière ce résultat est la diminution de la quantité d'azote absorbée par la culture de maïs. Cette évolution est liée à la moindre croissance de la plante en raison de la réduction du cycle provoquée par l'augmentation des températures.

En revanche, pour l'ensemble des cultures, le remplissage du grain est davantage affecté par des stress hydrique ou thermique en fin de cycle (difficile à les déterminer à cause d'un manque des informations sur le stress hydrique et thermique).

- Pour le deuxième groupe de culture ; la variabilité du rendement sous changement climatique est liée au nombre de grain m^{-2} . Cas de la culture de blé dur, d'orge d'hiver et le colza. On remarque une évolution du nombre de grain m^{-2} montrant une augmentation, plus importante dans le cas de la culture de blé dur. Comme pour le premier groupe, on note une conservation de l'effet du stress azoté sur cette composante qui est plus déterminant dans le cas de la culture d'orge d'hiver. L'explication de ce résultat est la même que pour le premier groupe, par contre pour la culture d'orge d'hiver avec peu d'information, ce sera difficile de donner une explication de cette évolution.
- Le troisième groupe de culture, la variabilité du rendement est indéterminée ; cas de la culture d'orge de printemps, pour laquelle les deux composantes ne montre pas une évolution nette sous changement climatique.

4.4 Impact du changement climatique sur la culture de blé tendre et de maïs

Dans cette partie, on propose d'analyser l'impact du changement climatique sur une culture donnée depuis la répartition géographique de la variation du rendement en climat présent jusqu'à la spatialisation de l'origine de l'évolution du rendement. Ainsi, on pourra proposer une adaptation des conduites en lien avec le changement climatique. Comme culture à traiter ; culture en C_3 (blé tendre) et culture en C_4 (maïs).

4.4.1 Changement climatique et la culture de blé tendre

La figure 5 montre la carte de la répartition des rendements moyens au climat présent et pour une dose d'azote de $160\text{kgN } ha^{-1}$. On constate que les rendements les plus importants de l'ordre de 6 et de $12\text{ t } ha^{-1}$ sont enregistrés dans les régions de centre. En revanche, dans les sites du Sud-Ouest, Sud-Est et Nord-Est, les rendements varient de 0 à $4\text{ t } ha^{-1}$ pour l'Espagne et la Finlande et de 2 à $6\text{ t } ha^{-1}$ dans le Sud-Est (la Grèce).

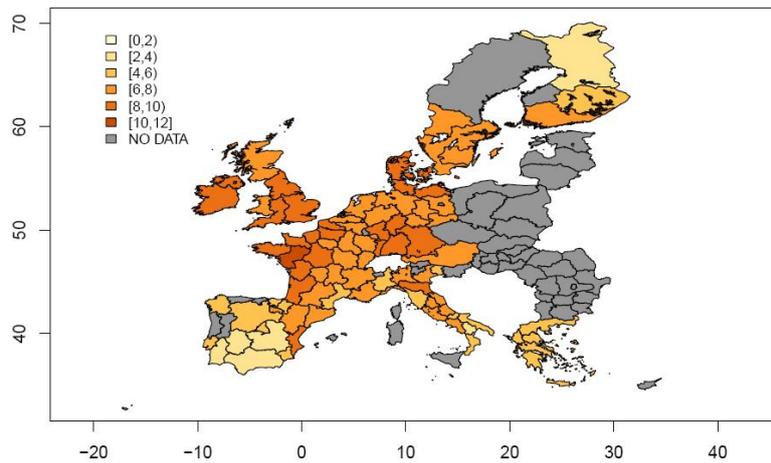


FIGURE 5 – Carte de la répartition géographique de rendement moyen [$t\ ha^{-1}$] par région de la culture de blé tendre au climat présent et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$

Si maintenant, on examine les composantes de rendement dans le climat présent. La figure 6, résume la méthode d'analyse qui s'appuie sur la décomposition du rendement en différents éléments, montrant ainsi leur interaction avec le cas du milieu et la conduite de la culture (la fertilisation azotée). On note que la variabilité du rendement est expliquée à la fois par le nombre de grain m^{-2} (NB m^{-2}) et par le poids moyen du grain (pmsg). En effet, la variabilité du NB m^{-2} est expliquée, à partir de la courbe (NB m^{-2} vs innsveg), par l'effet du stress azoté déterminant pendant la phase de la formation du nombre de grains. Ce résultat est bien cohérent avec ce qu'on sait sur l'effet de l'azote sur le nombre de grain par unité de surface. En effet, ce dernier est fonction de nombre de talles m^{-2} qui est directement affecté par l'azote.

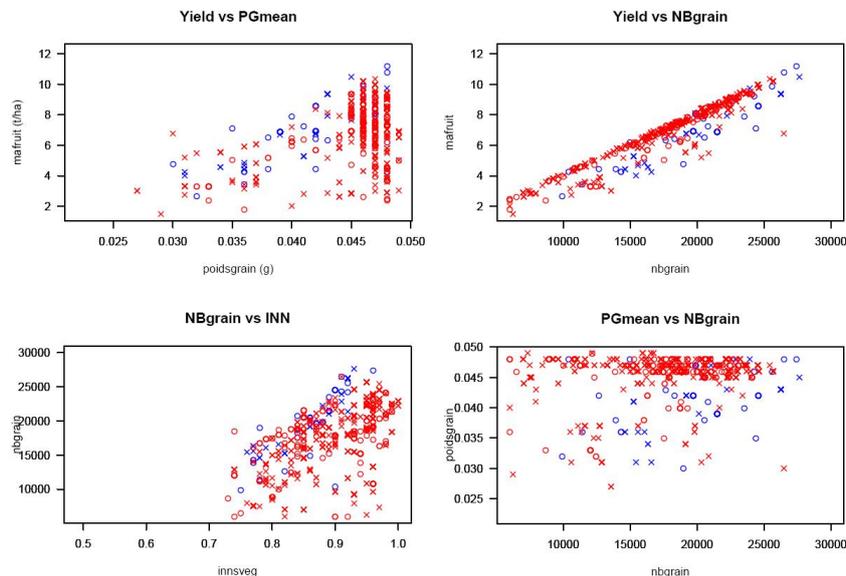


FIGURE 6 – Composante de rendement de la culture de blé tendre au climat present pour une dose d'azote = $160\ kgN\ ha^{-1}$; les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale

L'effet du NB $m-2$ sur le rendement est surtout marqué pour les régions du centre, par exemple le cas de la France (fra1 (Nord) et fra2 (Sud)). D'après les courbes de l'élaboration du rendement, on remarque une variation du NB $m-2$ pour la même gamme de pmg. En revanche, on constate une baisse du pmg dans les régions de Sud de l'Espagne, Portugal et la Grèce avec une moyenne égale à (0.03g). Ceci montre que le remplissage du grain est davantage affecté par des stress de fin de cycle.

Puisque, le rendement est le résultat d'une intégration complexe des effets climatiques, conduite de culture. On propose dans cette partie de citer d'autres éléments d'analyse de la variabilité du rendement.

- **La température** : La figure 14 (annexe B), montre la variation saisonnière de la température en °C. On constate que dans les régions du Nord-Est, la température ne dépasse pas le -1°C durant les mois de décembre, janvier et février. Par conséquent, la plante est soumise à un risque de gel hivernal déterminant pendant la phase de préfloraison. Ce risque provoque une déformation de l'épis et stérilités totales et partielles (Combe & Picard, 1994). Cet effet des températures négatifs est surtout caractérisé les régions du Nord-Est (la Finlande avec une moyenne de nombre de grains égale $(13650\ m^{-2})$. Le remplissage des grains est, au contraire, affecté par des hautes températures en fin de cycle, cas des régions de Sud-Ouest (surtout le Sud de l'Espagne et Portugal) avec une moyenne de (0.03g). Cette zone se caractérise par une température moyenne saisonnière supérieure à 26°C .
- **Les précipitations** : D'après la figure 14 (annexe B), présentant le cumul saisonnier des précipitations, on remarque que les zones de centres de l'Europe sont les plus arrosées (250 à 500 mm) depuis la période de semis jusqu'à la période de la phase de l'élaboration des NB $m-2$. En revanche, on observe un fort contraste dans les régions Sud-Ouest en fin de cycle ($< 100\text{mm}$). La baisse des pluies et la hausse de la température conduiront à une sécheresse dans ces régions et par conséquent, la phase de remplissage des grains est soumise à deux types de stress ; thermique et hydrique.

La culture de blé tendre au climat futur Sous l'effet du changement climatique, la figure 7, la répartition géographique du rendement par région [%] montre une baisse du rendement dans les régions du centre accentuée dans les régions Nord de la France. En revanche, on observe une augmentation du rendement dans les régions du Nord-Est et le Nord de l'Espagne.

L'examen des composantes de rendements pour toutes les régions de l'Europe montre (figure 8) :

- Une augmentation du NB $m-2$ avec la conservation de l'effet du stress azoté.
- Le pmg bouge sous l'effet du changement climatique.

