ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Ecole Doctorale ABIES
Agriculture Agriculture Alimentation Food Biologie Biology Environnement Environment Santé Health

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

Spécialité : Sciences de l'environnement

présentée et soutenue publiquement par

David LECLERE

le 12 juin 2012

Offre agricole Européenne et changement climatique : une exploration régionale des enjeux liés aux changements d'échelle par la modélisation intégrée

Directeur de thèse : **Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRE**
Co-encadrement de la thèse : **Pierre-Alain JAYET**

Jury

M. Bruno MARY,	Directeur de recherche INRA, UMR Agro Impact,	Rapporteur
M. Philippe QUIRION,	Chargé de recherche CNRS, CIRED	Rapporteur
M. Bernard SEGUIN,	Directeur de recherche INRA, UMR Agroclim,	Examinateur
M. Petr HAVLIK,	Docteur, IIASA,	Examinateur
M. Franck LECOCQ,	Professeur AgroParisTech, CIRED,	Examinateur
Mme. Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRE,	Directeur de recherche CEA, IPSL/LSCE,	Directrice de thèse
M. Pierre-Alain JAYET,	Directeur de recherche INRA, UMR Economie Publique,	Co-directeur de thèse

AgroParisTech
UMR Economie Publique INRA/AgroParisTech
Avenue Lucien Brétignières, F-78850 THIVERVAL GRIGNON, FRANCE

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Bruno Mary, Philippe Quirion, Bernard Seguin, Petr Havlik et Franck Lecocq, pour avoir accepté de faire partie de mon jury, et de m'avoir fait l'honneur d'examiner et d'évaluer mon travail de thèse.

Je tiens à remercier mes encadrants de thèse, Nathalie De Noblet-Ducoudré et Pierre-Alain Jayet, pour m'avoir soutenu dans la conception, le financement et la réalisation de ce projet de thèse tout au long de ces 4 ans. Leur patience, leurs compétences, mais aussi leur ouverture d'esprit et leur volonté de participer à une aventure interdisciplinaire ont été décisif pour orienter et faire progresser ce travail.

L'existence de ce travail doit aussi beaucoup aux conseils et encouragements de certaines personnes rencontrées au LSCE pendant mon stage de master 2, notamment Nicolas Vuichard, Pascalle Smith et Yann Meurdesoif. L'ADEME, à travers mon financement de thèse, a su soutenir ce projet interdisciplinaire, et je remercie Aurdey Trevisiol pour m'avoir suivie pendant cette thèse.

Le contenu scientifique de mon travail doit aussi beaucoup à des rencontres scientifiques faites durant ces 3 ans, notamment Thierry Doré, Stéphane De Cara, Valentin Bellassen, Florence Habets, Mathieu Vrac. Je tiens tout particulièrement à rendre hommage à Nadine Brisson. Je tiens aussi à remercier Dominique Ripoche et Marie Launay, et surtout Paul Zakharov pour leur aide technique. Une partie particulièrement interdisciplinaire de ce travail de thèse a aussi été conçue en collaboration avec des agronomes, et réalisé par deux stagiaires, Hajer Najlaoui et Marie Combe.

Enfin, je tiens à remercier très fortement mes collègues de travail, qui sont nombreux puisque j'aurais eu la chance de partager mon temps entre deux laboratoires. Je ne pourrais les remercier tous, mais je tiens particulièrement à remercier Cyril Bourgeois, Imen Braham, Bruno Vermont, Mélissa Clodic, Sylvie Lamantia et Pierre Humblot.

Enfin, je tiens aussi à remercier mes parents, mon frère et Agathe pour leur soutien !

Résumé

Les systèmes agricoles sont intimement liés au changement climatique : ils sont d'une part affectés par la dérive de son état moyen et de sa variabilité, et sont d'autre part des contributeurs nets à l'évolution du climat par l'extension de leur surface et l'intensité de leur gestion. L'évolution du système climat-agriculture repose sur nombreux mécanismes qui s'étendent sur une large gamme d'échelles temporelles et spatiales, et sont interdépendants. Pour réduire l'incertitude associée à l'évolution de ce système et guider les choix collectifs pertinents, il est nécessaire d'intégrer ces processus sur cette gamme d'échelle temporelle et spatiale. Dans cette thèse, je me suis intéressé aux échelles spatiales allant de la plus petite unité décisionnelle des systèmes de production agricole (l'exploitation) à celle de la décision publique concernant ces interactions entre climat et agriculture (échelle nationale à supranationale). Je me suis d'autre part intéressé au court terme (quelques années) et à l'Europe.

J'ai poursuivi le développement d'un outil de modélisation reposant sur le couplage du modèle d'offre agricole Européenne (AROPAj) et du modèle générique de culture (STICS), qui permet de prendre en compte les mécanismes adéquats à l'échelle du système de production, et leurs facteurs d'hétérogénéité à l'échelle de l'Europe. Cet outil m'a permis de mettre en valeur le rôle important à l'échelle Européenne des mécanismes de court-terme dans la réponse de l'offre agricole au changement climatique. En particulier, la prise en compte des adaptations de court terme des systèmes de production agricole modifie la vision habituellement retenue des impacts du changement climatique en Europe. J'ai de plus développé des méthodes alliant agronomie et statistique pour explorer l'hétérogénéité du comportement des principales cultures Européenne sous changement climatique entre régions, espèces et scénarios de changement climatique. Enfin, j'ai pu mettre en valeur la faible interaction en première analyse entre adaptation au changement climatique et réponse à la mise en place d'une politique réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau des systèmes de production agricole.

Abstract

Agriculture and the climate system are closely linked: agricultural systems are driven by changes in mean climate and its variability, while their expansion and intensification contribute to the anthropogenic perturbation of the climate system. The evolution of the climate-agriculture system relies on numerous processes, which extend over a wide large range of temporal and spatial scale, and are intertwined. It is necessary to integrate these processes across scales in order to both reduce the uncertainty that overshadow the evolution of the system, and help clever decision making. In this work, I focused on that integration goal in the specific case of Europe for short-term time scales in a future horizon. I focused on typical spatial scales of decision making: from the smallest decision unit in agriculture (farm scale) to the one of policy making regarding agriculture-climate interactions (Europe).

I continued the development of a modelling framework relying on the coupling of a microeconomic model of European agricultural supply (AROPAj) to a generic crop model (STICS), which account for adequate processes at farm scale, and for the factors that drive the heterogeneity in their net effects over Europe. This tool allowed me to highlight the specific role of farm-scale adaptations in the response of European agricultural supply to climate change. In particular, accounting for these processes alters the usual picture of climate change impacts over Europe. I further developed analytical methods building on agronomic and statistic knowledge to explore the heterogeneity in the response of major European crops, among geographical locations, species, and climate change scenarios. Finally, first results showed that at the farm scale, little interaction is expected between the adaptation to climate change and the implementation of a greenhouse gas mitigation policy targeting the agricultural sector.

Table des matières

Remerciements **3**

Résumé **5**

Abstract **6**

Table des matières **7**

Chapitre 1 ..... **9**

Introduction

1.1. Le rôle de l'agriculture dans le système climatique 11
1.2. Evolution historique de l'agriculture : déterminants et impact sur le climat 14
1.3. Enjeux futurs: de l'échelle globale à l'échelle régionale 19
1.4. Enjeux scientifiques de l'échelle Européenne 27
1.5. Objectif et plan de la thèse 33

Chapitre 2 ..... **35**

Outil de modelisation et jeux de données

2.1. Description et pertinence de l'outil de modélisation 37
2.2. Jeux de données physiques et techniques, et apports de la thèse 50
2.3. Conclusion 60

Chapitre 3 ..... **61**

Evaluation de l'outil de modélisation

3.1. INTRODUCTION 63
3.2. MATERIAL AND METHODS 65
3.3. RESULTS & DISCUSSION 73
3.4. CONCLUSION 82
APPENDIX 84

Chapitre 4 ..... **91**

Impact du changement climatique et adaptation autonome à l'échelle de la ferme

4.1. INTRODUCTION 93
4.2. MATERIAL AND METHODS 95
4.3. RESULTS 99
4.4. DISCUSSION 112
4.5. CONCLUSION 115
APPENDIX 117

Chapitre 5 121

Analyse du comportement des principales cultures Européennes sous changement climatique

5.1. L'évolution des cultures: du rendement au comportement 123
5.2. Classification et typologie d'évolution du comportement des cultures 129
5.3. Perspectives 137

Chapitre 6 139

Mitigation et changement climatique dans le secteur agricole

6.1. Mitigation du changement climatique et agriculture Européenne 141
6.2. Interactions entre mitigation et adaptation: premiers résultats 145
6.3. Perspectives 151

Chapitre 7 153

Conclusions et perspectives

7.1. Résultats et limites 155
7.2. Perspectives 159

Bibliographie 161

Annexes 174

Chapitre 1
Introduction

La pression historique de l'Homme sur les ressources de l'enveloppe terrestre superficielle a abouti, avec un très grand degré de certitude, à la perturbation de l'équilibre énergétique qui régit le climat sur Terre. Les surfaces continentales occupent environ 29% de la surface terrestre, et jouent un rôle important dans le système climatique. Par le développement historique de son étendue sur les surfaces continentales, et la gestion de plus en plus intensive de celles-ci, l'agriculture est responsable d'une partie de la perturbation anthropique du système climatique.

Pour autant, les activités agricoles sont elles-mêmes très dépendantes de l'état moyen et la variabilité du système climatique, et seront donc fortement affectées par son évolution future. Les raisons de cette évolution historique de l'agriculture, ainsi l'enjeu représenté par son évolution future, reposent fondamentalement sur le besoin de l'Homme de subvenir à ses besoins nutritifs. Si à l'échelle globale la démographie humaine et l'évolution des habitudes alimentaires déterminent en partie ce besoin, les progrès techniques ont joué et joueront un rôle important en contraignant fortement le lien entre ce besoin et les l'évolution des surfaces agricoles d'une part, et l'intensité avec laquelle celles-ci sont gérées d'autre part. De même, la distribution spatiale des surfaces agricoles et de l'intensité de leur gestion dépend autant de la localisation des principaux lieux de production et de demande, que des échanges commerciaux permettant leur éloignement. Les échanges commerciaux, ainsi que le progrès technique et les habitudes alimentaires, sont à leurs tours grandement dépendants de la distribution spatiale des richesses. L'agriculture est donc intiment liée à des processus complexes d'évolution de la société humaine, dans lesquels les interactions spatiales sont de plus en plus fortes. De même, l'évolution temporelle de ces interactions sont rapides comparées aux constantes temporelles d'évolution du système climatique.

Il y a donc une interaction mutuelle entre le climat et l'agriculture, qui recouvre des dimensions complexes sur une grande étendue d'échelles de temps et d'espace, et c'est précisément dans ce cadre que s'inscrit ma thèse. Mon travail a pour cadre général les enjeux scientifiques associés à ces interactions d'échelles, et s'attache plus particulièrement à l'échelle régionale Européenne.

Il est nécessaire de préciser les enjeux scientifiques à l'échelle régionale, dans le cadre de l'Europe. Je précise d'abord le rôle de la végétation dans le système climatique, et les mécanismes à travers lesquels l'agriculture module ce rôle. Je détaille ensuite à travers une perspective historique les principaux déterminants de l'activité agricole, en précisant notamment le rôle du climat mais aussi son poids par rapport au rôle d'autres déterminants de cette activité économique. Enfin, je détaille d'une part les raisons de la difficulté d'appréhender l'évolution du système agriculture-climat, et d'autre part les enjeux décisionnels qui s'y rattachent à différentes échelles spatiales. Je mettrai ainsi en valeur les principaux enjeux scientifiques que posent aujourd'hui cette interaction à l'échelle régionale, dans le cadre Européen. Ce cadre me permettra de préciser les objectifs de cette thèse.

1.1. Le rôle de l'agriculture dans le système climatique

Nous présentons ici les mécanismes à travers lesquels d'une part la végétation a un rôle actif dans le système climatique, et d'autre part l'agriculture modifie ce rôle.

1.1.1. La biosphère continentale dans le système climatique

L'influence du climat sur la distribution de la végétation est étudiée depuis le 18ème siècle, à travers la *biogéographie*. Cette discipline considère les écosystèmes naturels typiques de différentes régions comme un miroir du climat local. En effet, les zones observées de présence de ces différents biomes, qui peuvent être distantes, correspondent pour chaque biome à des plages de valeurs identiques de valeur moyenne et de saisonnalité en température et en précipitation (classification de Köppen, (Köppen, 1936)). Dans ce cadre, la végétation naturelle (non perturbée par l'Homme) est donc en grande partie définie par le climat, qui est perçue une contrainte externe au système biologique des écosystèmes terrestres, ou *biosphère continentale*. L'idée d'un *lien dynamique* entre le climat et la biosphère continentale est plus récente (deuxième moitié du 20ème siècle). Les surfaces continentales jouent un rôle important dans le bilan radiatif de l'enveloppe superficielle terrestre et dans la dynamique de la basse atmosphère, en échangeant continuellement avec l'atmosphère de grandes quantités d'énergie, de moment et de masse :

- D'un point de vue énergétique, le rayonnement solaire incident est dans sa grande majorité renvoyé à l'atmosphère, sous plusieurs formes. Le rayonnement solaire incident non directement réfléchi par le sol (fraction contrôlée par l'*albédo* de la surface) est absorbée par la surface du sol. Celui-ci en réémet une partie vers l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge, réchauffe l'air en contact avec la surface (qui est ensuite transporté, flux de *chaleur sensible*), et évapore l'eau de surface et du sol superficiel (flux de *chaleur latente*, qui restitue de la chaleur à l'atmosphère lors de la condensation de la vapeur d'eau). Enfin le sol transfert du moment à l'atmosphère via le frottement des masses d'air sur la surface, augmentant ainsi sa turbulence (l'ampleur de ce transfert est déterminée par la *rugosité* de la surface).

- D'un point de vue du cycle hydrologique, les précipitations incidentes sont: retournées vers l'atmosphère (via l'*évaporation* du sol et des eaux libres, et la *transpiration* des plantes), les rivières et les océans (via le *ruissellement de surface*), les aquifères (via le *drainage profond*), ou stockée dans le sol.

- Enfin, la surface continentale échange avec l'atmosphère de la masse sous forme particulaire ou gazeuse (poussières, composés organiques volatiles, gaz à effet de serre[1]) via des processus d'*émission* et de *déposition*. Il affecte ainsi le contenu atmosphérique en aérosol et sa composition chimique.

La présence de végétation joue un rôle particulier à cette interface: le système sol-plante utilise l'énergie solaire incidente, le dioxyde de carbone atmosphérique ainsi que l'eau et les

[1] Les gaz à effet de serre seront notés GES dans la suite du manuscrit

nutriments présents dans le sol pour fabriquer de la biomasse (via la photosynthèse), tandis que la matière organique ainsi accumulée dans le sol et les plantes est en partie renvoyée à l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone, de protoxyde d'azote, et de méthane (via la respiration et la minéralisation). Les processus sous jacents aux échanges d'énergie, et de moment sont appelés processus biophysiques, et ont un impact généralement local sur le climat. Les processus liés à l'échange de masse sont appelés processus biogéochimiques, et ils ont généralement un impact global sur le climat. Ces deux processus ne sont pas indépendants (par exemple, les échanges d'eau sont des échanges de masse et d'énergie), et le résultat net en termes d'échange avec l'atmosphère dépend de caractéristiques physiques (l'albédo, la rugosité) et biologiques (physiologie du couvert végétal, type de photosynthèse) des surfaces continentales, qui sont différenciées entre grand types d'écosystèmes terrestres. Ces processus permettent une interaction dynamique entre le climat et la biosphère terrestre, à différentes échelles de temps et d'espace.

Les interactions climat-végétation, ses processus individuels et ses rétroactions restent difficile à contraindre par l'observation, alors qu'ils sont de plus en plus étudiés depuis les années 1990, à l'aide la modélisation (Levis, 2010). Ceux-ci ont progressivement évolué, des modèles d'équilibre de végétation (approche biogéographique), puis les modèles globaux de végétation dynamique (avec une végétation dynamique couplant les processus biogéochimie et biophysique), puis enfin les modèles de système Terre, incluant un couplage de la biosphère continentale avec les autres composantes du système climatique (océan, atmosphère, cryosphère). L'influence de l'Homme sur la biosphère continentale y est aussi de plus en plus intégrée.

1.1.2. L'agriculture: une influence de l'homme sur la biosphère terrestre

L'Homme s'approprie une part des surfaces continentales pour un usage agricole. Ce faisant, d'une part il modifie les propriétés physiques et biologiques de la biosphère continentale qui régissent l'interaction entre surface continentale et atmosphère, et d'autre part il perturbe l'évolution des biomes en choisissant l'évolution de la couverture des sols.

Les surfaces agricoles possèdent des propriétés physiques et biologiques différentes des autres écosystèmes terrestres. Elles se rapprochent des prairies naturelles et des savanes, cependant leur gestion par l'Homme via les pratiques agricoles les différencie de ces écosystèmes naturels. Du fait de sélections variétales successives, les espèces cultivées possèdent une capacité photosynthétique améliorée, et leur couvert végétal possède une plus grande amplitude saisonnière de densité foliaire tandis que sa densité spatiale est très variable (espèce cultivée, densité de semis, structure des paysages agricoles). D'un point de vue *biogéochimique*, leur productivité en biomasse peut être stimulée par l'apport d'éléments nutritifs (fertilisation) et d'eau (irrigation). La biomasse produite est en grande partie prélevée du système sol-plante (par la récolte ou le pâturage) et le carbone qui la constitue est rapidement restitué à l'atmosphère (après utilisation par l'Homme). Le carbone stocké dans le sol superficiel est en partie restitué à l'atmosphère par le travail du sol, tandis que les apports nutritifs (notamment les fertilisants azotés) génère plus d'émission de protoxyde d'azote, et

l'apport de résidus de culture peut stimuler la minéralisation du carbone stocké dans le sol (*priming effect*). Du point de vue *biophysique*, la gestion du cycle de culture et des rotations d'une année sur l'autre font généralement apparaitre des plus longues périodes de sol nu, altérant l'albédo de la surface. En humidifiant le sol, l'irrigation contribue aussi à modifier son albédo. Elle permet aussi de fournir de l'eau au système sol-plante à un moment ou celui-ci n'en dispose plus, altérant ainsi la saisonnalité du fractionnement de l'énergie renvoyée à l'atmosphère sous forme de flux de chaleur latente et sensible. A une échelle spatiale un peu plus grande, bien qu'assez variable la structure des paysages agricoles homogénéise la distribution spatiale des types de végétation dans les grands bassins de production agricole, tandis qu'elle la fragmente dans les zones où l'agriculture est présente en plus faible proportion. Ces types de structures paysagères impacte l'évolution des masses d'air.

Les surfaces cultivées altèrent la saisonnalité et le bilan net des échanges d'énergie, de moment et de masse entre la surface continentale et l'atmosphère. Sur des temps plus longs, l'évolution dynamique de la couverture du sol et ses rétroactions avec l'état de l'atmosphère et des autres composantes du système climatique sont aussi perturbées, car l'évolution de la couverture végétale devient contrôlée par l'Homme (figure 1.1).

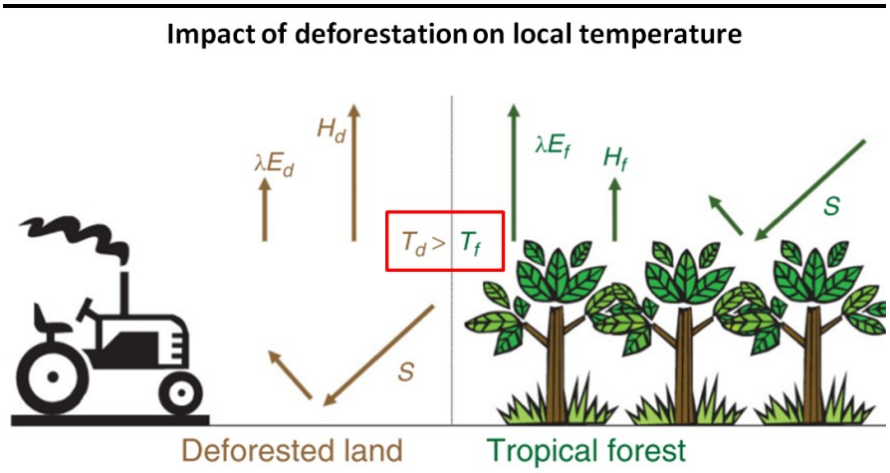


Figure 1.1 - Exemple d'impact de l'évolution des surfaces agricoles sur le climat. La déforestation d'un couvert végétal de type forêt tropicale à des fins agricoles réduit le fractionnement de l'énergie renvoyée vers l'atmosphère entre chaleur sensible (H) et chaleur latente (λE), et augmente ainsi la température locale de surface. *Figure extraite de* (Levis, 2010).

1.2. Evolution historique de l'agriculture : déterminants et impact sur le climat

Depuis l'apparition de l'agriculture au néolithique (il y a environ 12 000 ans) à aujourd'hui, la population humaine est passée de moins de 2 millions à environ 7 milliards d'individus. La satisfaction des besoins alimentaires et énergétiques de cette population croissante a transformé l'agriculture.

1.2.1. L'expansion des surfaces agricoles

Pour satisfaire ce besoin, l'homme s'est progressivement approprié une part grandissante des surfaces continentales pour un usage agricole. La part des cultures et prairies dans les des surfaces continentales (non englacées) est ainsi passée de moins de 1% au néolithique, à 4%, 10% puis 38% respectivement en 1500, 1850 et aujourd'hui (Hurtt et al., 2011; Klein Goldewijk et al., 2011), au dépend de la végétation primaire (voir figure 1.2).

L'effet de ce changement historique de couverture des sols sur le climat est encore mal connu. D'un point de vue biogéochimique, il y a consensus sur le principal processus: le déstockage du carbone contenu dans la végétation remplacée, et d'une partie du celui stocké dans le sol, impliquant une hausse de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, et une augmentation du forçage radiatif. Seule l'ampleur des émissions et donc du forçage radiatif associé est incertain (entre +0.27 et +0.57 W/m² entre 1850 et 2000 (Forster et al., 2007)), l'incertitude portant sur l'ampleur et le type d'usage des sols concernés par ces transitions. D'un point de vue biophysique, l'impact historique est plus incertain, et les modèles donnent une réponse très variable (Pitman et al., 2009), à la fois dans leur implémentation des changements historiques de couvertures des sol, et dans leur effet simulé.

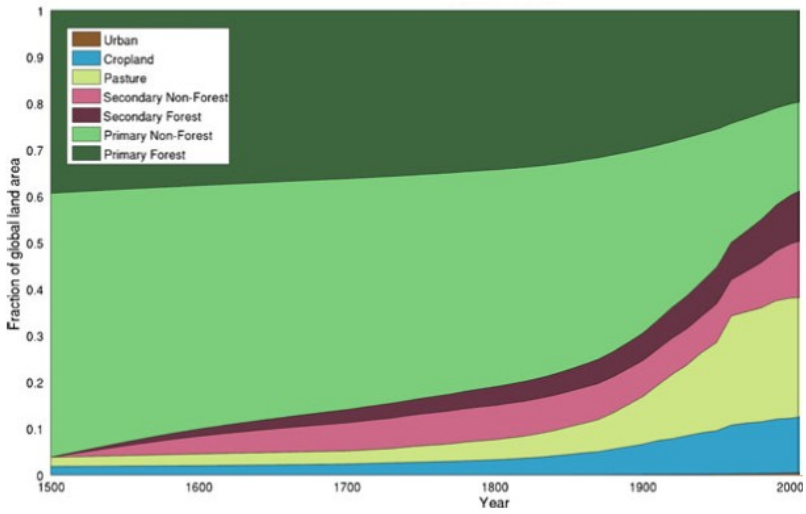


Figure 1.2 - Reconstitution de l'évolution historique de la couverture des sols entre les années 1500 et 2000. La figure donne l'évolution de l'occupation des terres non englacées par différents couverts végétaux, en fraction. La part la végétation primaire est représentée par les couleurs vertes, tandis que les prairies et cultures sont indiquées par les couleurs jaune et bleues. *Figure extraite de (Hurtt et al., 2011).*

On estime que l'effet biophysique est principalement opposé à l'effet biogéochimique au niveau global, bien que très variable spatialement. Plusieurs évaluations de l'impact historique du changement de couverture des sols ont été réalisées à l'aide de modèles de système terre, et semblent converger vers une légère augmentation du forçage radiatif global (l'effet

biogéochimique prenant le dessus), avec un effet net spatialement très variable sur le climat de surface (Pongratz et al., 2010).

1.2.2. Une utilisation de plus en plus intensive des surfaces agricoles

Cette évolution historique des surfaces cultivées, confrontée à des ressources planétaires limitées en terres cultivables a amené à l'idée que ce sera le facteur limitant qui régulera l'augmentation toujours croissante de la population humaine, selon les théories inspirées notamment des travaux des économistes britanniques Thomas Malthus (1766-1834) et David Ricardo (1772-1823). De manière stylisée, selon cette théorie l'accroissement de la population implique une rareté croissante de la terre et finalement des famines régulant la population, dont la taille d'équilibre dépendra de la productivité de l'activité agricole. Cependant, depuis la fin du 19ème siècle, cette dernière a explosé, replaçant ainsi l'agriculture dans une théorie dans laquelle la rareté des ressources induit une innovation technologique abaissant cette rareté (thèse initiée par l'économiste danoise Ester Boserup, 1910-1999). En effet, depuis cette période, et plus spécifiquement depuis la fin de la Seconde Guerre Mondiale, la productivité agricole (en terme de volume de production par hectare) a très fortement augmenté (Hazell and Wood, 2008), par le développement et la diffusion d'innovations technologiques, de connaissances agronomiques, et la mécanisation progressive du travail (voir figure 1.3). Cependant, les évolutions respectives et les niveaux actuels de la productivité de la terre (par exemple le rendement végétal) et du travail sont très contrastés sur l'ensemble du globe et reposent historiquement sur un investissement massif en recherche et développement dans les pays développés, ensuite diffusée dans les pays en voie de développement (Piesse and Thirtle, 2010).

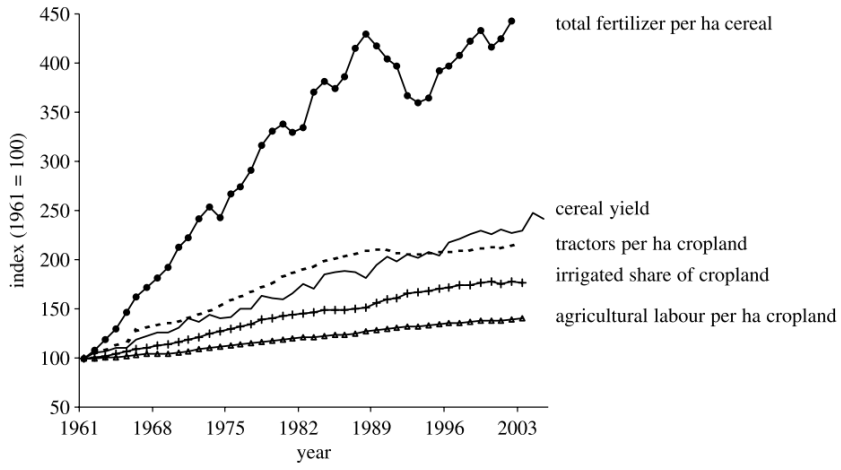


Figure 1.3 - Tendances en moyenne globale de l'intensification de la production agricole de 1961 à 2003. Evolutions des rendements en céréales, de la quantité de fertilisants par hectare, de la part irriguée de la surface agricole, du travail humain par hectare, ainsi que du nombre de tracteur par hectare (%, base 100 en 1961). *Figure extraite de* (Hazell and Wood, 2008).

Cette augmentation de l'intensité de la gestion des surfaces agricoles à pour principal impact sur le climat une hausse du forçage radiatif via les émissions de gaz à effet de serre (processus biogéochimique). L'agriculture est aujourd'hui responsable d'environ 10 à 12% des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre (Smith et al., 2007), et est le premier poste

d'émissions hors CO_2. L'agriculture émet principalement du protoxyde d'azote (N_2O, pour environ 60% des émissions anthropiques) qui résulte de la décomposition de l'azote du sol non absorbé par les plantes, et du méthane (CH_4, pour environ 50% des émissions anthropiques) par décomposition des composés organiques en condition anaérobie (principalement lors de la fermentation entérique, et plus minoritairement par les rizières). Ces émissions sont très hétérogènes dans le temps et l'espace, et quantifiées avec une grande incertitude. Les émissions de CH_4 et de N_2O depuis l'ère préindustrielle sont essentiellement dues à l'agriculture.

D'un point de vue biophysique, leur impact est moins étudié, mais des études récentes simulent par exemple que le développement de l'irrigation au 20ème siècle a des effets saisonniers sur le climat de surface autour des grandes zones d'irrigation (baisse des températures estivales, perturbation des précipitations, augmentation de la couverture nuageuse) et des endroits plus éloignés (via une perturbation de la circulation atmosphérique) (Sacks et al., 2008; Puma and Cook, 2010). Ce type d'effet est en partie validé par les observations (Raddatz, 2007). Il faut noter que l'augmentation de l'intensité de l'usage des sols a d'autres effets environnementaux, notamment l'érosion des sols, l'eutrophisation des eaux et rivières, et une pression accrue sur les ressources en eau douce. Ces impacts environnementaux posent plusieurs problèmes à plus en moins long terme, et font l'objet d'un effort de régulation de l'activité agricole dans certains pays (en particulier dans les pays de l'OCDE).

1.2.3. Vers une intensification des téléconnections spatiales

Parallèlement à cette évolution récente de la productivité, les flux commerciaux de produits agricoles ont aussi explosé, en étant multipliés par un facteur 10 depuis la fin de la Seconde Guerre Mondiale (Hazell and Wood, 2008). Cette évolution est due à la libéralisation des marchés agricoles autant qu'à l'évolution des moyens de transport et de communication. Les produits agricoles sont transportés sur de plus en plus grandes distances de la production à la consommation, et à l'échelle globale leur prix à la consommation a progressivement baissé. La production est de plus en plus structurée par ces échanges internationaux, qui ont entrainé une évolution significative de la distribution spatiale des différentes productions agricole. En effet, les marchés domestiques et d'exportations sont de plus en plus soumis à la concurrence internationale, et chaque pays ou région est poussée à se concentrer dans l'activité où possède un avantage comparatif dans un contexte globalisé. Cependant, tous les producteurs ne sont pas exposés de la même manière, la majorité des pays de l'OCDE ayant adopté une politique de protection de leur production intérieure face aux marchés mondiaux. De même, si la part de l'agriculture dans la production nationale de richesse a énormément diminuée dans les pays développés, elle représente encore une part significative dans les pays émergeants ou en voie de développement.

Ce contexte favorise des téléconnections de plus en plus forte à l'échelle globale, ce qui rend l'évolution de l'agriculture dépendante d'interactions s'étalant sur de larges échelles spatiales (local à mondial), et des échelles de temps de plus en plus courtes. Un exemple probant de ces téléconnections spatiales est le développement récent de contrats de vente ou

de location des terres en Afrique (Friis and Reenberg, 2010). En 2 ans, ces contrats couvrent l'équivalent de la surface de la France, et sont effectués par divers acteurs: des pays émergeants à forte démographie (Chine, Inde), des pays riches mais démunies de terres arables (Arabie Saoudite, Emirats Arabes Unis, Qatar, etc.). Ces contrats sont par ailleurs réalisés par des parties de droit public (pays) ou privés (compagnies nationales et transnationales). Les causes sous-jacentes avancées relèvent autant de stratégies d'anticipation de changements structurels de long-terme (démographie, projection d'impact changement climatique) que d'effets de politiques nationales (politiques stratégiques nationales en réponse à la crise du secteur alimentaire de 2008).

1.2.4. Et la contrainte climatique ?

Le climat détermine fortement, en conjonction avec d'autres facteurs environnementaux locaux (propriétés du sol, ressources en eau douce), la faisabilité des différentes espèces cultivables et leur rendement (Olesen and Bindi, 2002). En effet, la production agricole repose en partie sur l'exploitation de biomasse végétale, en tant que production vendue ou intrant pour la production animal. Celle-ci repose principalement sur la disponibilité de rayonnement solaire incident, et les ressources du sol en eau et de nutriments via la photosynthèse. Cependant, la température et les précipitations (via la recharge du sol en eau) influencent également l'accumulation de la biomasse (en agissant journalièrement sur la photosynthèse, la respiration, la croissance foliaire) et la durée du cycle des plantes. Les espèces cultivées se différencient par leur sensibilité à la valeur moyenne et l'amplitude saisonnière des températures et de la disponibilité en eau. Ces critères vont participer au choix des espèces et variétés cultivées, de leur enchainement et des pratiques agricoles associées.

Les contraintes climatiques vont donc participer à la définition du type d'activité agricole possible, et aux choix d'investissement à l'échelle de l'exploitation (bâtiments, machines agricoles, besoin de main d'œuvre). Les *propriétés moyennes du climat*, variables spatialement, déterminent donc en partie la variabilité spatiale des systèmes agricoles. La *variabilité interanuelle du climat*, contraint une grande partie de la variabilité temporelle des rendements. Les régimes extrêmes de précipitation (sécheresses et inondations) et de température (périodes de gel tardifs et fortes températures estivales) peuvent aussi amener à des pertes significatives de rendement, et leur fréquence définit aussi des contraintes fortes sur l'organisation de la production agricole. Localement, le poids des contraintes climatiques à la production agricole est cependant très dépendant de son interaction avec les autres déterminants de la production agricole, qu'ils soient environnementaux (qualité du sol), culturaux (connaissances agronomiques) ou socio-économiques (technologie, coût et productivité du travail). A une échelle spatiale plus agrégée, le climat a donc un impact fort sur les avantages comparatifs entre différentes régions du monde, mais qui reste intimement lié aux autres déterminants de l'activité agricole.

Il faut cependant noter que l'ensemble des processus qui détermine la contrainte climatique sur l'activité agricole est encore mal maitrisée. La connaissance de l'interaction entre le climat local, le sol, la plante, l'environnement écologique, et l'intervention humaine (sciences

agronomiques au sens restreint) est en constante progression. Les outils de modélisation de ces connaissances sont en partie basés sur des connaissances empiriques dont le nombre et le poids des différents processus en jeu est encore mal délimité. La considération supplémentaire des déterminants culturels et socio-économiques de l'agriculture, de l'échelle du champ à l'échelle des échanges commerciaux internationaux, et de leur interaction avec les processus précédemment cités, ont poussé à une redéfinition constante du périmètre des sciences agronomiques, aboutissant au concept d'« agro-écologie » (Dalgaard et al., 2003; Wezel et al., 2009).

1.3. Enjeux futurs: de l'échelle globale à l'échelle régionale

Je précise les enjeux futurs de l'interaction entre climat et agriculture pour le secteur agricole à différentes échelles spatiales, afin de préciser notre définition de l'échelle régionale. Nous préciserons ensuite les enjeux scientifiques associés à l'échelle Européenne.