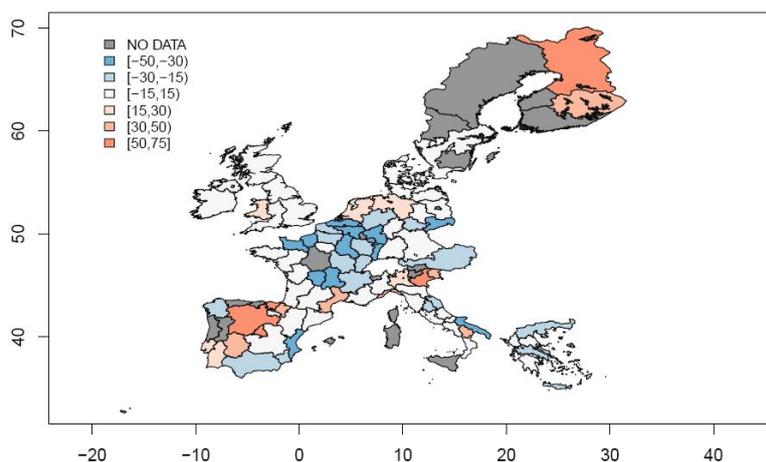


FIGURE 7 – Carte de la répartition géographique de la variation du rendement par région de la culture de blé tendre et pour une dose d’azote égale à $160 \text{ kgN } ha^{-1}$

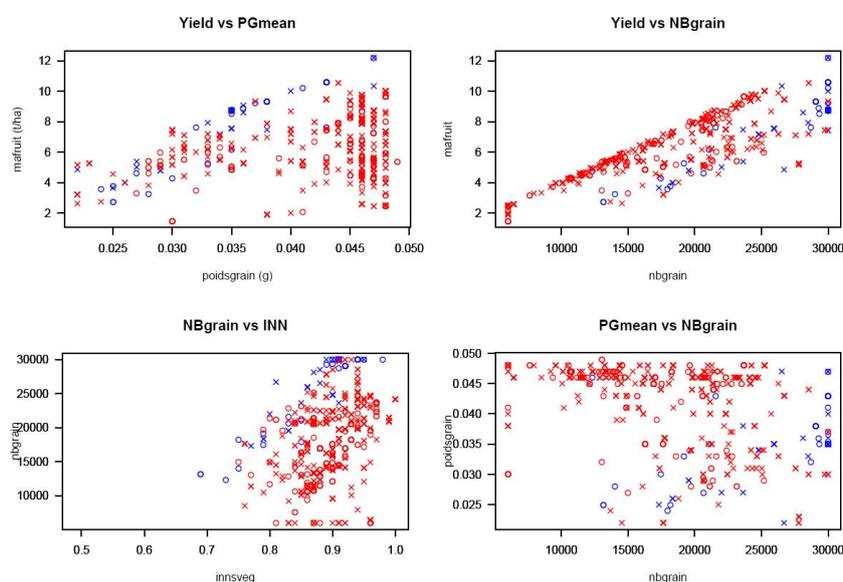


FIGURE 8 – Composante de rendement de la culture de blé tendre au climat futur pour une dose d’azote = $160 \text{ kgN } ha^{-1}$; les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures non irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale

Dans cette partie, on propose d’analyser les composantes du rendement par régions.

- Le centre (France) (figure 19 et 20 ; annexe G) : On constate que l’évolution du rendement sous l’effet du changement climatique est expliquée par le NG m^{-2} qui montre une variation, avec la conservation de l’effet de stress azoté. Ce résultat suggère qu’il y a d’autres éléments qui peuvent expliquer cette variation. En effet, la région de la France est caractérisée par une augmentation de la température (augmentation de 3 à 4°C) durant l’automne. Cette augmentation dépasse les besoins en vernalisation (max 10°C) et par conséquent, impact sur la réalisation de développement floral du blé. En revanche, pour le sud, on remarque que l’évolution du rendement est liée au NG m^{-2} mais surtout le pmg qui montre une variation importante avec le changemen climatique.

En effet, le remplissage du grain est affecté par le stress thermique en fin de cycle avec l'augmentation de la température (4 à 6°C).

- Nord-Est : La hausse du rendement dans les régions du Nord-Est est bien expliquée par une variation du NG m^{-2} montrant une augmentation avec le changement climatique (composante de rendement). Ceci est expliqué par l'augmentation de la température qui limite le risque de gel d'épis (augmentation de 8°C).
- Sud-Ouest : La variation du rendement dans les régions du Sud-Ouest dépend à la fois du NG m^{-2} et le pmg. En effet, pour le Nord de l'Espagne (figure 21; annexe G) et le Portugal, on constate une augmentation du NG m^{-2} sous l'effet de l'augmentation de la température qui limite l'effet des risques de gel, d'autres éléments non testés dans le cadre de ce stage peuvent favoriser l'augmentation du NG m^{-2} comme la photopériode. Par contre, le remplissage de grain est affecté par un stress thermique en fin de cycle mais cet effet sur le pmg sera décompensé par l'augmentation du NG m^{-2} . Par conséquent, une augmentation du rendement dans les régions du Nord de l'Espagne (de 5.28 t ha^{-1} à 7.13 t ha^{-1} la moyenne). Dans le cas du Sud de l'Espagne (figure 22; annexe G), la réduction du rendement (de 3.65 t ha^{-1} à 2.58 t ha^{-1} la moyenne pour la région 575 (Sud de l'Espagne)) est expliquée par l'effet déterminant du stress thermique sur le pmg malgré l'augmentation du NG m^{-2} .

Proposition d'adaptation Pour bien profiter du changement climatique et limiter l'effet de stress thermique, le choix de la variété est une majeure adaptation des itinéraires techniques au changement climatique. Pour la culture de blé tendre, les variétés précoces sont mieux adaptées au changement climatique. L'anticipation de leur cycle leur permet de limiter les risques de stress tardifs (échaudage en particulier) apparaissant en cours de remplissage pour les variétés à cycle long ou tardives.

Une deuxième voie d'adaptation, très importante, est la date de semis. Les semis précoces permettent d'esquiver les conditions défavorables pendant la phase de préfloraison ou de la fin du cycle.

D'autre part, les effets des pratiques (variété, date de semis, sol) pourront limiter les risques induits par le changement climatique.

4.5 Changement climatique et la culture de maïs

La figure 9, montre la carte de la répartition géographique des rendements moyen [t ha^{-1}] par région au climat présent et pour une dose d'azote égale à 160 kgN ha^{-1} . Cette répartition permet de constater les observations suivantes :

- Les rendements les plus importants (8 à 14 [t ha^{-1}]) caractérisent les régions du Sud et sont plus accentués dans les régions du Sud-Est.
- Les régions du Centre-Nord et Nord-Est sont caractérisées par des rendements variant de 4 à 6 [t ha^{-1}].
- Le centre montre une variabilité des rendements entre les régions.

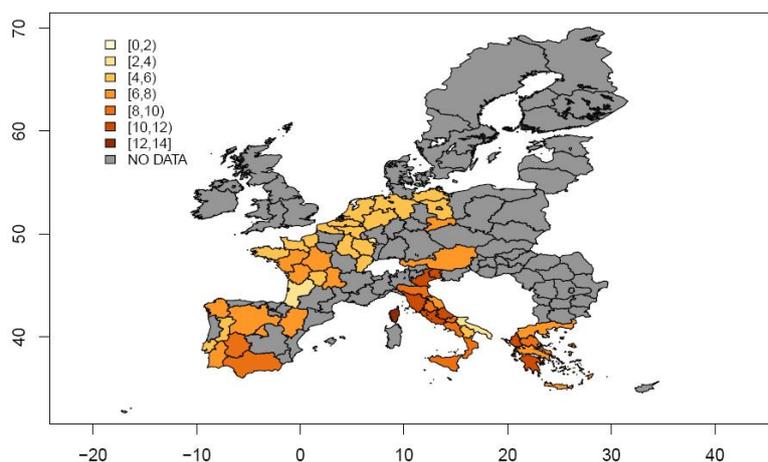


FIGURE 9 – Carte de la répartition géographique de rendement moyen [$t\ ha^{-1}$] par région de la culture de maïs au climat présent et pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$

Si maintenant, on examine les composantes de rendement au climat présent. En effet, la bonne corrélation entre le rendement et le $NG\ m^{-2}$ (figure 10), montre que la variabilité du rendement entre les régions au climat présent est expliquée principalement par le $NG\ m^{-2}$. Ce résultat s'explique, en partie, par l'effet du stress azoté pendant la phase de préfloraison de la culture, observé surtout pour les cultures irriguées (augmentation du $NG\ m^{-2}$ en fonction de l'indice de stress azoté INN). Par ailleurs, on constate deux paquets de points ; un paquet bleu (culture irriguée) caractérisé par les $NG\ m^{-2}$ les plus importants et un paquet rouge (culture non irriguée) avec un $NG\ m^{-2}$ plus faible. De plus, la carte, présentant la fraction de cas irrigués par région, montre que le maïs irriguée garde l'avantage en termes de rendement.

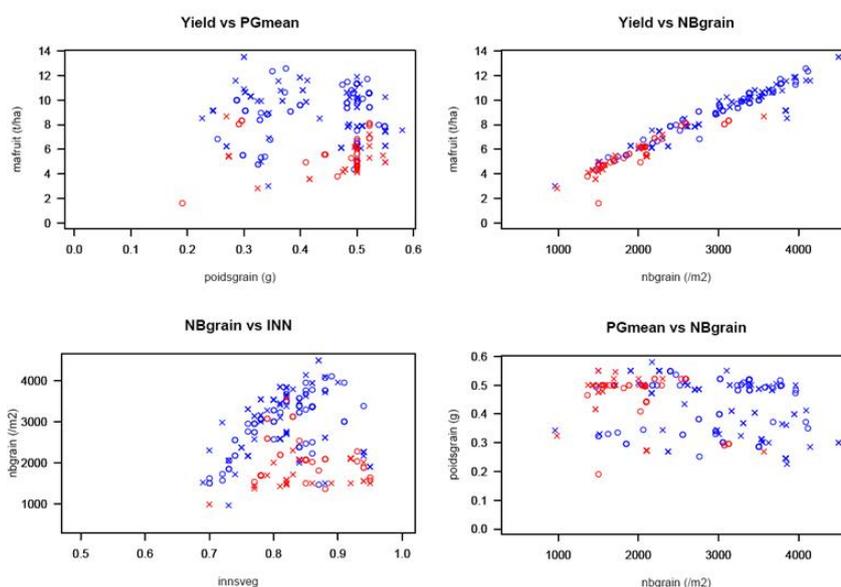


FIGURE 10 – Illustration des courbes de composantes de rendement pour la culture de maïs au climat présent (CTL) pour une dose d'azote égale à $160\ kgN\ ha^{-1}$

Ainsi, la variabilité du rendement liée au $NG\ m^{-2}$ est expliquée dans le cas de la culture de maïs par :

- La fertilisation azotée.
- L'irrigation qui décompense l'effet de l'augmentation de la température ($26^{\circ}C$) et le déficit

pluviométrique (jusqu'à 100 mm en été dans le Sud) comme l'illustre la carte de fraction de cas irrigués pour la culture de maïs (figure 11).

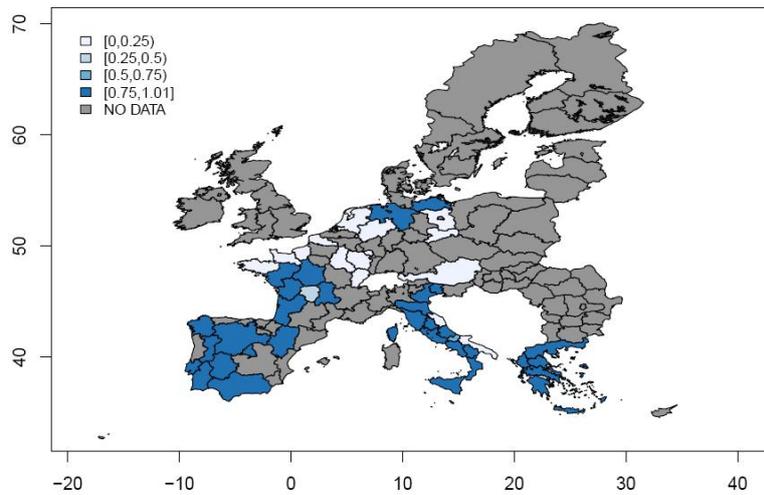


FIGURE 11 – Fraction des cas irrigués par région pour la culture de maïs

Sous changement climatique, la répartition géographique de la variation du rendement par région [%] (figure 12) :

- Une baisse du rendement plus accentuée dans les régions du Sud malgré l'irrigation.
- Une hausse du rendement caractérise les régions du Centre-Nord (belgique, Pays-bas et Nord de l'Allemagne).
- Le centre montre une variabilité de la variation de rendement par région.

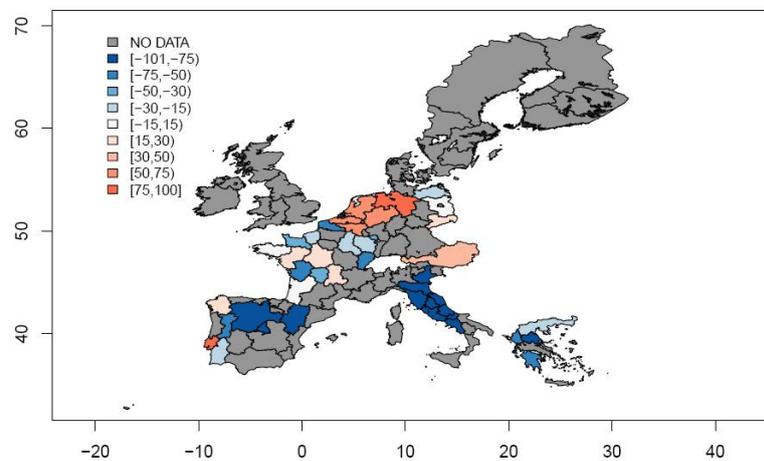


FIGURE 12 – Carte de la répartition géographique de la variation du rendement par région de la culture de maïs et pour une dose d'azote égale à 160 kgN ha^{-1}

L'examen des composantes du rendement au climat futur lointain pour toutes les régions montre que l'évolution du rendement de la culture de maïs sous changement climatique est liée à la fois au NG m^{-2} et au pmg. En effet, on note une réduction des deux composantes plus accentuée pour les cultures irriguées.

Pour raffiner encore l'analyse et afin d'identifier l'origine de la variation du rendement pour chaque région, on propose dans cette paragraphe de traiter quelques régions.

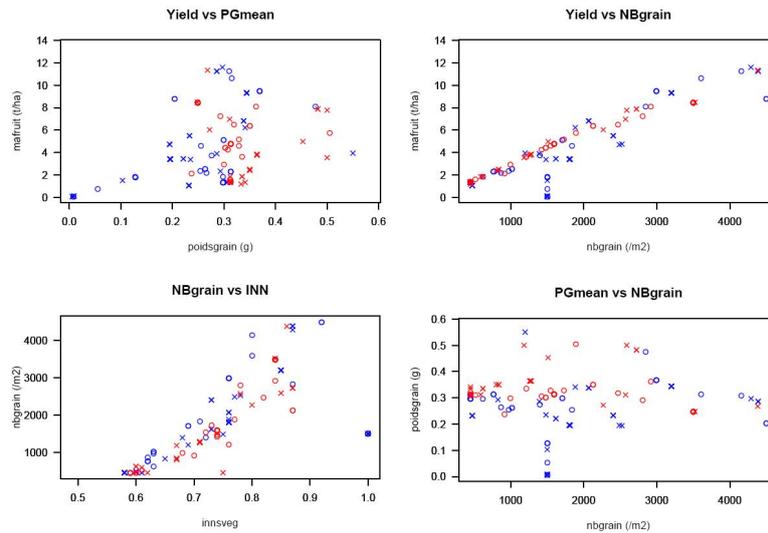


FIGURE 13 – Illustration des courbes de composantes de rendement au climat futur (A2H2) pour une dose d’azote égale à 160 kgN ha^{-1} , les courbes représentent les relations entre les deux composantes du rendements (poids moyen du grain (PGmean) et le nombre du grain m^{-2} (NBgrain), avec Yield = rendement et INN = indice de stress azoté. Les points rouges = les cultures irriguées, les points bleus = les cultures irriguées, les croix = culture ayant comme précédent cultural une légumineuse et les cercles = culture ayant comme précédent cultural une céréale

- Les régions du Sud : Comme exemple à traiter est le cas de Centre de l’Italie, pour les autres régions, les résultats sont non interprétable (les courbes sont avec peu de points). La figure 24 (annexe G), présentant les composantes du rendement au climat présent et futur), montre que la baisse du rendement est expliquée à la fois par une baisse du NG m^{-2} et du pmg surtout pour les cultures irriguées. Dans les régions du Sud, on suppose que la réduction du pmg est expliquée par l’effet de l’augmentation de la température sur la phénologie. En effet, d’après la courbe (rendement en fonction de la durée de cycle), on constate un raccourcissement de la durée du cycle surtout pour les cultures irriguées avec une grande variabilité entre les régions. L’augmentation des températures (de 4 à 8°C dans la zone méditerranéenne) propoque une anticipation de stade phénologique. Cette anticipation induit un glissement de la phase de remplissage pendant les mois les plus chauds de l’année (juin, juillet et août). Par conséquent, la durée de remplissage des grains sera, elle aussi raccourcie, provoquant ainsi la baisse de rendement. Ce résultat est éprouvé et testé dans d’autre projet comme le projet de CLIMATOR.
- Les régions du Centre : Comme exemple les région de la france du Nord. On remarque une réduction du nombre du grain m^{-2} des cultures non irriguées et une augmentation du rendement pour les cultures irriguées. Cette variabilité du nombre de grain est liée, en partie, d’après la courbe(figure 25 ; annexe G),montrant une pente plus importante dans le climat futur, à la nutrition azotée. La réduction du nombre de grain pour les cultures non irriguées est expliquée par la concomitance de la baisse des pluies (-20 à -50% dans la zone du sud en été) et de la hausse des températures conduisant ainsi à un déficit hydrique plus déterminant dans le futur. la hausse du nombre de grain peut etre expliquée par une satisfaction de rayonnement et de la disponibilité thermique. En revanche, on remarque une réduction pour les deux types de cumtures (irriguées et non irriguées) de pmg (l’explication est donnée dans le paragraphe précédent).