1.3.1. Enjeux de l'échelle globale : mitigation et adaptation

Les exercices prospectifs sur l'évolution du système climatique, de ses impacts pour les sociétés humaines, et de sa perturbation par celles-ci permettent de cibler les enjeux futurs associés aux interactions entre le climat et l'agriculture. A l'horizon de la fin du 21ème siècle, il est très probable que le système climatique subira des changements plus amples que ceux observés au 20ième siècle si les émissions de GES continuent au rythme actuel ou à un rythme supérieur (Barker, 2007). Les impacts estimés du changement climatique pour les sociétés humaines sont suffisamment conséquents pour nécessiter une *adaptation*. Cependant, l'intensité du changement climatique futur dépend des efforts effectués au niveau *mondial* pour en réduire l'ampleur (*mitigation*).

La trajectoire future de cette perturbation du système climatique est très incertaine, et dépend de choix collectifs qui représentent un *défi considérable pour l'action politique mondiale*. Premièrement, les effets locaux de la pollution ne peuvent être reliés localement au niveau de pollution (pollution globale), et réduire l'ampleur du changement climatique ne peut se faire qu'à travers une réduction des émissions globales. Deuxièmement, ces dernières reposent sur des choix historiques d'exploitation des ressources en matière énergétiques, industriels et alimentaires, qui sont très structurants pour les sociétés humaines et sont intimement liées à la création de richesse : s'en passer représente un coût considérable, et la mise place d'un effort intensif de mitigation de la part d'un pays isolé peut poser un problème de compétitivité dans le contexte d'une économie ouverte. Enfin, les différents pays peuvent avoir des intérêts et des positions stratégiques non collaboratives, qui peuvent bloquer la mise en place d'un effort de mitigation international commun. En effet, l'ampleur du changement climatique ne dépend à long terme que du cumul des émissions des GES, et la contribution historique relative à ce cumul est plus grande pour les pays développés que pour les pays en voie de développement. Enfin, les impacts projetés du changement climatique sont spatialement très variables, et sont estimés plus importants dans les pays en voie de développement. En résumé, la réduction de l'ampleur du changement climatique est couteuse, et nécessite de *forts engagements nationaux, sur des objectifs communs au niveau mondial,* alors qu'il existe des *intérêts potentiellement divergents entre les nations* sur l'objectif à atteindre en termes de réduction de l'ampleur du changement climatique.

Il existe depuis 1992 un cadre de référence pour les négociations internationales relatives au changement climatique, qui repose sur la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Ce traité a pour objectif de réduire les émissions mondiales de GES, sans définir d'objectifs contraignants. Il reconnait aussi dans son principe une responsabilité historique différenciée des pays développés et des pays en développement. Ce

principe justifie la position de certains pays en voie de développement qui revendiquent un droit à polluer équivalent aux pays développés et un report temporel de leur effort de mitigation, au nom d'un droit égal au développement. Des négociations régulières ont lieu, et ont permis d'obtenir des accords: par exemple, des objectifs contraignants ainsi que des instruments de mise en œuvre ont été actés en 1998 par un certain nombre de parties (principalement des pays développés) pour la période 2008-2012 (protocole de Kyoto), et en 2010 un seuil d'ampleur du changement climatique à ne dépasser (2°C de réchauffement en moyenne globale par rapport à l'ère préindustrielle) a été acté par l'ensemble des parties (Accord de Cancún). Cependant, tous les pays développés ne sont pas rentrés dans le protocole de Kyoto (notamment les Etats-Unis), et d'autres en sont sortis après le non-respect de leurs objectifs (notamment le Canada). De plus, aucun accord n'a été obtenu sur la suite à donner aux objectifs et aux mécanismes du protocole de Kyoto. Dans ce cadre, *il parait de plus en plus difficile d'atteindre la cible des 2°C si un effort de mitigation significatif n'est pas fait d'ici à 2020* (Rogelj et al., 2011), et l'adaptation prend une part de plus en plus importante dans les négociations et dans les objectifs des politiques nationales.

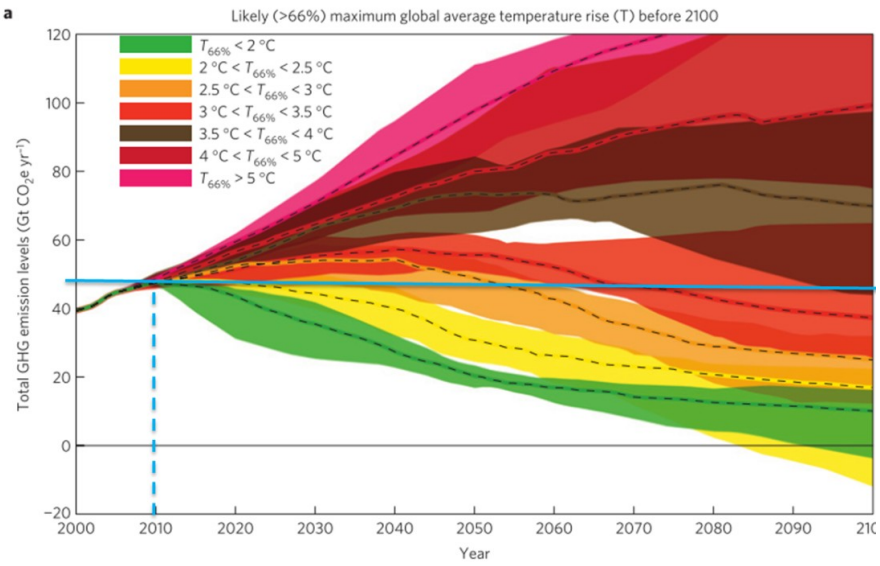


Figure 1.4 - Trajectoires d'émissions globales de GES à respecter et ampleur du changement climatique. Les enveloppes de différentes couleurs estiment les trajectoires d'émissions de GES à respecter pour atteindre en 2100 différents niveaux de changement. *La figure est adaptée de* (Rogelj et al., 2011)*, et l'estimation des émissions de GES en 2010 (48 $GtCO_2eq$) provient du Global Carbon Project.*

En termes scientifiques, les choix de développement humain futurs sont abordés par la considération de scénarios, comme par exemple les scénarios SRES développés par l'IPCC (Nakicenovic et al., 2000), qui considèrent différents fils narratifs cohérents en termes d'évolutions démographiques, économiques, technologiques, et environnementales des sociétés humaines. Les scénarios développés se basent principalement sur deux dichotomies. La première décrit le degré de convergence et de coopération entre nations : par exemple les scénarios SRES A1 et B1 décrivent un haut degré de convergence et de coopération, à l'inverse des scénarios A2 et B2. La deuxième différencie les scénarios en termes de priorité entre développement économique et protection de l'environnement : dans les scénarios A1 et A2, les considérations environnementales prennent peu de place, tandis que dans les scénarios B1 et B2, c'est l'inverse. Les scénarios se différencient donc les uns des autres par des hypothèses différentes pour chaque grande région du monde d'évolution de la population humaine, de

création de richesse, de progrès technologique, d'échanges commerciaux, et de réduction des émissions de GES.

1.3.2. Les enjeux du secteur agricole à l'échelle régionale

On estime que le secteur agricole peut *potentiellement* (au sens d'un maximum technique) contribuer significativement à l'effort de mitigation (Smith et al., 2007). Les principaux moyens reposent sur : (i) la réduction des émissions du secteur agricole (principalement via l'adaptation des pratiques agricoles), (ii) la réduction des émissions dans d'autres secteurs (par exemple la production de biomasse à vocation énergétique comme une alternative à l'énergie fossile), et (iii) la séquestration de carbone atmosphérique dans les sols agricoles (principalement via un usage des sols et des pratiques appropriées).

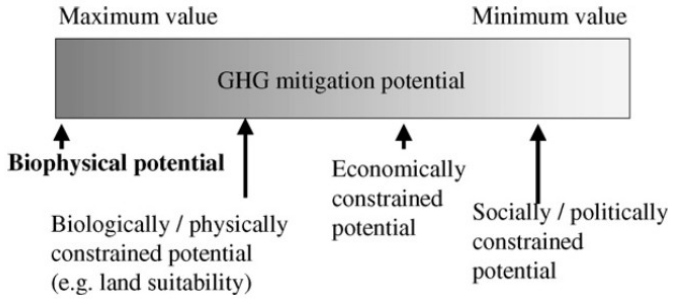


Figure 1.5 - Différence entre potentiels de mitigation technique et limité (biologiquement, économiquement, politiquement ou socialement) de mitigation par le secteur agricole. *Figure extraite de* (Smith et al., 2008).

Cependant, les options de mitigation les plus efficaces, ainsi que les émissions elles-mêmes, sont sujettes à une *forte incertitude* et ont une *grande variabilité spatiale,* caractéristiques de la complexité de la relation entre l'activité de production et son environnement (Smith et al., 2007). De même, le degré effectif de mitigation est limité par des barrières techniques, économiques, politiques et sociales (voir figure 1.5). La mitigation a un coût: le degré d'adoption spontané de ces mesures est très incertain, et une mitigation effective nécessite une politique dédiée. Celle-ci se construit à une échelle nationale ou supranationale, spatialement bien supérieure à l'échelle caractéristique de la variabilité spatiale des émissions. De même, elle doit intégrer des mécanismes de plus large échelle: dans un contexte où l'activité agricole est soumise à une forte concurrence internationale, un effort de mitigation différé dans le temps entre nations peut fragiliser la compétitivité de certains producteurs agricoles. La question de coût-efficacité, c'est-à-dire l'obtention d'une cible de mitigation donnée au moindre coût, est aussi un critère essentiel dans la conception d'une politique de mitigation au niveau régional comme au niveau international.

La question de la réalisation d'un objectif de mitigation dans le secteur agricole fait donc apparaitre: d'une part une *complexité* inhérente au lien entre les systèmes de production agricole et leur bilan de GES, d'autre part une forte sensibilité de ce lien à des déterminants environnementaux physiques spatialement très hétérogènes autant qu'a des mécanismes de plus large échelle. Ces propriétés révèlent des défis scientifiques: d'un point prospectif il s'agit d'être capable de déterminer le bon niveau d'intégration de cette complexité, et d'un point de vue de l'aide à la décision publique spécifique à une échelle nationale ou supra-nationale (dite

régionale), il s'agit du choix des moyens d'interventions qui permettent au mieux de réaliser un objectif donné de mitigation.

Pour les régions *tempérées*, le rendement des principales espèces agricoles devraient bénéficier du changement climatique jusqu'à 3°C d'augmentation de la température moyenne globale, puis décliner pour un réchauffement climatique de plus grande ampleur (Easterling et al., 2007). A l'inverse, dans les régions *tropicales*, les rendements devraient diminuer même pour un faible changement climatique (voir figure 1.6). Dans une perspective générale, l'effet du changement climatique est jugé comme faible en comparaison de l'impact de l'évolution des autres déterminants de l'agriculture (Fischer et al., 2005). Cependant, il existe de nombreuses sources d'incertitude : d'abord, les différentes mécanismes régissant la sensibilité de l'agriculture au climat et à ses autres déterminants, ainsi que leur hiérarchie respective du champ à l'échelle mondiale, sont incertains (Fuhrer, 2003; Reidsma et al., 2008). L'estimation de ces impacts à l'échelle globale, en des termes qui permettent l'arbitrage du niveau de mitigation au niveau mondial, est très incertain (Tol, 2009). Enfin, Il existe plusieurs formes d'adaptation à différents niveaux décisionnels (Füssel, 2007; Antle and Capalbo, 2010): l'adaptation autonome, qui décrit des décisions prise de manière individuelle par les agents, est à intégrer dans l'évaluation des impacts du changement climatique par un planificateur qui chercherait à les réduire, via une adaptation dite « planifiée » (i.e. centralisée, par exemple la mise en place d'un système d'assurance contre la variabilité climatique, où l'investissement dans la recherche). Les impacts du changement climatique sur le secteur agricole, ainsi que son adaptation, font donc apparaitre le même défi scientifique, associé à l'intégration de la complexité des systèmes, autant pour des enjeux prospectifs à l'échelle mondiale que d'aide à la décision publique régionale.

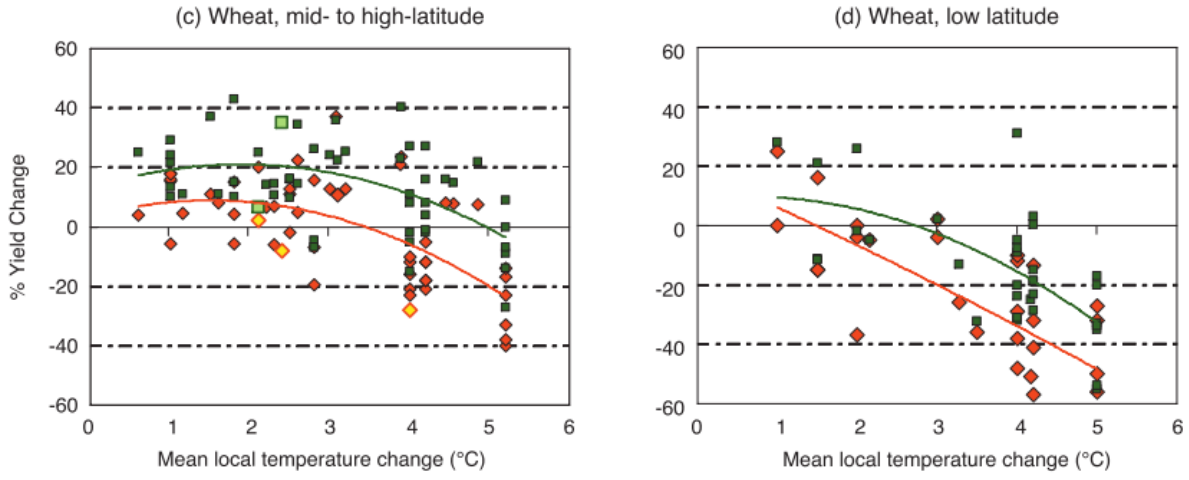


Figure 1.6 - Projections d'impacts du changement climatique sur le rendement du blé, séparé par zone climatique. La figure illustre l'ensemble des résultats utilisés dans le 4ème rapport de l'IPCC concernant l'évolution relative du rendement du blé dans pour différentes ampleurs du changement climatique. Les panneaux (c) et (d) séparent respectivement les régions tempérées des régions tropicales, et les couleurs verte et orange séparent respectivement les cas où l'on considère ou non une adaptation. *Figure extraite de* (Easterling et al., 2007).

1.3.3. Complexité du système et interaction d'échelles

Il existe plusieurs sources d'incertitude sur l'évolution du système climatique, ses impacts sur le secteur agricole, et la contribution du secteur agricole à la réduction de son ampleur. L'IPCC fournit un cadre méthodologique pour projeter ces enjeux futurs (figure 1.7), qui va nous permettre d'illustrer les sources d'incertitude. La *première étape* est l'évaluation de l'évolution des causes de perturbation anthropique du système climatique, c'est-à-dire l'évolution des sociétés humaines en termes de démographie, de création de richesse, de progrès technologiques, de régime commerciaux et de mesures de protection de l'environnement. Comme évoqué précédemment, des scénarios englobent un large spectre d'évolutions possibles, et permettent de générer des trajectoires de perturbation du système climatique, et donc de contraindre son évolution. Les principaux traits de ces scénarios décrivent les principaux déterminants historiques de l'agriculture : la demande en production agricole, les progrès technologiques, l'intensité des échanges commerciaux, et les mesures de protection de l'environnement. Les projections de demande en production agricole diffèrent mais diagnostiquent toutes une augmentation, conséquente à l'augmentation de la population mondiale, dont le régime alimentaire s'oriente vers des produits à haut contenu carboné. Pour le reste des déterminants, le signe et l'ampleur des évolutions sont peu consensuelles à des horizons de plus de quelques dizaines d'années. Il faut noter que si ces scénarios se caractérisent par différents niveaux d'émissions en GES, ils ne prennent pas en compte de manière explicite la mitigation.

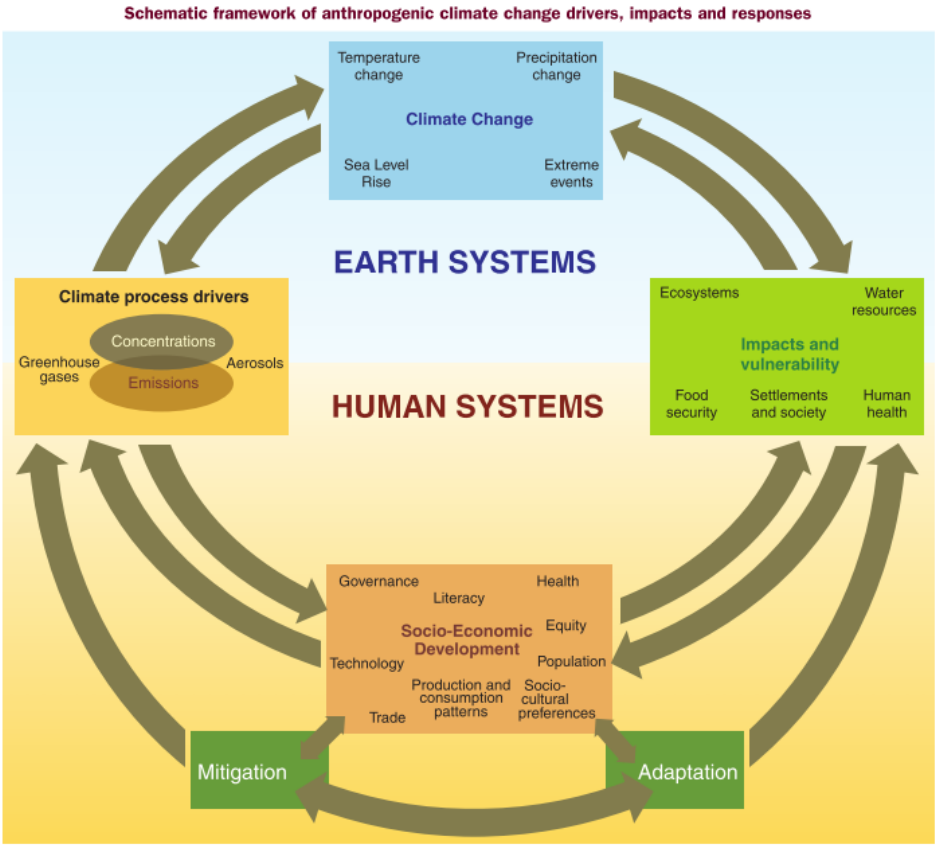


Figure 1.7 - Schéma résumant les enjeux futurs associés au changement climatique. Les 4 rectangles représentent respectivement les évolutions des sociétés humaines (marron, bas), les perturbations associées pour le système climatique (orange, gauche), l'évolution conséquente du système climatique (bleu, haut), et son impact pour les sociétés humaines (vert, droite). *Figure extraite de* (Barker, 2007).

La *deuxième étape* est l'estimation du changement climatique en fonction de ces scénarios. Pour le secteur agricole, de nombreuses variables climatiques sont importantes (rayonnement solaire incident, précipitation, température, humidité de l'air, vent, composition atmosphérique en dioxyde de carbone et ozone), ainsi que la caractérisation de leur évolution aux échelles de temps journalières, saisonnières et interannuelles. Pour un scénario d'émission donné, ces projections sont caractérisées par une large incertitude, liée à la nature du système climatique, à la connaissance partielle que nous en avons, et à la limite actuelle des moyens de projection de son évolution. Cette incertitude est différenciée entre variables atmosphériques, et augmente avec la résolution spatiale et temporelle considérée. De plus, les impacts de la composante « changement d'usage des sols » de la perturbation sur le système climatique ne sont aujourd'hui considérés que par leur composante biogéochimique (bilan GES). La composante biophysique n'a pas encore été évaluée dans les travaux de l'IPCC, alors qu'elle représente une forte source de variabilité spatiale à l'échelle locale.

La *troisième étape* est l'évaluation, pour un scénario d'évolution du climat, de ses impacts sur le secteur agricole. Cette étape est aussi limitée par la connaissance que nous avons du lien entre climat et agriculture. Comme décrit dans la section 1.2 (chapitre 1), le poids relatif du climat dans l'agriculture est très variable spatialement, et intiment lié à d'autres déterminants de l'activité agricole. Les mécanismes en jeu sont nombreux de l'échelle de la parcelle agricole à celle du commerce international, tandis que leur poids relatifs est spatialement très variable. D'une part, tous ces mécanismes ne sont pas encore bien maitrisés (DaMatta et al., 2010; Jaggard et al., 2010), et d'autre part nous n'avons encore d'outil qui les intègre tous de manière satisfaisante. De plus, il faut tenir compte de l'évolution des déterminants non climatiques de l'activité agricole. Enfin, l'effet en termes de réduction des impacts négatifs (ou d'amplification des impacts positifs) des adaptations potentielles d'une part, et la projection du niveau d'adaptation effectif est encore très mal cerné (Easterling et al., 2007).

Une *dernière étape* importante est l'estimation des rétroactions potentielles de l'adaptation des sociétés humaines sur le système climatique. Pour le secteur agricole, il s'agit de déterminer l'impact net sur le système climatique de l'évolution de l'agriculture après impact, adaptation et mitigation (bilans biophysiques et biogéochimiques nets). Cette dernière étape est sujette à une très forte incertitude, et peu étudiée.

L'ensemble des mécanismes nécessaires pour projeter dans le futur les interactions entre climat et agriculture s'étalent sur de larges échelles spatiales et temporelles (voir figure 1.8), avec de fortes interactions entre échelles. Les enjeux scientifiques associés à la problématique des interactions entre climat et agriculture reposent en partie sur la difficulté de traiter l'ensemble des mécanismes concernés, et les *interactions d'échelles* entre ces mécanismes (Dalgaard et al., 2003; Ewert et al., 2011). Plus précisément, les différents niveaux décisionnels, de la plus petite échelle spatiale (exploitation agricole) à la plus grande (négociations internationales), sont tous impliqués dans l'évolution de l'ensemble du système, et reliées à travers de nombreux mécanismes à de nombreuses échelles (et donc

interdépendants). Cette caractéristique rapproche le système étudié d'un *système complexe*, c'est-à-dire caractérisé d'une part par beaucoup de mécanismes interagissant à plusieurs échelles spatiales ou temporelles, et d'autre part par une forte hétérogénéité dans les déterminants environnementaux de ces interactions. D'un point de vue de l'étude du système, un enjeu scientifique fort est alors la détermination du bon niveau de complexité à intégrer pour être capable de projeter l'évolution du système. Il s'agit plus précisément de déterminer le choix de l'entité de base à modéliser, des niveaux hiérarchiques d'organisation, des mécanismes d'interactions et enfin de la caractérisation des facteurs environnementaux indispensables.

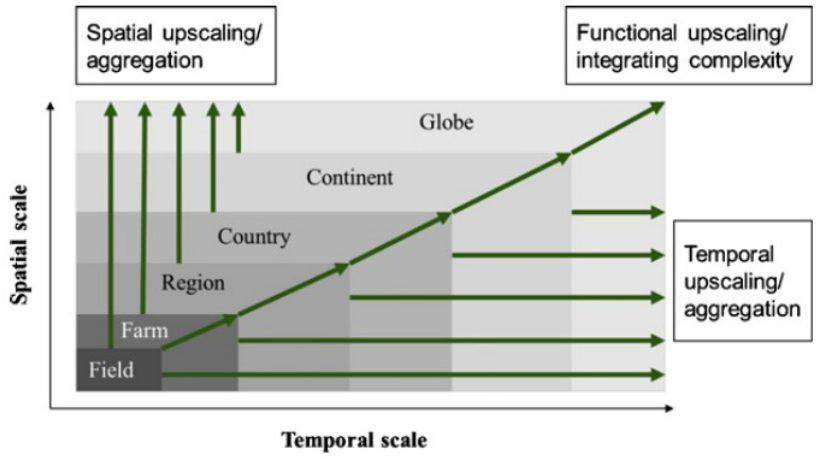


Figure 1.8 - Interaction d'échelle, complexité et intégration. Etendue des échelles spatiales et temporelles qui couvrent l'ensemble des mécanismes intervenant dans l'interaction entre agriculture et climat. L'interaction entre ces mécanismes rend le système étudié *complexe*, et il faut trouver des moyens d'intégrer les interactions entre échelles. *Figure extraite de* (Ewert et al., 2011).

1.3.4. Une définition de l'échelle régionale

A travers les sections précédentes, nous avons pour l'instant mis en avant 3 échelles spatiales :

- L'échelle mondiale, à laquelle le système climatique et les sociétés humaines forment un système fermé, et complexe. Cette échelle est d'une part intégratrice de tous les mécanismes en jeu (de l'échelle de la parcelle à l'échelle du commerce des produits agricoles). D'autre part, d'un point de vue décisionnel, c'est l'échelle pertinente pour arbitrer de l'ampleur du changement climatique.

- L'échelle des systèmes de production agricole, délimitant la plus petite unité décisionnelle du secteur agricole (les producteurs). Cette échelle, où s'exprime toute la variabilité des différents déterminants du système agriculture-climat est souvent, la cible de politique publique.

- L'échelle où sont arbitrées les décisions relatives à la politique publique, autant relatives aux négociations internationales sur le climat, qu'aux objectifs et moyens de la mitigation, et de l'adaptation au changement climatique. C'est une échelle caractéristique qui sépare, en économie autant qu'en sciences physiques, les outils dédiés à l'étude de processus de grande échelle de ceux dédiés à des processus de petite échelle dans les questions relatives au changement climatique.

C'est cette dernière échelle que *nous considérerons dans cette thèse comme l'échelle régionale*. En termes de délimitation géographique, elle correspond à un espace comprenant une diversité de conditions physiques (climat, topographie, sol) et biologiques (structures de couverture des sols), ayant jusqu'à la taille d'un continent. De la même manière, en termes économique, cette échelle comprend une diversité d'agents, distribués sur cet espace géographique, et différenciés en termes de conditions socio-économiques. Enfin, cette échelle correspond en termes institutionnels, à une institution commune qui a un rôle décisionnel concernant les questions relevant de la politique publique, et relatives au changement climatique, ainsi qu'à un certain nombre de questions relatives à l'organisation des sociétés humaines (un Etat, ou d'un regroupement d'Etats).

Cette échelle spatiale ne permet pas de considérer ce système comme fermé, puisqu'elle est inférieure en dimension spatiale à celle qui englobe tous les mécanismes et niveaux décisionnels. Cette thèse n'a pas pour objectif d'intégrer l'ensemble des mécanismes nécessaires à la description du système, ni d'en faire des projections d'ordre prospectif.

J'ai au contraire choisi dans cette thèse d'*explorer* cet enjeu d'intégration en évaluant l'effet de l'intégration des effets de mécanismes relatifs à des petites échelles spatiales (les systèmes de production agricole) et temporelles (échelle annuelle) sur la formulation des enjeux décisionnels relatifs à l'interaction entre climat et agriculture à une autre échelle décisionnelle : l'échelle régionale Européenne.

1.4. Enjeux scientifiques de l'échelle Européenne

Dans cette partie, je dresserai un état des lieux de l'agriculture Européenne : ses principales caractéristiques, son impact sur le climat, son contexte institutionnel, et le rôle du climat comme déterminant de la production agricole Européenne. Ensuite, j'examinerai les apports des études à différentes échelles sur les projections de l'agriculture Européenne sous changement climatique.

1.4.1. Etat des lieux de l'agriculture Européenne

Dans le cadre de cette thèse, nous avons considéré l'ancienne Union Européenne à 15 membres (UE-15, voir figure 1.9). Cet espace géographique comprend 15 Etats Membres, ayant pour institution commune l'Union Européenne, à laquelle se décide une grande partie des politiques dédiées à l'environnement, l'agriculture, et au changement climatique.

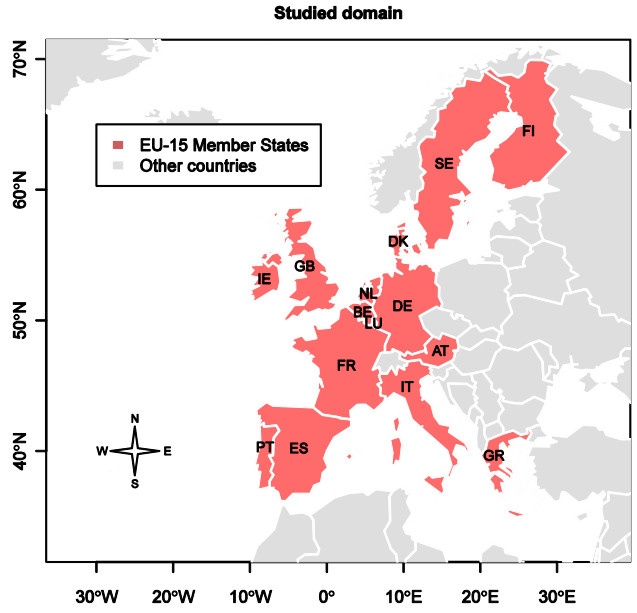


Figure 1.9 - Zone d'étude considérée, l'Union Européenne à 15 (UE-15). Cette zone comprend 15 Etats Membres (Finlande FI, Suède SE, Danemark DK, Grande-Bretagne GB, Irlande IE, Pays-Bas BL, Belgique BE, Luxembourg LU, Espagne ES, Portugal PT, Allemagne DE, Autriche AT, Italie IT et Grèce GR).

L'agriculture représentait environ la moitié de la surface totale en 1998 (54% selon (Olesen and Bindi, 2002)). 53% de cette fraction est occupée par des terres arables, 40% par des prairies, et 7% par des friches et forêts. En termes économique, l'agriculture représente une faible part des emplois et du produit intérieur brut de l'EU-15 (moins de 6% de l'emploi, environ 2% du produit intérieur brut), alors qu'elle est la plus grande contributrice à la production mondiale agricole (10% de la production mondiale de céréales, et 16% de la production mondiale de viande, selon (Olesen and Bindi, 2002).

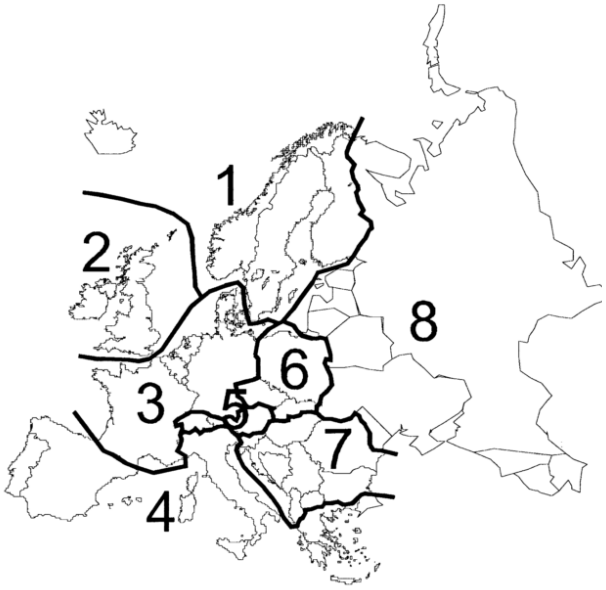


Figure 1.10 - Grandes typologie des zones de production agricole à l'échelle Européenne. Les différentes zones de 1 à 8 correspondent à des typologies de conditions climatiques et de systèmes de production différentes en termes de taille d'exploitation, et d'orientation de production, selon (Olesen and Bindi, 2002). L'EU-15 comprend les zones suivantes : Zone « Nordique » (1), Zone « Iles Britanniques » (2), zone « Ouest » (3), Zone « Méditerranéenne » (4), et zone « Alpine » (5).

L'espace géographique de l'EU-15 est cependant très *hétérogène* en termes d'environnement physique, et de systèmes de production agricole. (Olesen and Bindi, 2002) divise l'EU-15 en 5 grandes zones, qui correspondent à différentes typologies de conditions climatiques et de systèmes de production agricole (figure 1.10):

- La zone 1 (« Nordique ») est caractérisée par de fortes contraintes physiques à la production agricole (sol et climat). L'activité agricole occupe une faible part des surfaces (6%), et se compose à 89% de terres arables.

- La zone 2 (« Iles Britanniques ») se caractérise par des conditions climatiques humides, sous influence océanique. L'activité agricole y occupe 70% de la surface, et se compose aux deux tiers de prairies.

- La zone 3 (« Ouest ») correspond aux systèmes de production les plus intensifs, où la contrainte physique est faible. Les systèmes agricoles occupent 52% de la surface, se composent aux deux tiers de terres arables, et sont très hétérogènes en terme de taille d'exploitation et d'orientation de production.

- La zone 4 (« Méditerranéenne ») se caractérise par le climat le plus sec et le plus chaud de l'EU-15. L'agriculture occupe 56% de la surface, et est constituée de systèmes de production très diversifiés, une grande partie étant spécialisée en grandes cultures et cultures fruitières.

- La zone 5 (« Alpine »), l'activité agricole est fortement contrainte par la topographie. L'activité agricole occupe 40% de la surface, et se compose en partie d'agriculture intensive mais aussi de formes plus traditionnelles d'agriculture extensive.

L'agriculture Européenne a connu une très forte transformation depuis la Seconde Guerre Mondiale, et la productivité a fortement augmenté, suite à une forte mécanisation du travail, une forte sélection des espèces végétales et animales, et une forte hausse de l'application de fertilisants et de produits phytosanitaires. A l'inverse, la part de l'agriculture dans l'emploi et le nombre d'exploitations ont fortement chuté. Cependant, si la majorité des systèmes de production agricole correspondent aujourd'hui à une forme d'agriculture intensive (i.e. une forte mécanisation, et une forte productivité du travail et de la terre), il subsiste encore dans les zones 4 et 5 des formes d'agriculture extensive plus traditionnelles. Si la part de l'agriculture dans le PIB national reste inférieure à 5% dans tous les Etats Membres, elle peut représenter une part importante de l'emploi : jusqu'à 30% pour la Grèce, et plus de 10% pour le Portugal et l'Autriche (données Eurostat 2006).

L'agriculture de l'EU-15 est aussi l'objet de forte intervention institutionnelle, conçue à l'échelle Européenne depuis la Seconde Guerre Mondiale, à travers la Politique Agricole Commune (PAC, initiée par le traité de Rome en 1957). Depuis sa création, la PAC représente le premier poste de dépenses de l'Union Européenne (entre 35% et 45% du budget annuel). Les objectifs initiaux de la PAC (premier « pilier ») étaient d'assurer en Europe l'autonomie alimentaire, une libre circulation des produits (marché unique), et une stabilité des marchés agricoles (prix garantis). Le soutien à la production représente aujourd'hui environ un quart de la marge brute des exploitations. D'une part, les modalités d'intervention de ce pilier ont évolué (évolutions des prix garantis vers une aide directe forfaitaire), et d'autre part le budget de la PAC est en partie redirigé vers un second « pilier », centré sur des problématiques de développement rural et de protection de l'environnement. Ainsi, d'une part les aides financières se sont en partie redirigées vers les collectivités locales, et d'autre part les aides aux exploitants sont de plus en plus conditionnés au respect de pratiques identifiées comme bénéfiques à l'environnement. Parallèlement, un nombre croissant de politiques Européennes dédiées à la protection de l'environnement impactent directement les systèmes de production agricoles (Directives Cadres sur l'Eau, Directive Nitrate, etc.).