Pour les régions du centre nord, la détermination de l'origine de la variabilité est difficile (les courbes sont non interprétables peu de points).

Adaptation Pour la culture de maïs, compte tenu de la limitation des ressources en eau, les besoins de la culture en eau et l'importance du déficit hydrique dans le climat futur, il peut être intéressant de cultiver la culture de maïs sur certains types de sol qui ont des propriétés comme l'économie d'eau d'irrigation (moins perte) surtout dans les régions de sud. Ainsi, les caractéristiques édaphiques semblent un paramètre très intéressant à étudier pour la culture de maïs.

Le choix variétal, joue un rôle très important, dans le cas de la culture de maïs, surtout pour la notion de précocité de la variété. En effet, la précocité de la variété permet à la culture d'éviter certains types de stress. Aussi, le choix variétal semble intéressant pour la durée de cycle par exemple un allongement de cycle de la culture de maïs permet de compenser les effets de l'augmentation de la température sur le raccourcissement de la phase de remplissage, ceci est conseillé pour les régions du sud. En revanche, il faut faire attention, parce que cet allongement de cycle peut être un élément défavorable pour éviter le déficit hydrique.

pour une culture comme le maïs, ce sera difficile de proposer une stratégie d'adaptation en se basant sur ces données (cadre de stage), il faut approfondir les analyses.

Conclusion

Cette étude vise à évaluer l'impact du changement climatique sur la productivité des principales cultures européennes majeures (céréales, colza, tournesol, soja). Pour ce faire, on propose d'établir une méthode de diagnostic agronomique qui se base sur l'analyse en composantes de rendement et leur interaction avec la conduite de la culture (fertilisation azotée, irrigation) et les caractéristiques de milieu. Ainsi, on pourra donc proposer une adaptation des conduites en lien avec le changement climatique.

Concernant les résultats obtenus, on a montré que :

- Parmi la gamme des cultures étudiée, la culture de maïs sera très défavorisée par le changement climatique.
- Les deux cultures de colza et de tournesol réagissent plutôt bien au changement climatique avec une extension au nord qui sera possible dans le futur lointain.
- Finalement, le changement climatique semble bénéficier davantage en moyenne aux cultures d'hiver qu'aux cultures d'été ; cas des cultures de blé et d'orge.

Un autre résultat de cette étude est que la variabilité de l'évolution de rendement est fortement liée à la nutrition azotée surtout pour les cultures de céréales montrant une réponse différente selon les cultures et aussi selon les régions. Par ailleurs, le point le plus important à signaler à partir de cette étude est qu'un effet du changement climatique jugé globalement peut cacher des évolutions localement contrastées selon les régions.

Cependant, les limites dans cette étude qui nous empêchent de faire une analyse complète résident principalement dans ; le temps (il y a des calculs derrière à faire pour déterminer un paramètre d'intérêt, aussi l'absence des données fiables sur certains types de stress comme le stress hydrique (données non disponibles sur la saison culturale), le stress thermique et le rayonnement incident. C'est pour cela, qu'on n'a pas pu faire une analyse plus poussée pour montrer les différents facteurs d'origine de la variabilité du rendement et donc l'adaptation des pratiques restent basée sur des hypothèses.

Sur le plan méthodologique, il serait bon de faire une analyse statistique pour évaluer la signification de l'effet du changement climatique et donc améliorer les résultats. De plus, il semble important de vérifier les éléments de bilan hydrique de modèle STICS afin d'arriver à un calcul d'un stress hydrique plus fiable, facteur très important dans le futur sur l'évolution des rendements. Finalement, il faudrait relancer des simulations avec les itinéraires techniques proposés comme adaptation dans le climat futur et évaluer la productivité.

Pour finir, il semblait intéressant d'approfondir cette étude en tendant de répondre par exemple aux questions suivantes :

- Quelle est l'impact du changement climatique sur l'absorption de l'azote des différentes cultures en déterminant la quantité de l'azote absorbée ?
- L'impact des adventices et des pathogènes sous changement climatique ?

Références

- Brisson, N., Gary, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M. H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., & Justes, E. (2002). Stics : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. ii. model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22, 69–93.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Quae.
- Brisson, N. & Levrault, F. (2010). *Livre vert du projet CLIMATOR : changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. ADEME.
- Brisson, N. & Mary, B. (2002). *STICS versions 5.0 Notice concepts et formalismes*. INRA, INRA, Avignon.
- Combe, L. & Picard, D. (1994). *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles*. INRA.
- Cornic, G. (2007). *Effets, à court et à long terme, du CO₂ sur la photosynthèse*.
- DaMatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C., & Buckeridge, M. S. (2009). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, ., 1–34.
- GIEC (2002). *Les changements climatiques et la biodiversité : Document technique V de GIEC*. Technical report.
- Godard, C. (2005). *Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne : Application à l'évaluation des impacts du changement climatique*. PhD thesis, INRA.
- Godard, C., Roger-Estrade, J., Jayet, P., Brisson, N., & Le Bas, C. (2008). Use of available information at a european level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the eu. *Agricultural Systems*, 97, 68–82.
- IPCC (2000). *Special Report on Emission Scenarios, 2000 : A Special Report of Working group III*. Technical report, IPCC.
- IPCC (2007). *Climate change 2007 : Working Group I : The physical science basis*. Paris : WMO/UNEP.
- James, W., Andrew, C., Amor, I., Tim, W., & Vincent, M. (2006). Translating climate forecasts into agricultural terms : advances and challenges. *Climate Research*, 33, 27–41.
- Lavalle, C., Micale, F., Houston, T., Camia, A., & Hiederer, R. (2008). Climate change in europe.3.impact on agriculture and forestry. *Agronomy*, ., 433–446.
- Leclere, D., Jayet, P., Zakharov, P., & De Noblet-Ducoudre, N. (2010). Quantifying the heterogeneity of abatement costs under climatic and environmental regulation changes : an integrated modelling approach.

- Olsen, J. E. & Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for european agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16, 239–262.
- Seguin, B. (2007). Le réchauffement climatique : impacts sur les agricultures européennes. (34), 108–121.
- Seguin, B. & Stengel, P. (2002). *Changement climatique et effet de serre*. Technical report, INRA Mensuel.
- Seguin, B., Baculat, B., Baret, F., Brisson, N., Huard, F., & Ruget, F. (2004a). An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in france. proceedings of the 8th european society of agronomy congress. *European Journal of Agronomy*, ., 335–336.
- Seguin, B. & Soussana, J. (2006). Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de ges. *Fourrages*, 186, 139–154.
- Seguin, B., Stevez, L., Herbin, C., & Rochard, J. (2004b). Changements climatiques : perspectives pour la viticulture. 2^{ème} partie : conséquences potentielles d’une modification du climat pour la viticulture. *Revue des oenologues*, 111, 59–60.
- Soussana, J., Graux, A., & Tubiello, F. (2010). Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of Experimental Botany*, ., 1–12.

A Annexe

Impact du changement climatique sur l'agriculture en Europe (les cultures à grain les plus répondues comme le blé, le maïs, le tournesol et le soja)

	Europe
Facteurs climatiques intervenants	<ul style="list-style-type: none"> - La hausse de la température / les variables de précipitations, qui peuvent provoquer des sécheresses ; et surtout la variabilité plus importante de ces deux facteurs - L'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes.
Grandes Tendances	<ul style="list-style-type: none"> - Décalage ou expansion vers le Nord des secteurs de production : (Maïs, Tournesol et Soja) deviendront plus viable au Nord de l'Europe ou à des zones en altitudes dans le Sud de l'Europe, extension de 120 Km par hausse de 1°C, accompagnée d'une hausse de rendement. - Sud plus chaud et plus sec : baisse des rendements (colza, tournesol, orge)
Date d'estimation	2030—2050
Estimation de l'évolution des rendements	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes marge d'incertitudes, et d'importants contrastes régionaux. - Deux principales orientations : hausse au Nord et baisse au Sud. - Nord (Blé : +23% et Maïs : +140%) - Sud (Blé : -16% et Maïs : -36%)