D'un point de vue *biogéochimique*, l'agriculture de l'EU-15 émettait en 2004 environ 399 $MtCO_2eq$ (millions de tonnes, mesurées en équivalents-CO_2) de gaz à effet de serre, principalement sous la forme de méthane (43%) et de protoxyde d'azote (56%). Ces émissions représentent environ 1% des émissions globales de GES, 10% des émissions Européennes[2], et un peu moins de 10% des émissions agricoles mondiales. La contribution nette de l'agriculture aux émissions liées aux changements d'usage des sols est positive (source de GES), mais faible. Le bilan net des émissions dues aux changements d'usage des sols (auquel contribue l'agriculture, mais aussi tous les autres usages des sols, dont la forêt) est négatif (puits de GES). A l'échelle de l'Europe, les impacts *biophysiques* actuels et futurs de l'évolution de la couverture des sols et de l'intensité de la gestion des surfaces agricoles ne sont pas quantifiés.

[2] Selon les données de la CCNUCC, et du 4ème rapport d'évaluation de l'IPCC.

1.4.2. Projections futures et approches régionales

Une partie des études dédiées à l'impact du changement climatique sur l'agriculture Européenne couvre l'ensemble du domaine considéré dans cette thèse (Fischer et al., 2005; van Meijl et al., 2006). Reposant le couplage de modèles d'équilibre partiels ou généraux avec des modèles biophysiques de large échelle, ils ont l'avantage de pouvoir modéliser de façon endogène l'évolution des principaux processus de cette échelle: progrès technologiques, évolution de la demande en produits agricoles, de leur prix, de l'évolution de l'usage des sols agricoles (extension et intensification), ainsi que des effets du changement climatique sur le rendement des grands types de production agricole. Le résultat de ce type de projection semble converger vers un faible effet du changement climatique sur l'agriculture Européenne (à l'horizon 2050), relativement à l'impact de l'évolution des progrès technologiques, de la demande en produits agricoles, et des politiques relatives à la protection du marché intérieur Européen, et à la protection de l'environnement. Cependant, ces projections montrent une grande dispersion dans les résultats (Busch, 2006) en termes d'évolution des principales caractéristiques du secteur agricole Européen (rendement, surface agricole, principales production Européennes), pour un scénario donné d'évolution des sociétés humaines. La figure 1.11 en donne un exemple illustratif : l'évolution agrégée Européenne des terres en culture projetée entre 1990 et 2050 ne montre pas d'évolution qui soit cohérente, puisque les différents modèles (lignes et numéros) donnent des réponses dispersées pour chaque scénario d'évolution des sociétés humaines et du climat (cadrans).

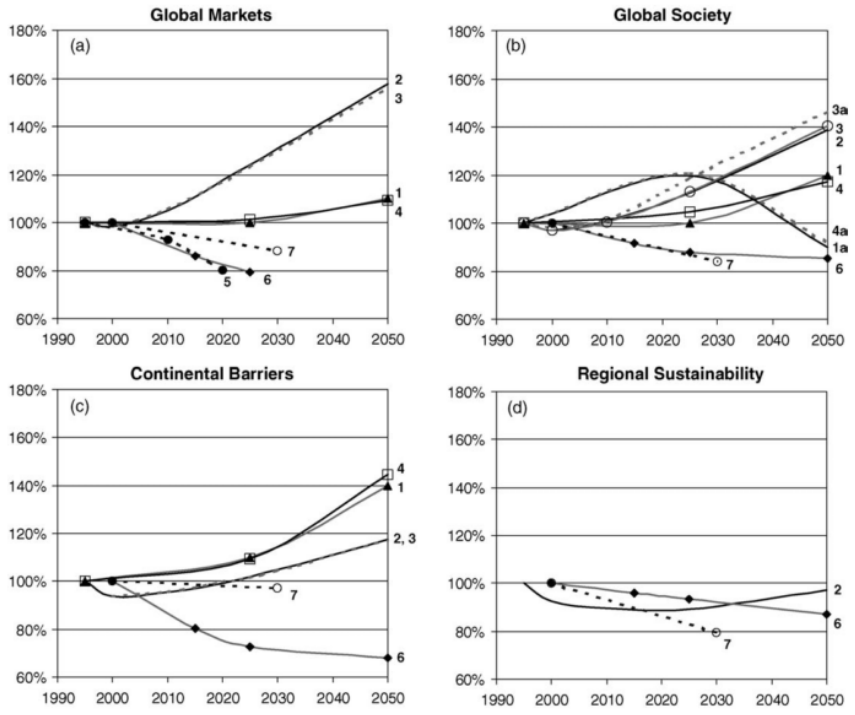


Figure 1.11 - Dispersion des projections de l'évolution de la part de surface des terres en culture. La figure montre l'évolution des terres en culture (cropland) à l'échelle Européenne. Les 4 graphiques séparent 4 types de scénarios de développement humain (les équivalents SRES des figures (a), (b), (c), et (d) sont respectivement les scénarios A1, B1, A2, et B2). Pour chaque graphique, les différentes études sont indiquées par des symboles et des traits différents. *Figure extraite de* (Busch, 2006).

L'incertitude montrée dans la figure 1.11 est fondamentalement lié à la complexité du système : ces études se basent sur des modèles de large échelle, qui représentent de manière simplifiée les mécanismes impliqués dans la réponse du rendement au changement climatique, de son lien avec la production, et l'évolution des systèmes de production. L'analyse de nombreuses études (Easterling et al., 2007) dédiées à des mécanismes, zones géographiques, ou systèmes de production particuliers permettent d'en comprendre les raisons :

- d'une part, les mécanismes permettant de comprendre l'évolution du rendement des espèces végétales agricole sous l'impact du changement climatique à l'échelle du champ sont nombreux et encore incertains (Fuhrer, 2003; DaMatta et al., 2010). En particulier, d'une part les mécanismes gouvernant la réponse du système sol-plante aux différentes variables atmosphériques sont encore mal cernés, et d'autre part leur effet net, et leur interaction avec les pratiques culturales est mal comprise.

- d'autre part, la prise en compte de la structure socio-économique (orientation de production, taille économique) des systèmes de production est un facteur clé dans l'explication de l'hétérogénéité spatiale de leur sensibilité à l'environnement physique (Reidsma et al., 2007). De même, l'évolution de cette structure des systèmes de production est difficile à modéliser sur de grandes échelles spatiales (Henseler et al., 2009), parce que d'une part les mécanismes sont mal compris, et d'autre part leur modélisation nécessite une quantité conséquente de données.

Ce constat pose la question de la nécessité de nouvelles approches de modélisation, à une échelle spatiale régionale, où les interactions entre acteurs (producteurs, institutions), ainsi que l'hétérogénéité spatiale des systèmes de production et de leur environnement physique jouent un rôle clé (Parker et al., 2003; Verburg, 2006). Il existe un certain nombre d'études exploratrices en ce sens qui couvrent le domaine spatial considéré (Ewert et al., 2005; Rounsevell et al., 2005; Audsley et al., 2006; Hermans et al., 2010). Elles ont généralement utilisé des projections régionalisées des déterminants de l'agriculture relatifs aux mécanismes de grande échelle (évolution de la demande en produits agricoles ou de leur prix, prise en compte des progrès technologiques) (Abildtrup et al., 2006; van Vuuren et al., 2007). Elles ont aussi intégré des projections à haute résolution de l'impact du changement climatique, via des simulations de rendement (Audsley et al., 2006), ou des projections statistiques (Metzger et al., 2008). Ces études exploratoires ont fournit les premières évaluations spatialisées à l'échelle de l'Europe des effets de la compétition interrégionale à l'intérieur de l'Europe (Rounsevell et al., 2005; Hermans et al., 2010), ou de l'organisation de l'activité agricole à l'échelle de la ferme (Audsley et al., 2006) sur l'évolution de l'agriculture en termes d'intensité et de couverture des sols. Elles semblent s'accorder sur le fait que l'évolution de l'agriculture Européenne sera plutôt déterminée par des mécanismes de large échelle (évolution de la demande en produits agricoles, régimes commerciaux, progrès technologiques) que par l'évolution du climat.

Cependant, le lien entre l'évolution de l'environnement physique et l'activité agricole, tel qu'il y a été abordé, reste limité. Sa prise en compte repose soit sur des modèles statistiques (Metzger and Bunce, 2005), soit sur des modèles de culture (Audsley et al., 2006). Dans le premier cas, des déterminants importants ne sont pas pris en compte, tels que la distribution des sols et l'hétérogénéité des systèmes de production en termes socio-économique, et les

adaptations à l'échelle de la ferme (pratiques agricoles, substitutions entre cultures). Dans le deuxième cas, les projections sont effectuées pour des représentations simplifiées de la diversité des espèces agricoles d'une part (considérations d'un nombre limité de « types de cultures »), et du fonctionnement du système sol-plante-pratiques agricoles d'autre part (pas de temps mensuel, représentation simplifiée des pratiques agricoles et du sol). Ce type de simplification biaise significativement les évolutions estimées, et reste donc inadéquate (Challinor et al., 2009; van Bussel et al., 2011). De plus, les effets de l'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 ont été pris en compte de manière simplifiée, par une multiplication du rendement potentiel. Cet effet stylisé prend en compte l'effet de fertilisation associée à l'augmentation de la concentration en CO_2, mais pas l'effet sur l'efficience d'utilisation de l'eau. Enfin, la typologie des systèmes de production n'est pas du tout prise en compte dans le premier cas, et est un diagnostic a posteriori dans le deuxième cas.

La compréhension des enjeux associés à la mise en place d'une politique de mitigation n'a encore que très peu progressé dans cette intégration des mécanismes en jeu à l'échelle régionale Européenne. (Leip et al., 2008) a développé un outil de modélisation couplant un outil de modélisation économique du secteur agricole (CAPRI) avec un modèle de culture (DNDC) et qui permet d'évaluer l'impact de politiques relatives au secteur agricole différents indicateurs environnementaux (dont les émissions de GES) liés à l'agriculture, en prenant en compte de manière fine l'hétérogénéité des conditions physiques (sol, climat) et techniques (pratiques agricoles). Cependant, CAPRI ne comprend pas de représentation détaillée de l'hétérogénéité spatiale des systèmes de production agricole à un niveau inférieur aux régions administratives (NUTS II). A l'inverse, (De Cara et al., 2005) estime l'effet de l'hétérogénéité des systèmes de production agricole sur l'aspect coût-efficacité de différentes politiques de mitigations sur le secteur agricole, mais l'outil de modélisation ne prend pas en compte l'hétérogénéité de l'environnement physique sur les émissions de GES. Enfin, l'impact de l'agriculture sur le climat en termes biophysiques n'a pas encore été évalué à l'échelle régionale.

L'identification du « bon » niveau intégration dans la compréhension des interactions entre climat et agriculture à l'échelle régionale est donc limitée, dans le sens où le niveau atteint n'a pas permis de réconcilier observations de terrain et hypothèses de modélisation retenue pour explorer les enjeux de décision publique à l'échelle régionale (mitigation, impact et adaptation).

1.5. Objectif et plan de la thèse

Dans le cadre de cette thèse, j'ai choisi d'évaluer dans le cadre Européen l'effet d'une meilleure intégration de mécanismes de « petite échelle » sur la formulation des enjeux de décision publique à l'échelle régionale Européenne. Les *mécanismes* étudiés sont ceux caractéristiques de l'organisation de court terme (échelle temporelle d'une campagne agricole) de l'activité de production agricole à l'échelle des « systèmes » de production agricoles (définis par une homogénéité d'environnement physique et socio-économique). Les *enjeux de décision publique considérés* sont l'évaluation des impacts du changement climatique et des adaptations autonomes d'une part, au choix de l'outil de politique publique en vue de la mise en place d'une politique de mitigation dans le secteur agricole Européen.

Les questions sont les suivantes :

- Quelle est le rôle de ces mécanismes dans l'impact du changement climatique sur l'offre agricole Européenne ?

- Quel est leur rôle dans la réponse de l'agriculture Européenne à la mise en place d'une politique de mitigation ?

- Ces mécanismes génèrent-ils une interaction à l'échelle Européenne entre adaptation au changement climatique et mitigation ?

Les deux principaux enjeux techniques sont d'une part de modéliser ces mécanismes de manière intégrée à l'échelle Européenne, et d'autre part de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des facteurs environnementaux auxquels ils sont sensibles.

Je me focaliserai d'abord sur le développement d'un outil de modélisation qui répond à ces enjeux techniques (chapitre 2). L'outil de modélisation a fait l'objet d'une évaluation, valorisée sous la forme d'un article soumis à une revue scientifique à comité de lecture (chapitre 3).

Je me sers ensuite de cet outil pour quantifier le rôle de l'adaptation de court terme à l'échelle de la ferme sur les impacts du changement climatique à l'échelle Européenne. Ce chapitre est aussi valorisé sous la forme d'un article soumis dans une revue à comité de lecture (chapitre 4). Dans le chapitre 5, je présente des outils d'analyse statistique de l'hétérogénéité de l'impact simulé du changement climatique sur l'offre agricole Européenne.

Dans le chapitre 6, je présente des résultats d'une série de simulations réalisées avec notre outil de modélisation, permettant de diagnostiquer les interactions potentielles entre l'adaptation de court terme de l'offre agricole au changement climatique, et la mise en place d'une politique de mitigation des émissions agricoles Européenne.

Enfin, je dégage l'intérêt, les limites et les perspectives de ce travail de thèse dans le chapitre 7.

Chapitre 2
Outil de modelisation et jeux de données

Dans le cadre de cette thèse, j'ai cherché à explorer les effets de l'hétérogénéité spatiale des systèmes de production agricole, ainsi que de leur environnement physique, technique et socio-économique sur le lien entre l'agriculture et le système climatique à l'échelle du continent Européen. La nature et l'étendue géographique de ce questionnement est peu propice à l'expérimentation, et le travail effectué repose sur la modélisation.

Le traitement par la modélisation de cette hétérogénéité spatiale requiert la prise en compte et l'articulation de nombreux mécanismes, ainsi que d'un grand nombre de données qui décrivent les facteurs de variabilité. Une méthodologie relative à l'articulation des mécanismes en jeu, ainsi que les jeux de données associés, ont été établies lors d'un travail de thèse précédent (Godard, 2005) à l'échelle d'une région française dans le cadre du climat présent. Des premiers essais d'application ont été conduits dans le cadre du climat futur, à cette même échelle et à l'échelle nationale Française (Godard, 2005; Galko, 2007).

J'ai d'une part étendu cette méthodologie à l'échelle Européenne, et d'autre part construit des jeux de données physiques et techniques appropriés à la prise en compte d'une évolution future du climat à cette échelle. De plus, j'ai élargi cette méthodologie pour intégrer une forme d'adaptation technique des systèmes de production agricole, relative à cette modification de l'environnement physique.

L'outil de modélisation utilisé, ainsi que les modifications que j'y ai apporté sont l'objet de ce chapitre. Dans une première partie, je détaille l'outil de modélisation et sa pertinence pour cette thèse, puis dans une deuxième partie je détaille les modifications apportées et les jeux de données associés.

2.1. Description et pertinence de l'outil de modélisation

L'outil de modélisation que j'ai utilisé pendant me thèse est un modèle intégré (ARTiX) qui couple le modèle micro-économique statique annuel d'offre agricole Européenne AROPAj (De Cara et al., 2005; Galko and Jayet, 2011) avec le modèle générique de culture (STICS). L'objectif de cet outil est l'étude de la réaction de court terme de l'offre agricole européenne à l'évolution de ses déterminants physiques, techniques, économiques et institutionnels. La version que j'ai utilisée couvre l'Union Européenne à 15 (EU15). Sa résolution spatiale est la région administrative du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA), de taille équivalente aux régions administratives NUTS II définies par l'Union Européenne.

Le modèle simule l'*offre agricole*, c'est les volumes de production de différents biens agricole, les intrants consommés, les impacts environnementaux et l'organisation des systèmes de production. Pour ce faire, le modèle s'appuie sur une typologie figée de producteurs agricoles (ou systèmes de production), qui n'ont pas d'influence sur les prix (la demande est exogène au modèle), et dont le comportement est simulé. Ce comportement consiste à choisir l'organisation de l'activité de production, détaillée en plusieurs activités animales et végétales, afin de maximiser la marge brute. Parmi les critères qui participent à définir ce comportement, des variables d'entrée permettent de leur prescrire un environnement physique (cartes de variables météorologiques et de description des sols), technique (pratiques agricoles), socio-économique (prix d'achat des intrants et de vente des productions agricoles, coûts variables) et institutionnel (instruments prix - taxes, subventions -, et quantité - quotas, normes - associées à la Politique Agricole Commune et ses déclinaisons nationales, et aux politiques de régulation environnementale).

Je détaillerai chacun des deux modèles qui composent cet outil, avant d'expliquer le principe et la mise en place technique de leur couplage. Enfin, je détaillerai comment est prise en compte l'hétérogénéité spatiale de l'offre agricole et de ses déterminants, entre régions RICA mais aussi à l'intérieur de ces régions.

2.1.1. Un modèle d'offre agricole Européenne (AROPAj)

Le modèle micro-économique AROPAj simule le comportement annuel d'une distribution d'agents producteurs indépendants, basée sur les données du Réseau d'Information Comptable Agricole. Celui-ci fournit une base de données d'enquête détaillant à un niveau assez fin les données comptable annuelles d'un ensemble d'exploitation agricoles, sélectionnées pour prendre en compte de manière statistiquement représentative la diversité des exploitations réelles en termes d'orientation de production (8 grandes catégories, 70 sous-catégories) et de taille économique (6 classes) à l'échelle d'une région.

Pour définir la distribution des agents à l'échelle régionale dans le modèle AROPAj, certaines catégories d'orientation de production correspondant aux cultures pérennes ou pluriannuelles (arboriculture, viniculture) et à l'horticulture sont d'abord exclues, pour le caractère pluriannuel de leur gestion. Ensuite, les exploitations de la base de données sont regroupées par classification hiérarchique (sur des critères de taille économique et d'orientation

de production) en « ferme-types » virtuelles, assurant ainsi le respect de la clause de confidentialité sur l'utilisation des données RICA. La méthode aboutit pour chaque région à un nombre variable d'agents ou « ferme-types ». La version que j'ai utilisé dans ma thèse repose sur les données RICA 2002, et comprend 101 régions et 1074 agents indépendants pour l'UE15 (voir figure 2.1).