B Annexe

Les scénarios climatiques

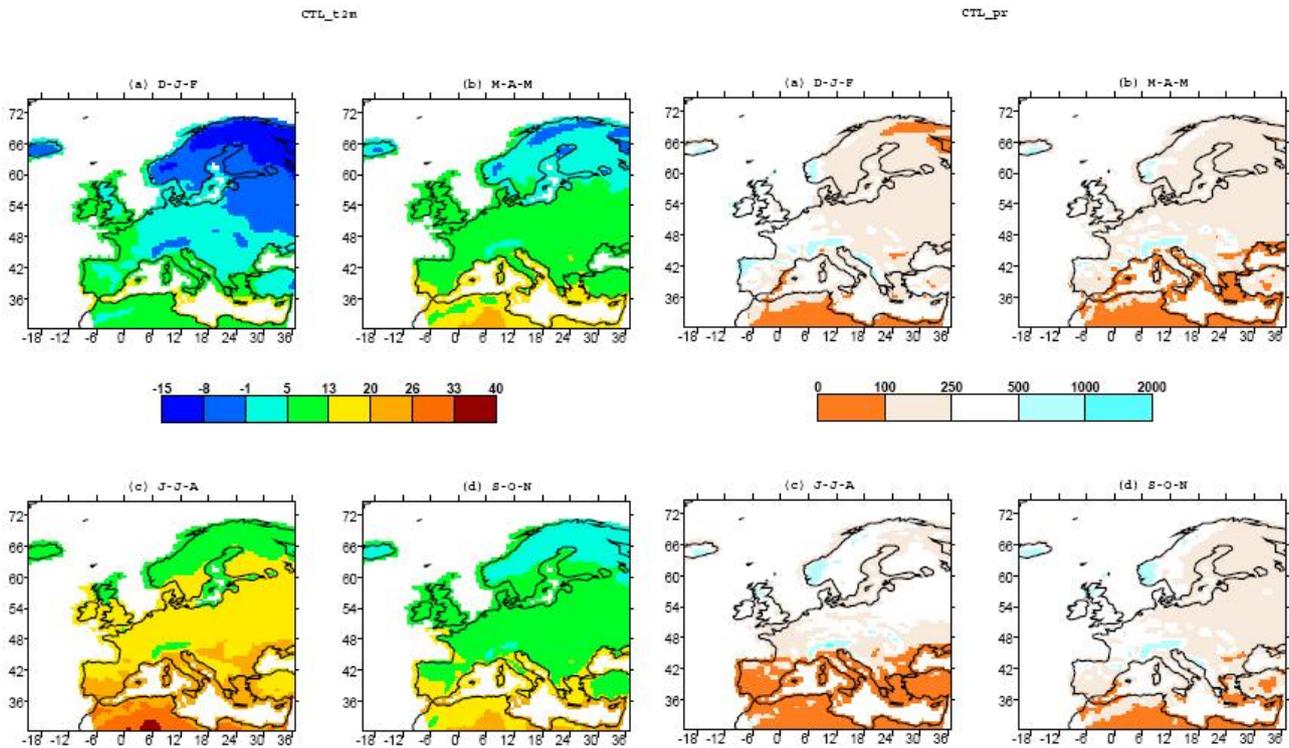


FIGURE 14 – Illustration du scénario climatique présent [CTL], en termes de la moyenne saisonnière des températures en [°C] (à gauche) et du cumul saisonnier des précipitation en [mm] (à droite)

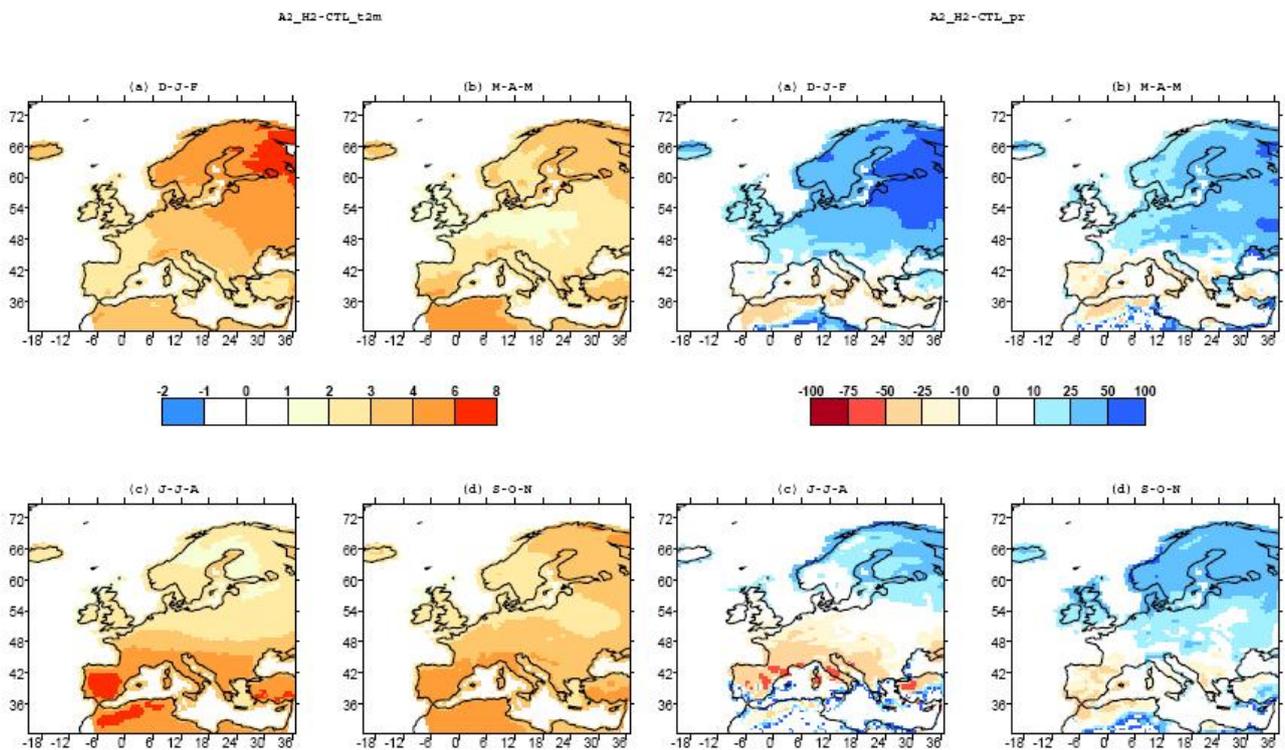


FIGURE 15 – Illustration du changement climatique [A2H2 - CTL], en termes de moyenne sur 30 ans de la différence : de la moyenne saisonnière des températures en [°C] (à gauche) et du cumul saisonnier des précipitation en [en relatif, %] (à droite)

C Annexe

Modèle utilisé STICS

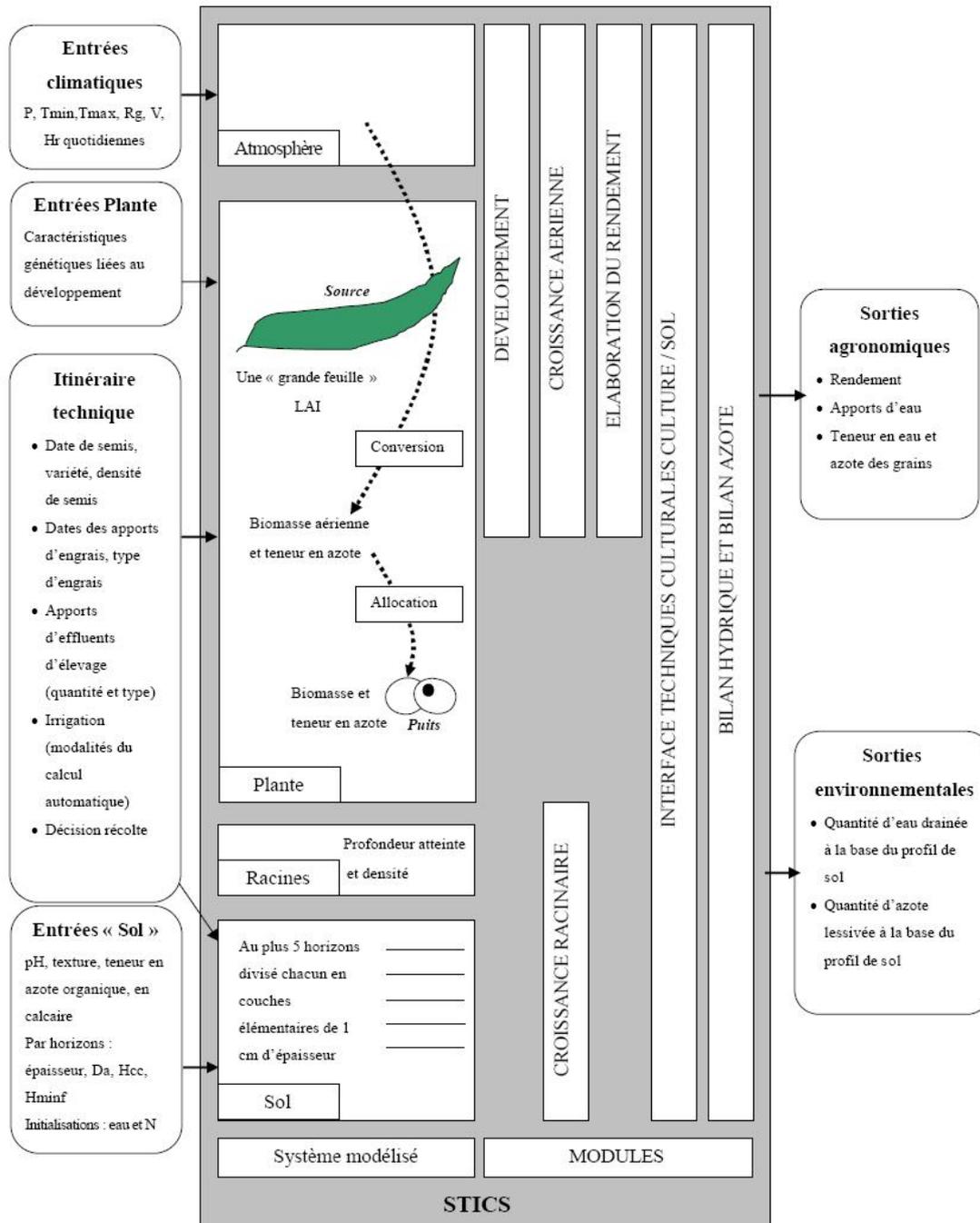


FIGURE 16 – Schéma de principe du modèle STICS : les entrées, le système modélisé, les modules et les sorties

D Annexe

Types d'options	Choix	Source d'information	Mode de définition par culture
Irrigation	Irrigué ou non irrigué	RICA	L'irrigation se fait selon un ordre de priorité qui tient compte de la valorisation de l'irrigation des cultures aussi bien la surface irriguée totale de chaque ferme-type et la surface à irriguer de chaque culture.
Fertilisation	1	Eurostat FAO	Fertilisation azotée (de 0 à 600 kgN) : Le type de la fertilisation et les dates des apports ont été déterminés selon les cultures sur la base des données Eurostat et FAO.
Variétés	1 ou 3	Projet Mars	Soit trois dates de semis et une seule variété, soit une date de semis et trois variétés.
Date de semis	1 ou 3		
Précédent cultural	2		Dans STICS, la culture précédente influe directement sur l'état du sol. Les deux précédents culturaux choisis sont une légumineuse représentée par la culture de pois ou une céréale représentée par une culture de blé d'hiver.