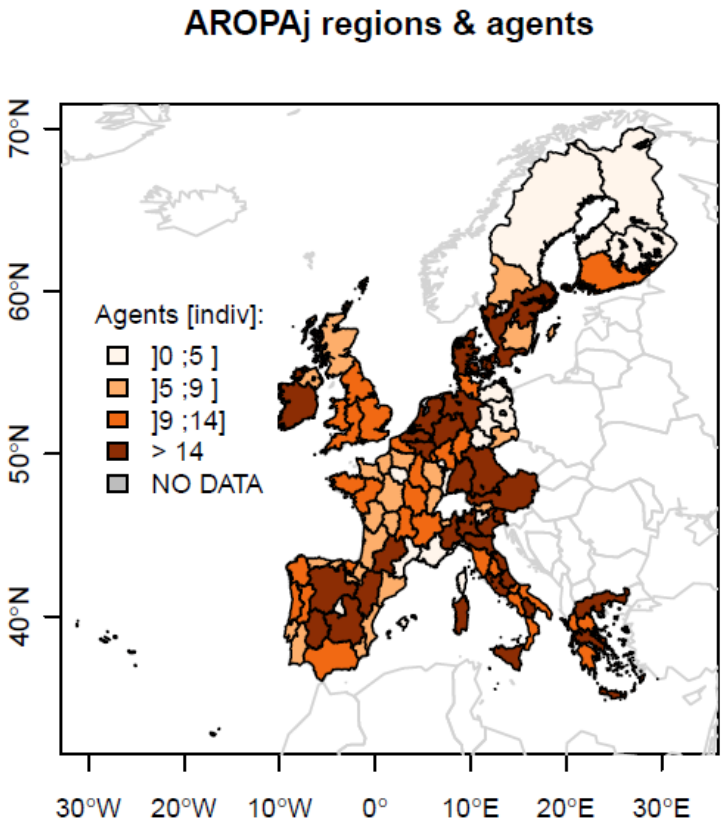


Figure 2.1 - Régions et nombre d'agent par région dans AROPAj (version UE15). Avec 1074 agents répartis sur 101 régions, le modèle représente un peu moins de 2 millions d'exploitants réels à plein temps, pour une surface totale de 90 millions d'hectares. Le nombre moyen d'agent par région est de 10.6. Un agent représente en moyenne 1770 exploitations réelles et 81000 hectares.

L'offre agricole, résultant du comportement des agents producteurs, est simulé à l'aide de la programmation mathématique. Chaque agent organise son activité en vue de maximiser son profit, indépendamment des autres. Formellement, le comportement un agent *k* d'AROPAj est décrit par le programme mathématique linéaire mixte (P_k) suivant :

$$(\boldsymbol{P_k}) \begin{cases} \max_{x_k} [\pi_k (x_k) = g_k \cdot x_k] \\ \textit{subject to} \begin{cases} A_k \cdot x_k \leq z_k \\ \forall\, i, x_{k,i} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad [1]$$

où π_k est la marge brute, x_k et z_k représentent respectivement les vecteurs des variables d'activité et des ressources, alors que A_k et g_k représente respectivement la matrice des contraintes techniques et l'opérateur de marge brute.

Les activités d'un agent sont détaillées en 31 activités animales et 41 activités végétales, et le comportement des producteurs est définit par les variables de décision suivantes :

- l'allocation de la surface agricole aux différentes activités,
- l'ajustement du capital animal,
- le niveau et la nature des intrants des productions animales et végétales (fertilisants, alimentation animale),
- le niveau de production de chaque activité,
- le choix de mise en vente de la production ou de son utilisation sur la ferme comme intrant.

Un ensemble de contraintes techniques et de paramètres, propres à chaque agent, vont permettre de définir les possibilités d'organisation à l'échelle de l'exploitation, et de différencier les agents. Ils décrivent :

- les liens entre les intrants, les productions ainsi que les interactions entre les différentes activités (contraintes agronomiques pour l'assolement des cultures, épandage des déjections animales, coûts variables etc.),
- les ressources à disposition (cheptel animal et sa démographie, surface agricole utile totale, etc.),
- les contraintes de typologie (les activités et leurs parts admissibles dans la marge brute et la surface agricole utile),
- les marchés (prix des intrants et des productions),
- les instruments de politique publique (normes, taxes et subventions de la Politique Agricole Commune et ses déclinaisons nationales, ainsi que les régulations environnementales)

La majorité des paramètres techniques propres à chaque agent (jusqu' à 1200) du modèle sont estimés directement à partir des données RICA et des avis d'experts. Certains sont ensuite re-calibrés (environ 130 paramètres, principalement des paramètres liés aux contraintes de rotation agronomique, d'alimentation animale, et les coûts variables), pour une méthode mixte de gradients conjugués et de Monte-Carlo. Plus d'explications sur les contraintes techniques et la calibration peuvent être trouvés dans (De Cara et al., 2005) et (Galko and Jayet, 2011).

AROPAj appartient à la catégorie des modèles d'offre statiques (van der Werf and Peterson, 2009), reliant les intrants aux productions par des contraintes techniques particulièrement détaillées. Ce type de modèle ne représente pas de manière endogène l'équilibre offre-demande des facteurs de production, des intrants et des produits agricoles avec les autres régions du monde dans le secteur agricole (cas des modèles d' équilibre partiel, par exemple FASOM (Adams et al., 1996), ou ou CAPRI[3]), ni avec les autres secteurs économiques

[3] Common Agricultural Policy Regionalized Impact Modeling System, see http://www.capri-model.org/dokuwiki/doku.php

(modèles d'équilibre général, par exemple GTAP (Hertel, 1997)). AROPAj est donc peu approprié à l'étude de mécanismes de large échelle importants pour l'interaction entre climat agriculture, comme le commerce ou l'évolution de la demande, bien qu'il puisse les prendre en compte de manière exogène. De même, il est important de souligner qu'AROPAj est un modèle à caractère statique à l'échelle annuelle, et ne prend pas en compte de manière explicite les facteurs de production que sont le travail, le capital matériel (bâtiments, machines) et financier (liquidités). A l'inverse d'autre modèles (par exemple AgriPoliS, (Happe et al., 2006)), il ne représente donc pas les possibles évolutions structurelles de long terme (surface agricole totale, orientation de production, revenus hors exploitation, effectif) de l'offre agricole Européenne.

Pour le questionnement de cette thèse, AROPAJ est cependant très intéressant, car il couvre l'Europe entière, tout en représentant finement les liens complexes entre activités agricoles, leur lien avec l'environnement physique, et la diversité des systèmes agricoles à l'échelle infrarégionale. A cet égard, ses performances sont équivalentes à des modèles plus détaillés (mais de couverture géographique restreinte). En revanche, il est moins bien approprié pour intégrer des processus économiques de plus large échelle (évolution de la demande, commerce) et de long à moyen terme (progrès technologique, évolution structurelle de l'offre agricole Européenne).

2.1.2. La sensibilité à l'environnement physique et technique (STICS)

La sensibilité de l'offre agricole à son environnement physique et technique n'est pas incluse dans AROPAj. Afin de pouvoir prendre en compte une évolution de cet environnement, un couplage a été réalisé avec un modèle biophysique[4]. Ce couplage relève d'une procédure relativement classique en soit à l'échelle de la ferme - voir (Janssen and van Ittersum, 2007) pour une revue de littérature détaillée - mais rarement étendue à l'échelle Européenne. Je vais détailler rapidement le modèle biophysique, et son intérêt pour un tel couplage.

STICS est un modèle générique de culture qui simule aux échelles annuelle et pluriannuelle l'évolution d'une succession de cultures sur une parcelle agricole (Brisson et al., 2003). Il simule ainsi au pas de temps journalier l'évolution du système sol-plante d'une parcelle sous l'influence de l'intervention humaine (les pratiques agricoles) et du contexte environnemental (sol, météorologie) de manière assez fine. Il s'appuie notamment sur les processus de développement du couvert végétal, sa croissance en biomasse, sa croissance racinaire, l'élaboration du rendement, ainsi que des bilans d'eau, de carbone et d'azote à l'interface entre l'atmosphère, le sol et la plante. Ces processus sont basés en partie sur des formalisations de processus physiques et biologiques bien établis (bilans d'eau, d'énergie, de carbone et d'azote dans le sol et à l'interface sol-végétation atmosphère, photosynthèse), et en partie sur des relations empiriques (durée et nature des stades physiologiques de la plante, allocation et remplissage des différents organes de la plante, effets des températures et du contenu en eau du sol sur le développement du couvert végétal). La version du modèle que

[4] Conformément à l'usage dans la littérature économique, on appelle ici modèle biophysique un outil de modélisation de l'environnement physique et biologique des systèmes de production. Ce qualificatif est à différencier de la distinction entre processus biophysiques et biogéochimiques, pour la communauté de la modélisation de la biosphère terrestre dans le système climatique.

j'utilise est basée sur la version 5, avec quelques modifications spécifiques (concernant principalement la spécification de l'apport d'azote à des stades particuliers de la plante). Une description détaillée du fonctionnement du modèle peut être trouvée dans (Brisson et al., 2008).

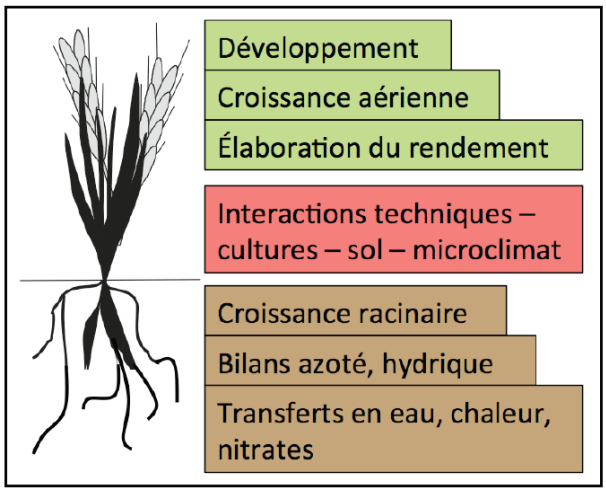


Figure 2.2 - Processus et compartiments du système sol-plante représentés dans STICS. *Schéma basé sur (Brisson et al., 2008) et issu du rapport de stage de M2 de Marie Combe, avec sa permission.*

Le premier intérêt de ce modèle pour un couplage avec AROPAj est son caractère générique, associé à la diversité des diagnostiques simulés à l'échelle de la parcelle, qui permettent à la fois de prendre en compte les principales cultures Européennes, et de caractériser leurs diverses propriétés. A travers différents mécanismes et jeux de paramètres adaptés, STICS peut représenter une assez large gamme d'espèces et variétés cultivées, ce qui l'avantage par rapport à d'autres modèles équivalents, comme par ceux de la famille CERES (Jones and Kiniry, 1986). Je l'ai utilisé pour les principales cultures européennes dans le cadre de cette thèse : blé dur, blé tendre, orge, maïs, colza, tournesol, soja, pomme de terre, et betterave sucrière. Sont notamment simulés la quantité et la qualité (par exemple le contenu en azote) du rendement de ces espèces, et leurs impacts environnementaux : les pertes azotées sous formes gazeuses (vers l'atmosphère, protoxyde d'azote et ammoniac) et solubles (vers le sol profond, nitrates), et le bilan d'eau (notamment les volumes irrigué, infiltré vers le sol profond, ruisselé, et évapotranspiré par le système sol-plante).

Le deuxième avantage de STICS, est qu'il prend en compte de manière très détaillée les principaux déterminants physiques et techniques de ces diagnostiques, ce qui permet de prendre en compte finement leur hétérogénéité spatiale :

- Le modèle prend par exemple en compte les effets associés au type de sol : profondeur totale et distribution en plusieurs horizons de taille, texture, acidité, perméabilité et contenu initiaux en eau et en matière organique différentes. Les processus décrivent la dynamique du contenu en eau du sol discrétisés en horizons de 1 cm, en intégrant la fraction disponible des précipitations pour le sol (interception par le couvert végétal et pertes latérales), puis les flux verticaux entre horizons (microporosité, perméabilité et infiltration vers les nappes). Ils décrivent aussi la dynamique de la matière contenue dans les différents horizons sous formes

minérales et organiques, via la minéralisation de la matière organique, les transformations chimiques des espèces minérales (nitrification, dénitrification), et leurs flux verticaux (absorption par la plante, flux verticaux d'eau, perte par infiltration). C'est par exemple un avantage par rapport à d'autres méthodes, qui excluent ce déterminant des rendements (Metzger and Bunce, 2005).

- Il intègre de manière très détaillée l'effet des variables météorologiques (valeur moyenne et amplitude de la température atmosphérique, ainsi que les valeurs journalières du rayonnement solaire, de humidité de l'air, des précipitations, et du vent) et de la concentration en dioxyde de carbone sur l'ensemble des processus du modèle. Ainsi le développement et la croissance de la biomasse aérienne et du front racinaire dépendent journalièrement du rayonnement solaire intercepté par le couvert végétal et absorbé par le sol (rayonnement direct et diffus), de la température aérienne et du sol (respiration autotrophe et hétérotrophe, calendrier des stades écophysiologiques, optimum de photosynthèse). La concentration en dioxyde de carbone à un effet sur la croissance en biomasse (via un mécanisme de photosynthèse C3 ou C4, et l'ouverture stomatique) et aussi sur l'efficience d'utilisation de l'eau (unité de biomasse produite par unité d'eau transpirée). L'humidité de l'air et le vent affectent la transpiration, et de manière plus générale les flux de chaleur latente et sensible. De même la dynamique de l'azote et de l'eau dans le sol dépendant des apports d'eau (précipitation) et des pertes (assimilation de l'azote et transpiration d'eau par la plante, évaporation du sol). Enfin, le nombre d'organe récoltés dépend de la vitesse d'accumulation de biomasse (et donc du rayonnement, de la température et du contenu en eau du sol) sur les quelques jours avant le début du remplissage. Le remplissage et la qualité des organes (contenus en carbone, eau, azote, sucre) dépendent des valeurs journalières de toutes les variables météorologiques pendant jusqu'à la fin de la maturation ou la récolte. D'autres approches utilisant des modèles plus simples fonctionnant au pas de temps mensuel, ne prennent pas en compte ces effets (Audsley et al., 2006).
- Il prend en compte l'effet du choix d'un itinéraire technique (c'est-à-dire la combinaison de plusieurs *techniques culturales*) sur le système sol-plante : la gestion du cycle cultural (date de semis et de récolte, précocité des variétés utilisées), la densité du couvert (densité de semis et pertes dues au gel ou à l'humidité du sol avant levée, évolution de l'indice foliaire), le travail du sol (labour, apport de résidus de cultures), la fertilisation (apport et fractionnement de différents types d'engrais minéraux commerciaux ou organiques issus de déjections animales), l'irrigation (volume et fractionnement), et la décision de récolte (à un stade écophysiologique particulier, ou pour un seuil donné de contenu en eau, carbone, azote ou sucre des organes récoltés). Enfin, il prend en compte les choix de succession de culture, en intégrant l'effet d'un précédent cultural sur l'état du sol au démarrage de la culture d'intérêt, tout en contraignant le positionnement de son cycle cultural (le démarrage du cycle cultural de la culture d'intérêt est contraint à minima par la récolte du précédent).

Il faut cependant noter que STICS ne prend pas en compte tous les facteurs qui déterminent le rendement, notamment les facteurs de réduction du rendement (adventices, maladies, ravageurs et pollution atmosphérique, voir figure 2.3). Il simule donc un rendement *limité*, supérieur au rendement *réel* mais inférieur au rendement *potentiel*, pour reprendre la terminologie de (van Ittersum et al., 2003).

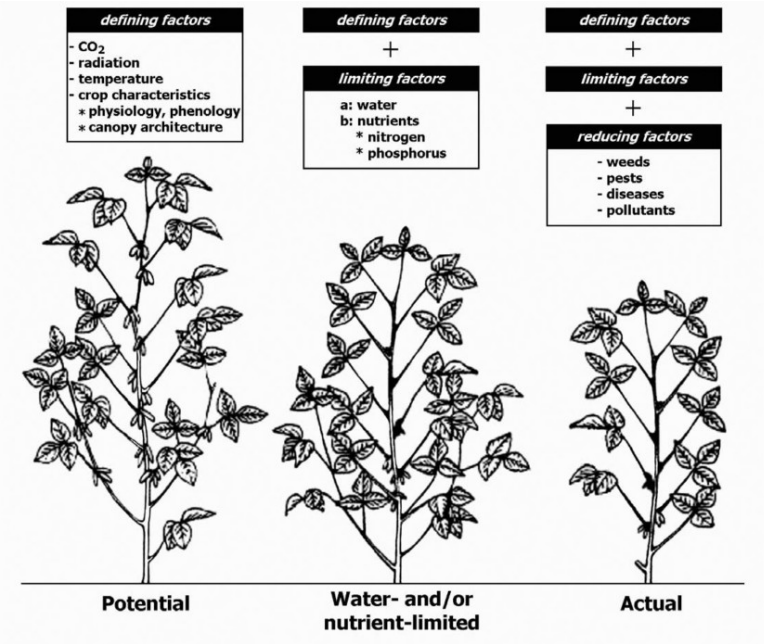


Figure 2.3 - Schéma conceptuel des facteurs déterminants le rendement. Du rendement potentiel au rendement limité, puis au rendement réel. *Extrait de (van Ittersum et al., 2003).*

Enfin, ce modèle a été conçu pour des régimes climatiques typiques de la France actuelle. Si celle-ci concentre une grande partie des régimes climatiques Européens actuels, ce n'est pas forcément le cas des régimes climatiques futurs. Comme on l'a détaillé auparavant, STICS est cependant assez fin dans sa prise en compte des effets des variables météorologiques, du pas de temps journalier aux effets annuels. Les réponses de STICS au changement climatique ont été récemment testées dans un projet sur les impacts du changement climatique sur les principales espèces cultivées en France (Brisson et al., 2010). Il a d'une part été comparé à d'autres modèles de culture, et d'autre part a été testé sur plusieurs sites français et pour plusieurs jeux de données de changement climatique et de pratiques agricoles, ce qui permet de tester aussi l'effet des principaux facteurs d'incertitude sur la réponse au changement climatique (le climat de référence, le sol, les pratiques agricoles, les scénarios de perturbation du climat, les modèles utilisés pour le faire évoluer et les méthodes utilisées pour le régionaliser). D'une part les principaux processus agronomiques modélisés ont montré des réponses cohérentes entre eux et avec les connaissances actuelles, et d'autre part l'impact du choix du modèle sur l'hétérogénéité spatiale des résultats et leur incertitude à moins de poids que la variabilité des facteurs physiques et techniques du système sol-plante.