TABLE 1 – Les interventions techniques choisies comme données entrées pour STICS

E Annexe

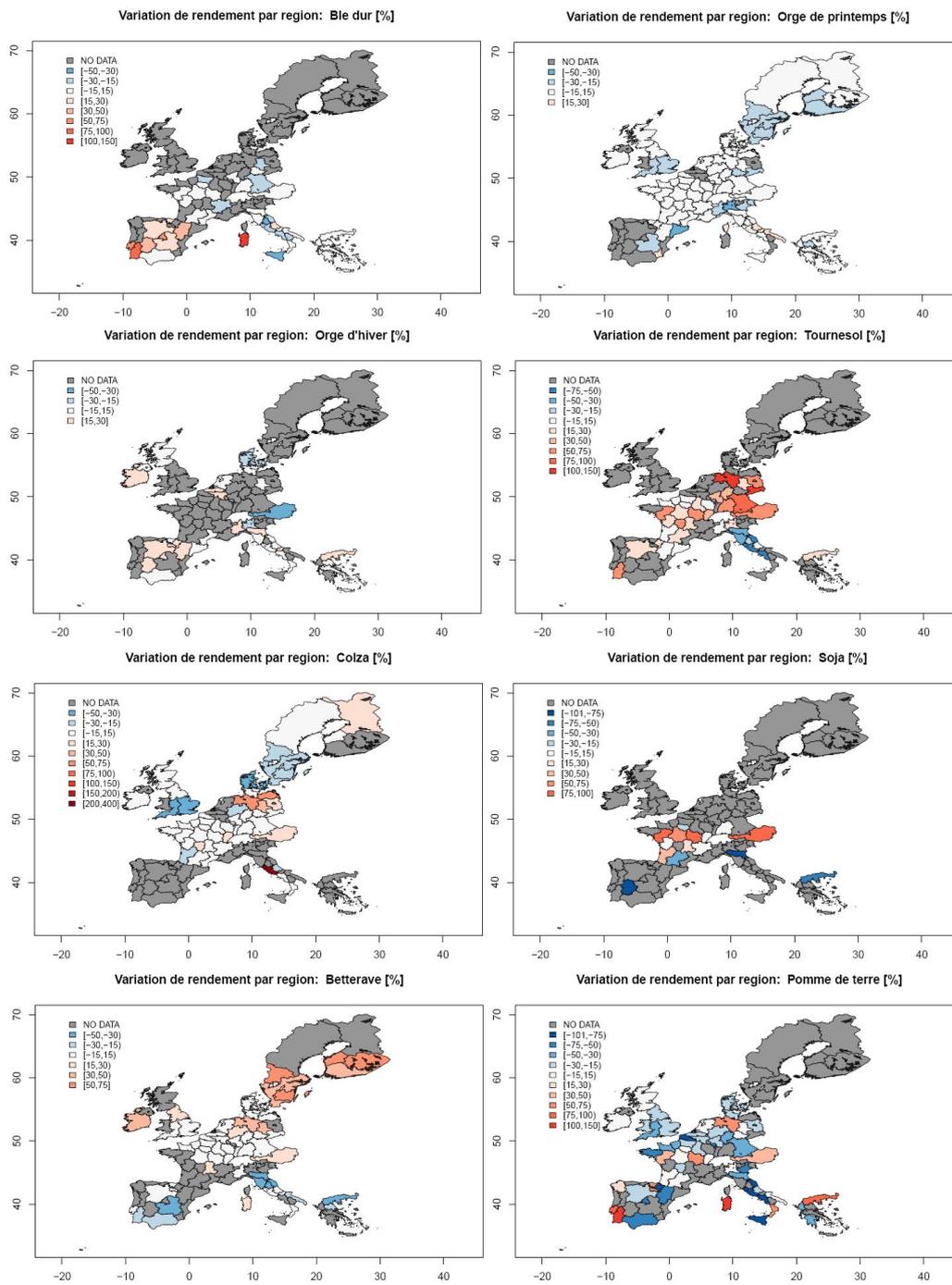


FIGURE 17 – Variation de rendement par region $[(A2H2 - CTL)/CTL]$ [%] et pour une dose d'azote égale à 160 kgN ha^{-1}

F Annexe

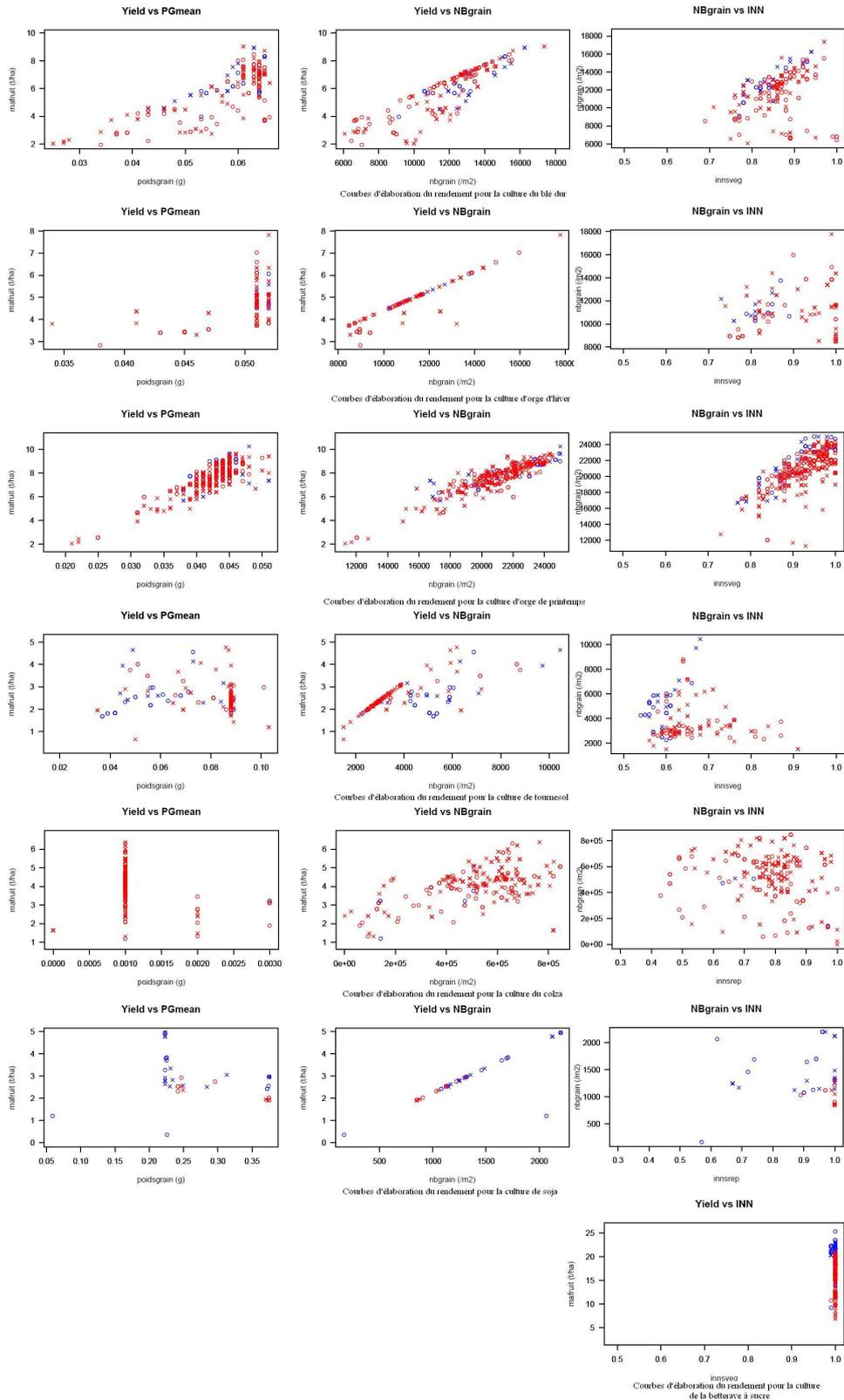


FIGURE 18 – Courbes d’élaboration de rendement au climat de référence (CTL) pour toutes les cultures et pour l’EU à 15 ; la première courbe (Yield vs PGmean)⁶, la deuxième courbe (Yield vs NBgrain) représente la variation du rendement [$t\ ha^{-1}$] en fonction du nombre du grain m^{-2} et la troisième courbe (NBgrain vs INN) représente la variation du nombre du grain m^{-2} en fonction de l’indice du stress azoté (INN)