2.1.3. Objet, méthode et implémentation du couplage

L'objectif du couplage entre les 2 modèles est de rendre dépendant à leur environnement physique (climat, sol) et technique (itinéraire technique) les variables de rendement et les impacts environnementaux des principales cultures Européennes dans le modèle d'offre agricole. Il s'agit de plus d'intégrer la variabilité spatiale de ces facteurs à l'échelle régionale. La méthodologie choisie est celle développée lors de travaux de thèse antécédents, et décrite dans les détails dans (Godard et al., 2008). Le principe est de générer une « fonction de production » $Y_{C,k}(N)$ reliant le rendement (Y) à l'intrant azoté (N), pour chacune des cultures C de l'agent k faisant partie des principales cultures Européennes identifiées (couple « culture-agent »). Cette procédure se déroule en 3 étapes (voir figure 2.4).

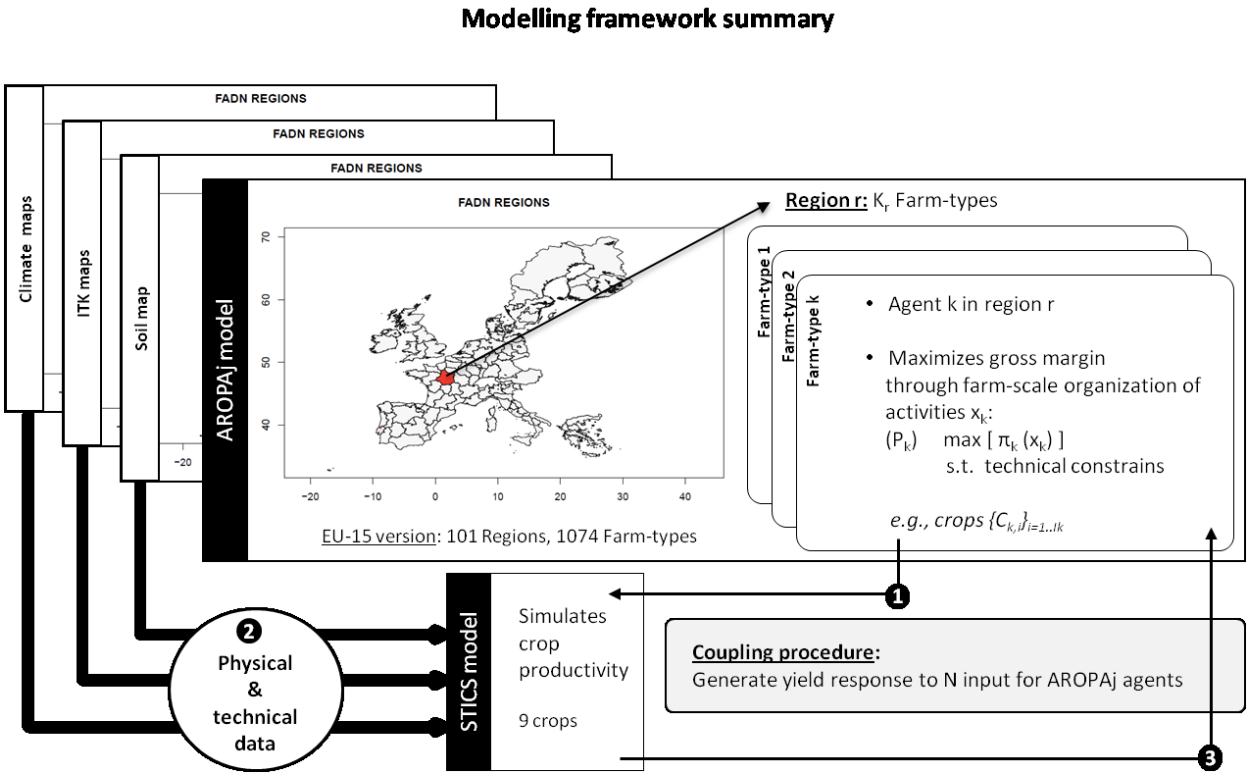


Figure 2.4 - Schéma résumant la procédure de couplage entre STICS et AROPAj. L'objectif principal est de rendre des systèmes de production hétérogènes dépendant de leur environnement physique et technique. La structure d'AROPAj permet de déterminer l'hétérogénéité des systèmes de production, par une distribution spatiale de couples « culture-agent » (étape 1). On détermine l'environnement physique et technique de ces couples, et on simule pour chaque couple le rendement et sa sensibilité au niveau de fertilisation (étape 2). Cette réponse est ensuite interpolée en une forme fonctionnelle utilisable par AROPAj (étape 3).

Dans une première étape, on définit une distribution hétérogène de systèmes de production, c'est-à-dire les couples « culture-agent » du modèle AROPAj.

Dans une deuxième étape, on définit une *unité de simulation* avec le modèle STICS, qui détermine les entrées physiques (sol, climat) et technique (itinéraire technique) du modèle STICS (voir figure 2.5). Dans cette unité de simulation, deux cycles culturaux sont considérés, le cycle de la culture d'intérêt (que je cherche à simuler) et le cycle du précédent cultural (permettant d'initialiser l'état du sol au démarrage de la culture d'intérêt, et les apports de résidus provenant de la culture précédente). Les composantes de gestion de positionnement et de durée du cycle, de récolte, de fertilisation et d'irrigation sont à définir pour les cycles du précédent cultural et celui de la culture principale. Pour cette dernière, les modalités de fertilisation doivent êtres définies pour toutes les doses d'azote nécessaire à la génération de données d'une fonction de production, avec un fractionnement de l'apport azoté variant en fonction de la dose totale apportée. Les paramètres de description du sol doivent être déterminés, ainsi que les données météorologiques des 3 ans pendant lesquels se déroule l'unité de simulation. On simule ensuite le rendement de la culture d'intérêt pour des doses croissantes d'apport d'azote (de 0 à 600 kgN/ha).

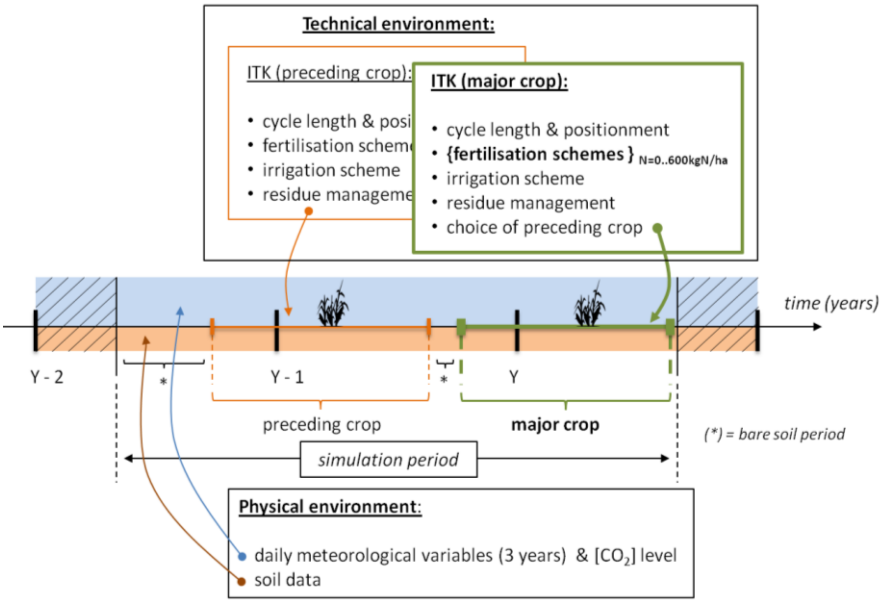


Figure 2 .5 : Définition d'une unité de simulation pour un couple « culture-agent » (i.e. major crop), et entrée physiques (sol, climat) et techniques (ITK) associées du modèle STICS. L'unité de simulation pour une récolte en l'année Y se déroule sur 3 ans (de Y-2 à Y), avec le cycle de la culture précédente puis celle de la culture d'intérêt, entrecoupée de période de sol nu.

Dans une troisième étape, on interpole la réponse simulée du rendement à l'intrant azoté en une forme fonctionnelle, qui sera utilisée par AROPAj. L'intrant azoté étant un facteur de production et le rendement définissant le niveau de production par hectare, cette courbe correspond au concept économique de fonction frontière de production, qui est une représentation classique en économie du lien entre le niveau de production et l'utilisation des facteurs de production associée. Le choix de cette forme fonctionnelle correspond à une cohérence entre la vision de l'agronome, et celle de l'économiste (Godard, 2005).

Il s'agit une forme exponentielle à 3 paramètres (le rendement sans apport d'azote A, le rendement non-limité en azote B, et la sensibilité du rendement à l'apport d'azote τ, voir figure 2.6 (a)), comme suit :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y_{C,k}} : \mathbb{R}^+ &\to \mathbb{R}^+ \\ \boldsymbol{N} &\mapsto \boldsymbol{B_{C,k}} - \left(\boldsymbol{B_{C,k}} - \boldsymbol{A_{C,k}}\right) \cdot \boldsymbol{e^{-\tau_{C,k} \cdot N}} \end{aligned}$$

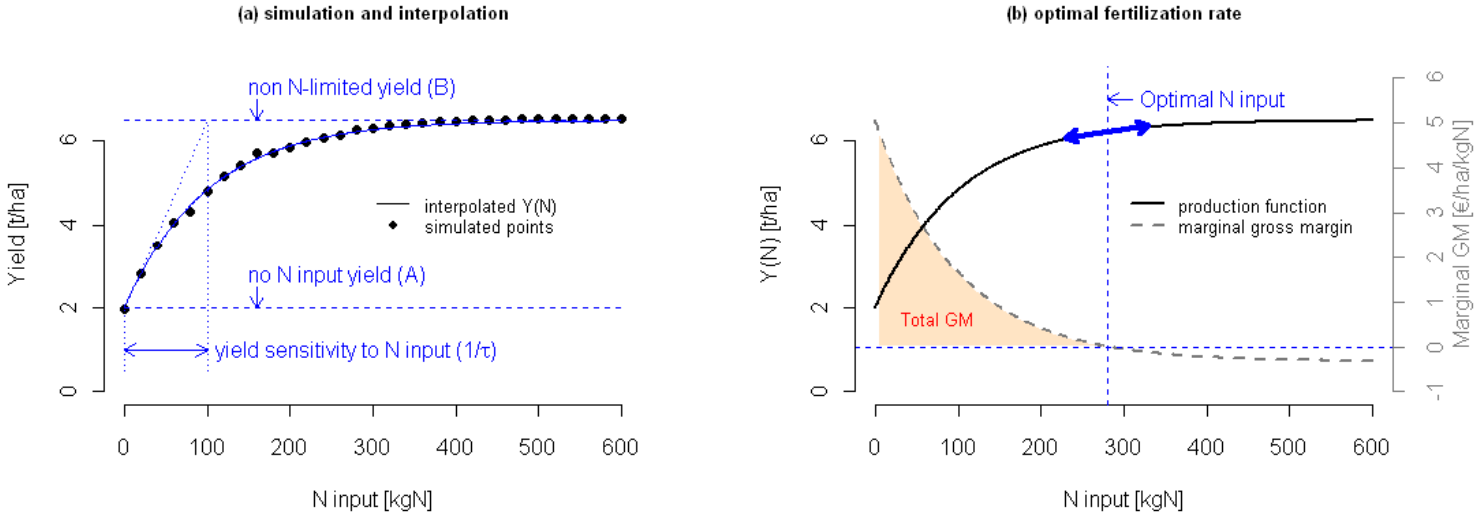


Figure 2.6 - La fonction de production et son utilisation dans AROPAj. (a) Interpolation des simulations STICS en fonction de production $Y_{C,k}(N)$ pour chaque couple « culture-agent » *{C,k}*. (b) détermination du taux de fertilisation optimisant la marge brute (GM), en fonction du rapport des prix d'achat de l'intrant azoté et de vente de la culture. Par définition, il correspond à la dose d'azote qui annule la marge brute marginale (en tirets gris).

Dans le modèle AROPAj, le niveau de fertilisation est choisi de façon à maximiser la marge brute à l'hectare de chaque culture, en fonction des scénarios de prix (voir figure 2.6 (b)). De par la forme fonctionnelle de la fonction, l'apport d'une unité d'azote a un effet positif sur le rendement, mais de moins en moins grand au fur et à mesure que l'on augmente la dose d'azote, ce qui représente une hypothèse réaliste. Tant que le coût d'achat d'une unité d'azote est plus faible que le bénéfice additionnel tiré à la vente de la production, l'agriculteur a intérêt à l'appliquer. A l'inverse, celui-ci perd de l'argent pour chaque unité d'azote supplémentaire dont le coût d'achat est plus grand que le bénéfice additionnel qu'il en tire à la vente. On fait donc l'hypothèse que la dose optimale d'intrant azoté est la dernière unité d'azote pour laquelle son effet sur le profit à l'hectare de la culture est positif. Formellement, cette dose d'azote optimale est la dose pour laquelle la dérivée de la marge brute par rapport à l'intrant azoté (ou *marge brute « marginale »*) à l'hectare vaut zéro, ou encore pour laquelle la dérivée de la fonction de production par rapport à l'apport azoté vaut le rapport du prix d'achat de l'intrant azoté sur celui la de vente de la culture. Graphiquement, cela correspond à la dose

d'azote pour laquelle la pente de la tangente de la fonction de production vaut ce rapport de prix.

Dans la pratique, cette interface entre les modèles AROPAj et STICS est gérée par l'utilisation conjointe d'une base de données PostgreSQL, d'un code Java, et un ensemble de routine en R. La base de données permet de stocker toutes les informations relatives aux agents économiques du modèle d'offre, leurs cultures et les entrées techniques associées, ainsi que le stockage des résultats de simulation STICS. Le code Java permet de faire le lien entre les cas à simuler (couples « culture-agent ») définis par AROPAj, la base de données et le modèle STICS. Il gère notamment toutes les simulations et les fichiers d'entrées et de sorties du modèle STICS, alors que les routines R permettent d'interpoler et de faire divers traitements sur les données de la base.

2.1.4. Hétérogénéité spatiale de l'offre agricole et de son environnement

Bien qu'il existe une version spatialisée à une échelle plus fine d'AROPAj, dans le cadre de cette thèse la résolution spatiale d'ARTiX est la région RICA. L'environnement socio-économique, physique et technique de l'offre agricole peut être spatialement très variable : d'une région à une autre (hétérogénéité interrégionale), mais aussi très souvent à l'intérieur d'une région RICA (hétérogénéité infrarégionale). La finesse des données du RICA et des différents jeux de données de sol, de climat, et de pratique agricoles me permettent de prendre en compte une partie de cette hétérogénéité. Les grandes lignes de cette prise en compte sont schématisées dans la figure 2.7, et résumées dans les deux paragraphes suivants.

D'un point de vue de sa dimension socio-économique, le modèle AROPAj représente par construction une structure régionale de l'offre agricole à travers la définition d'une distribution d'agents économiques, différenciés par taille économique et orientation de production (hétérogénéité infrarégionale). Ils se différencient donc par leurs dotations (surface agricole totale par exemple) et leurs utilisations (liste et interrelations entre différentes activités) des ressources, mais aussi par des coûts variables et des prix de vente différents. Le modèle intègre donc en partie l'hétérogénéité infrarégionale réelle de l'environnement socio-économique, bien que sa représentativité et son réalisme soient limités par les contraintes d'utilisation des données RICA. De même, par construction la structure de l'offre est variable d'une région à l'autre (hétérogénéité interrégionale).

Si les agents d'une région sont aussi différenciés par classe d'altitude, ils ne sont pas localisés plus précisément et le RICA fournit peu de données relatives à l'environnement physique (climat, sol) et technique (pratiques agricoles) des exploitations recensées. Ces données étant des facteurs déterminants du rendement agricole et très variables à l'échelle d'une région RICA, il est nécessaire de prendre en compte cette source d'hétérogénéité infrarégionale. Il me faut donc déterminer pour chacune des couples « culture-agent » un environnement physique et technique réaliste. Les jeux de données à disposition ont une résolution permettant cette attribution d'un environnement physique et technique non uniforme à l'échelle infrarégionale, et donc à fortiori à l'échelle interrégionale.