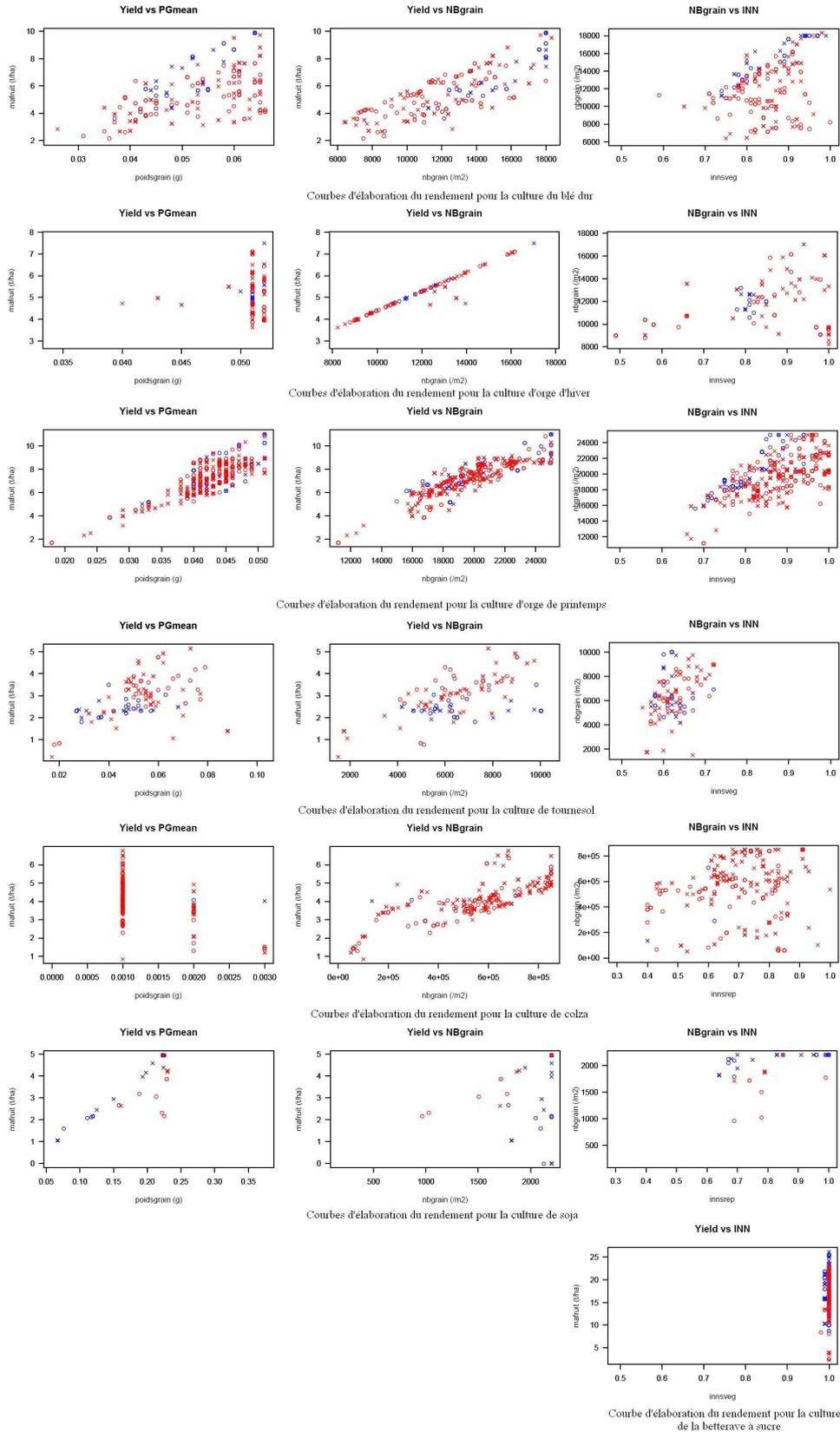


FIGURE 19 – Courbes d’élaboration de rendement au climat futur (A2H2) pour toutes les cultures et pour l’EU à 15; la première courbe (Yield vs PGmean) représente la variation du rendement [$t\ ha^{-1}$] en fonction du poids moyen du grain [g], la deuxième courbe (Yield vs NBgrain) représente la variation du rendement [$t\ ha^{-1}$] en fonction du nombre du grain m^{-2} et la troisième courbe (NBgrain vs INN) représente la variation du nombre du grain m^{-2} en fonction de l’indice du stress azoté (INN)

G annexe

Dans cette partie, les figures représentent les courbes d'élaboration du rendement pour la culture de blé tendre. la première courbe (Yield vs PGmean) représente la variation du rendement [$t\ ha^{-1}$] en fonction du poids moyen du grain [g], la deuxième courbe (Yield vs NBgrain) représente la variation du rendement [$t\ ha^{-1}$] en fonction du nombre du grain m^{-2} , la troisième courbe (NBgrain vs INN) représente la variation du nombre du grain m^{-2} en fonction de l'indice du stress azoté (INN), la courbe (Yield vs sow-to-harv-days) représente la variation du rendement en fonction de la durée de cycle, avec un paquet de points rouge = culture non irriguée, paquet de points bleu = cultures irriguées, le symbole croix = cultura ayant comme précédent cultural une légumineuse et le symbole rond = culture ayant comme précédent cultural une céréales.

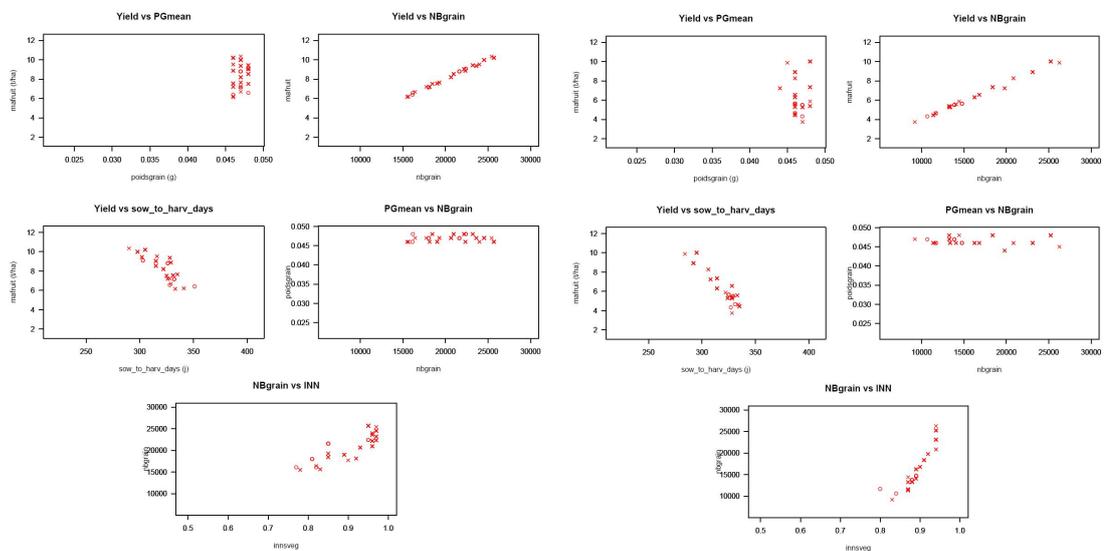


FIGURE 20 – Courbes d'élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de la France (fra1)(Nord de la France)

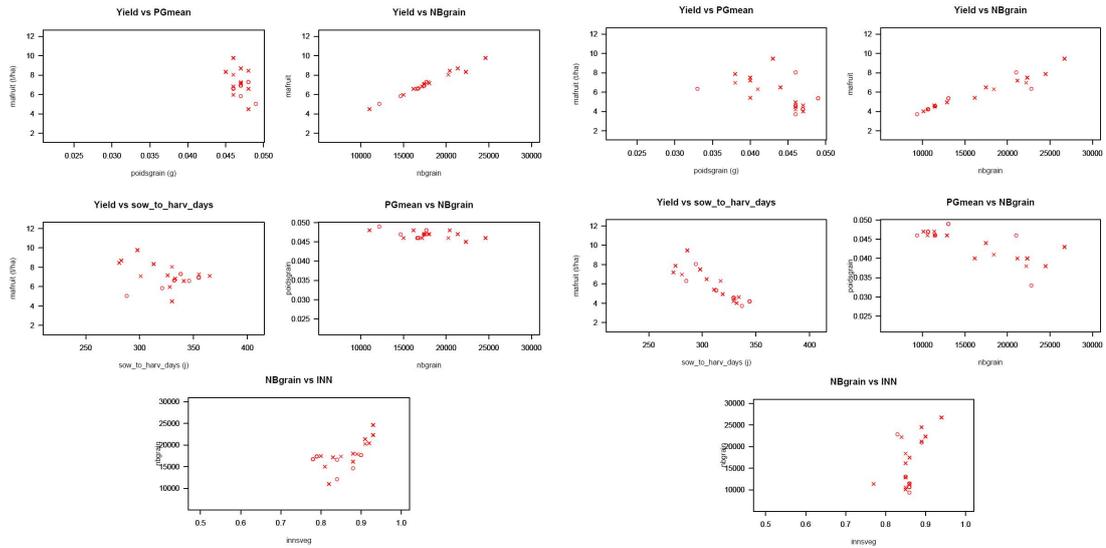


FIGURE 21 – Courbes d’élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de la France (fra2)(Sud de la france)

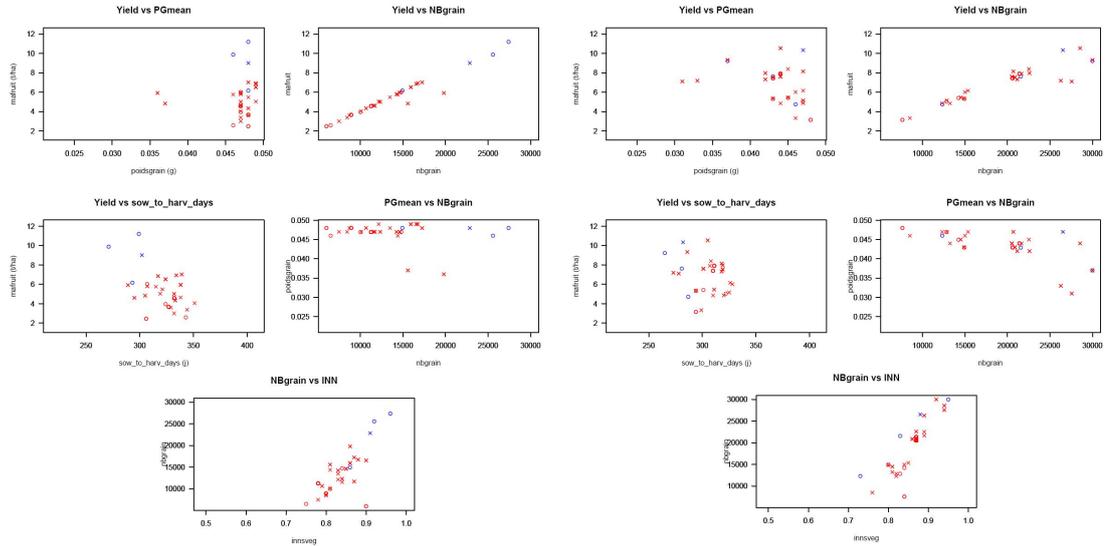


FIGURE 22 – Courbes d’élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de l’Espagne (Nord de l’Espagne)

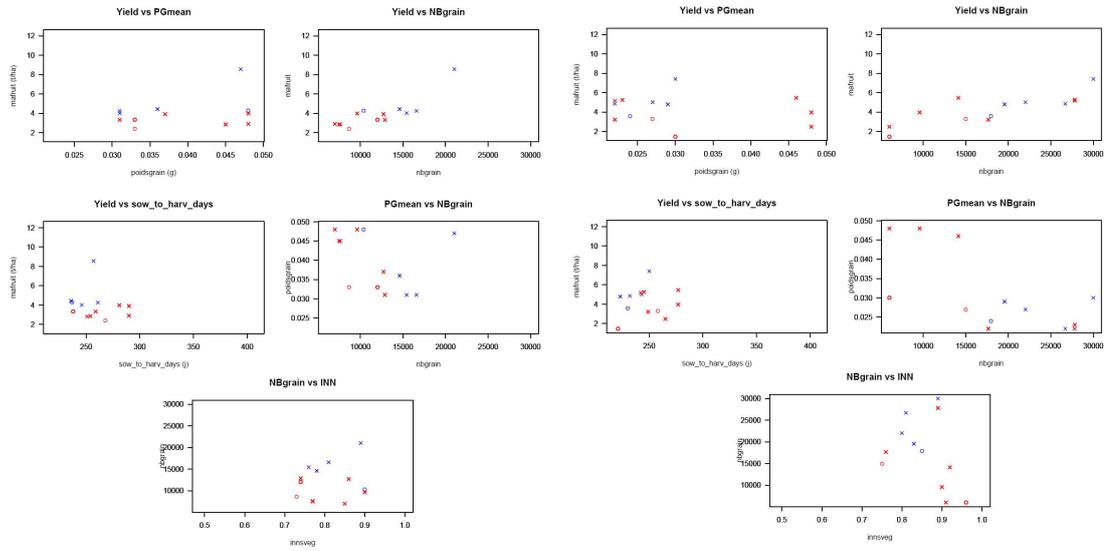


FIGURE 23 – Courbes d’élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de blé tendre et pour la région de l’Espagne (Sud de l’Espagne)

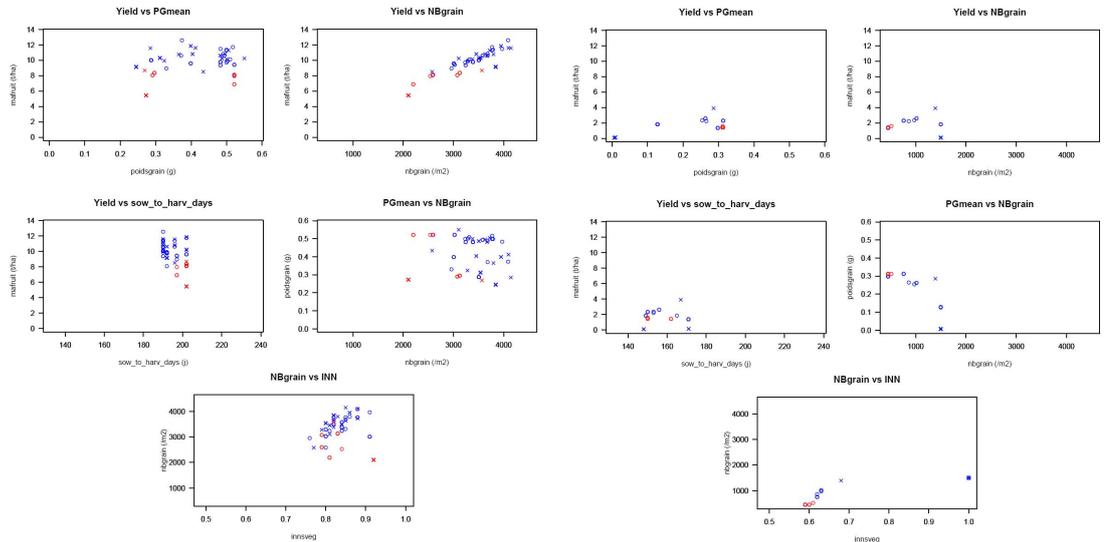


FIGURE 24 – Courbes d’élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de maïs et pour la région du (Sud de l’Espagne)

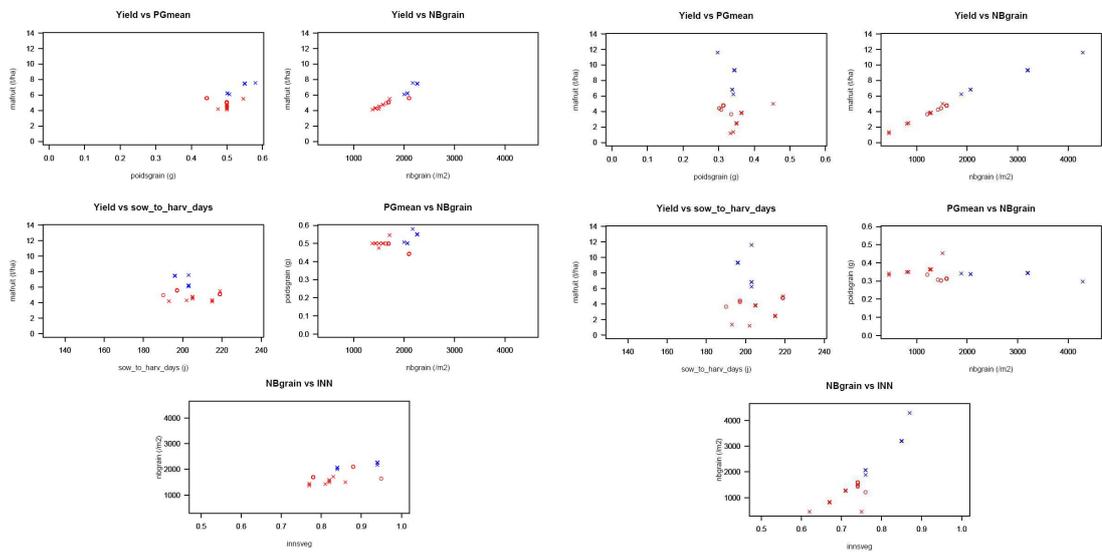


FIGURE 25 – Courbes d’élaboration de rendement au climat présent (CTL) à gauche et au climat futur (A2H2) à droite pour la culture de maïs et pour la région du (Sud de l’Espagne)