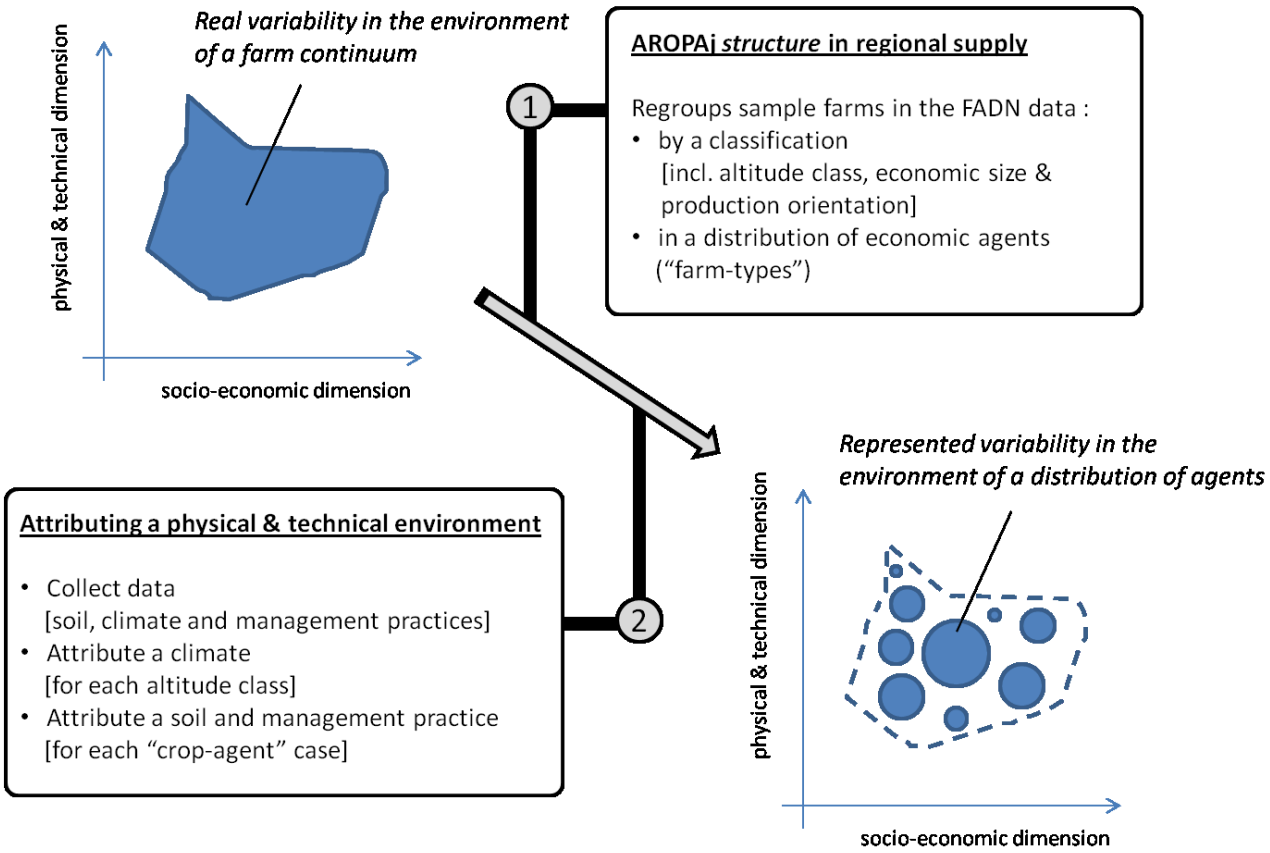


Figure 2.7 - Hétérogénéité spatiale infrarégionale dans ARTiX. Description schématique de la prise en compte de la variabilité structurelle de l'offre agricole à l'intérieur d'une région (1), et de son environnement physique et technique (2). Plus précisément, on cherche à représenter l'hétérogénéité d'un continuum de systèmes de productions à l'échelle régionale, qu'on va discrétiser d'abord dans une dimension socio-économique (orientation de production et taille économique) et de classe d'altitude (1). On attribue ensuite un environnement physique et technique réaliste (2). Les deux étapes reposent sur les observations comptables du RICA, et des données physiques (sol, climat) et techniques (avis d'expert, données du Joint Research Center).

La méthode de couplage définie par (Godard et al., 2008) permet donc d'articuler les mécanismes de réponse de court terme de l'offre agricole à l'évolution de son environnement physique et technique, et ce à une résolution spatiale permettant la prise en compte de la forte hétérogénéité spatiale qui caractérise l'offre agricole, dans ses dimensions socio-économiques, physiques, et techniques. Elle est donc appropriée au questionnement de cette thèse, et je l'ai étendue de l'échelle de la région française à l'échelle de l'EU-15.

Cependant, le domaine spatial que je considère se caractérise par des sources d'informations physiques et techniques observées qui diffèrent par leur nature, leur couverture géographique et leur résolution. De plus, ces dimensions possèdent une cohérence interne, et l'environnement technique et physique sera amené à évoluer de manière conjointe dans le cadre d'un changement de climat.

Dans le chapitre suivant, je présente donc les développements effectués dans le cadre de ma thèse, à savoir:

- étendre de manière cohérente les données d'entrées physiques et techniques à l'échelle de l'EU-15,
- modifier l'outil de modélisation pour articuler l'évolution conjointe de l'environnement physique et technique dans le contexte d'un changement de climat.

2.2. Jeux de données physiques et techniques, et apports de la thèse

2.2.1. Les contraintes pour la détermination de l'environnement physique et technique

Cet environnement concerne les types de variable suivantes:

- des variables atmosphériques: le modèle a besoin des valeurs journalières des températures atmosphériques minimales et maximales, de la pression de vapeur d'eau, de vitesse du vent, du rayonnement solaire incident dans le visible et des précipitations. Il tient aussi compte de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone.
- de variables relatives au sol: les propriétés de surface du sol nu (albédo, pourcentage des précipitations ruisselée, limite de la phase potentielle d'évaporation du sol), la composition du sol de surface (teneur en argile et en calcaire, pH), les propriétés physiques d'un nombre variable d'horizons du sol (épaisseur, teneur et type de cailloux, densité apparente de la terre fine, humidité maximale, humidité minimale exploitable par la plante) et la teneur en azote organique (pourcentage massique jusqu'à la profondeur d'humification, profondeur d'humification).
- des variables d'itinéraire technique, relatif à ses différentes composantes : la gestion du positionnement et de la durée du cycle cultural (date de semis, choix de la variété), les modalités de récolte (seuil teneur en eau limite des organes récoltés déclenchant la récolte et date butoir), l'apports de résidus de la culture précédente (dates, quantité et qualité), les modalités de fertilisation (dates et doses des apports, type d'engrais), et d'irrigation, qui est effectuée de manière automatique (caractère irrigué ou non, seuil de déclenchement, dose maximale journalière).

La première contrainte qui se pose est la cohérence des jeux de données (atmosphère, sol et itinéraires techniques). Chacun de ces types de variable possède en effet sa cohérence interne (par exemple le respect de bilans énergétiques et hydrologiques qui lient les variables météorologiques entre elles), et sont utilisées par STICS dans le cadre d'un respect de celles-ci. Cette contrainte implique que l'ensemble des variables correspondant à un type de donnée particulier, on doit vérifier leur cohérence avec le modèle STICS, et la bonne représentation du lien entre les différentes variables. D'autre part, les différents types de données (sol, climat, itinéraire technique) sont liées l'une à l'autre dans la réalité comme dans le modèle, les itinéraires techniques étant une forme d'adaptation de l'activité agricole à son environnement physique. Les jeux de données doivent donc êtres cohérents entre types de données (problème de cohérence externe).

A titre d'exemple illustratif d'un problème de cohérence externe, si l'on dispose d'un jeu de variables atmosphériques simulé qui surestime la valeur moyenne des températures, le choix des entrées concernant la gestion du cycle de la culture (positionnement et longueur du cycle, via la date de semis et la variété) cache un arbitrage. Si l'on utilise une variété et une date de semis au plus proches de l'observation, on prend le risque de simuler une longueur du cycle

différente de celle observée (celle-ci étant déterminée par un cumul de température). On peut à l'inverse, admettre le choix d'un itinéraire technique moins proche de l'observation, mais dont les conséquences en terme de positionnement et de longueur du cycle par rapport au cycle des températures à disposition est plus cohérent d'un point de vue de l'objet simulé (le rendement). Cette question ne se pose pas quand on dispose de jeux de données qui correspondent parfaitement aux observations, tout en correspondant exactement à la définition des variables d'entrée du modèle. Cependant, pour plusieurs raisons, ce n'est pas notre cas.

D'abord, le domaine géographique considéré (l'UE15) et la résolution spatiale à laquelle j'ai besoin des données (inférieure à la région RICA) rend difficile la construction de jeux de données cohérents. A l'échelle Européenne, Il existe peu de données observées à une telle résolution concernant les itinéraires techniques relatifs aux différentes cultures considérées. S'il existe des jeux de données concernant la distribution des sols, elles ne concernent pas toutes les variables dont j'ai besoin, et il est nécessaire d'utiliser des règles de pédotransfert et des avis d'expert pour les compléter. D'un point de vue des données de climat, il existe des données observées assez précises sur l'ensemble du domaine considéré, mais à une résolution spatiale irrégulière et une couverture temporelle partielle. Elles nécessitent donc un traitement assez lourd, à moins d'utiliser des données de modèle, distribuée plus régulièrement mais généralement moins réalistes que les données observées.

Enfin, je prévoie dans le cadre de cette thèse d'une part d'évaluer la performance du couplage en termes de simulation de l'offre agricole observée, et d'autre part d'évaluer l'impact d'un changement climatique. Ce double objectif introduit des contraintes supplémentaires et différenciées dans la construction des jeux de données. En particulier, les données atmosphériques telles que vues par les modèles de climat (qui permettent de projeter leur évolution) diffèrent par nature du climat observé. Par exemple, en termes de données climatiques, le premier objectif nécessite des jeux données les plus proches possibles des observations pour l'année de référence du modèle AROPAj (2002), tandis que l'autre nécessite un jeu de données qui garde une grande cohérence interne sur les différents scénarios de climat considérés.

2.2.2. Jeux de données climatiques

Dans l'objectif d'évaluer l'effet du couplage sur la performance du modèle à simuler l'offre agricole actuelle, j'ai choisi d'utiliser un jeu de données modélisées étant distribué de manière spatiale régulière, tout en étant contraint fortement par les observations. Il s'agit d'une *réanalyse*, qui résulte d'une simulation à posteriori du temps observé, guidé par les observations. Concrètement, ce genre de donnée est issu d'une simulation d'un modèle météorologique, pour laquelle à chaque pas de temps, les observations servent à contraindre l'évolution de l'atmosphère. Il existe aujourd'hui deux sources de réanalyses : les produits issus de l'ECMWF (produits ERA) ou de la NOAA[5] (produits NCEP/NCAR). J'utiliserai la dernière

[5] European Center for Medium-Range Weather Forecasts (organisation intergouvernementale), et National Oceanic and Atmospheric Administration (agence gouvernementale). Ont entre autre missions la collecte et l'archivage des données météorologiques et l'élaboration régulière de prévision à moyen termes.

version des produits de l'ECMWF (réanalyse ERA-Interim), qui fournissent les variables dont j'ai besoin au pas de temps semi-horaire sur une grille régulière de points d'une résolution longitudinale et méridionale de 0,5° (soit environ 50 km), à partir de l'année 1979 (et disponible aujourd'hui jusqu'en 2011 compris). Du fait de la prise en compte dans les simulations STICS d'un précédent cultural, j'ai extrait l'année 2002 et les 2 années précédentes (2000 et 2001). Il est à noter que ce genre de données présente généralement des biais par rapport à l'observation (Szczypta et al., 2011), qui font l'objet de corrections supplémentaires. Cependant, le produit ERA-Interim était la seule réanalyse à disposition qui aille jusque 2002 inclut, et les corrections ne sont pas encore disponibles à l'échelle Européenne. Ce jeu de données sera dénommé IERA dans le reste de la thèse.

Dans le cas du changement climatique, les données de climat futur proviennent de modèles climat. Ceux-ci fonctionnent généralement à une résolution spatiale assez grossière (de l'ordre de 200 à 300 km), et prennent mal en compte la variabilité réelle du climat à une échelle plus fine. Il existe plusieurs types de méthodes pour améliorer la résolution de ces projections de changement climatique, la plus simple la méthode des anomalies. Celle-ci consiste à additionner à des données plus précises du climat actuel (observations ou réanalyses) la différence en moyenne saisonnière entre climat présent et futur des simulations de modèles de climat. Bien qu'elle ait l'avantage de préserver la cohérence interne des variables météorologiques et leur variabilité spatiale, elle fait une hypothèse très forte de non évolution de la variabilité spatiale et temporelle du climat. Parmi les approches plus réalistes, il y d'une part des méthodes statistiques (par exemple les régimes de temps), et d'autre part des méthodes dynamiques (modèles régionaux de circulation atmosphérique). Les premières se basent sur des relations statistiques entre des variables climatiques de grande échelle et des variables locales de climat, estimées sur des données observées puis utilisées pour générer de la variabilité locale du climat à partir du climat simulé par les modèles de climat (en faisant l'hypothèse que la relation estimée entre échelles reste valide en climat futur). Le deuxième type de méthode se base sur la modélisation de même type que les modèles de climat sur un domaine réduit, forcées au bord par les simulations de modèles de climat. Ils ont une meilleure résolution spatiale et une représentation plus fine des processus à l'origine de la variabilité spatiale du climat (orographie, usage des sols), tout en faisant l'hypothèse que les biais systématiques du modèle de climat sont ainsi corrigés. J'ai privilégié la deuxième méthode, et utilisé des données de changement climatique du modèle régional de climat RCA3 (Samuelsson et al., 2011), forcés par des simulations continues 1950-2100 du modèle ECHAM5 qui fait parti des modèles utilisés pour les projections de l'IPCC (Kjellström et al., 2011).

Cette méthode introduit une contrainte concernant la cohérence des scénarios de climat entre la période de référence et le scénario futur. Les modèles utilisés pour la projection de changement climatique peuvent présenter des biais en termes de climat présent simulé par rapport aux données météorologiques observées. Il est donc essentiel de considérer cette différence de réalisme, et de séparer dans les projections de changement climatique la différence d'une part entre le climat réel et simulé, et d'autre part la différence simulée entre climat présent et futur. En d'autres termes, en cas de projection en climat futur, un jeu de donnée de climat présent simulé par le même modèle doit être utilisé. J'ai donc utilisé comme « climat présent » (CTL) un jeu de données issues de la même simulation que celle utilisée pour

le climat futur (RCA3 forcé par ECHAM5), en extrayant la période de référence 1976-2005. Je pourrai ainsi séparer les effets du changement climatique simulé et du biais de cette source de donnée par rapport au jeu de données précédent (ERA-Interim, années 2000-2002).

Pour le climat futur, on considère 2 jeux de données, correspondants aux 2 trajectoires les plus extrêmes en termes d'émissions de GES disponibles (scénario SRES A2 et B1). En termes de fil narratif d'évolutions des sociétés humaines, ces deux scénarios se caractérisent par des degrés respectivement rapide et raisonné d'utilisation des ressources et de croissance économique. Le deuxième scénario (B1) se différencie par une prise en considération plus intense des problématiques environnementales et un développement économique plus centré sur l'échelle régionale. Après analyse des données issues du modèle RCA3 pour ces deux scénarios à un horizon proche (2021-2050) et lointain (2071-2100), les changements saisonniers de température moyenne et de cumul de précipitation sont bien sur plus intenses à l'horizon lointain, mais aussi plus différencié entre scénarios d'émission. J'ai donc choisi de considérer l'horizon lointain, afin d'obtenir une enveloppe 'haute' du changement climatique, qui soit de plus contrastée entre les deux scénarios. Ces jeux de données seront dénommés A2 et B1, et me permettront faire de la statique comparative entre climat présent et climat futur, à l'aide d'ArTiX.

Comme pour le jeu de données IERA, j'ai extrait 3 années successives des jeux de données climatiques relatifs à l'étude de l'impact du changement climatique. Cependant, par construction, les années calendaires du forçage climatique CTL ne peuvent pas être reliées à la météorologie observée (à l'inverse d'IERA). Pour la période de référence comme pour les scénarios de climat futurs, les trois années successives que l'on extrait doivent plutôt être considérées comme représentatives du climat simulé sur la période temporelle de chaque jeu de données. J'ai utilisé une méthode pour établir cette représentativité. Elle se base sur un algorithme « espérance-maximisation » (voir (McLachlan and Peel, 2000)) : on considère une série de 30 années (décrites chacune par un ensemble de M variables réelles, ou descripteurs), à partir desquelles on estime une densité de probabilité d'occurrence d'une année en M dimensions. On estime ensuite la probabilité d'occurrence de chaque année à partir de la valeur de ses descripteurs, interprétée comme un score de représentativité du climat.

Dans notre cas, il y a 30 années, et le choix des descripteurs est une étape importante pour l'interprétation de la représentativité de chaque année. Le rendement est à la fois sensible aux propriétés saisonnières de température et de précipitation, et à leurs valeurs extrêmes. Cependant je ne m'intéresse pas dans le cadre de cette thèse aux évènements extrêmes et recherche plutôt une année « moyenne ». J'ai donc choisi d'utiliser les cumuls de précipitations et les valeurs moyennes, au pas de temps mensuel. Le choix de la dimension spatiale des descripteurs est aussi important pour la représentativité, et j'ai choisi d'utiliser les moyennes zonales et méridionales afin de capturer les principaux gradients spatiaux sur l'ensemble de l'UE15. La dimension des descripteurs des années de chaque scénario de climat est donc relativement grande, et est réduite par une procédure d'analyse en composante principale individuelle à chaque scénario climatique (on ne garde que les composantes qui permettent d'expliquer cumulativement 95% de la variance). En termes de résultats, cette méthode fait généralement apparaitre 1 ou 2 années vraiment très représentatives de chaque scénario

climatique, parfois précédée d'un groupes d'années consécutives avec un score de représentativité significatif. Le critère de choix pour extraire les 3 années de chaque scénario a donc été en priorité les 3 années permettant au cycle de culture (pour la culture principale) de se dérouler pendant l'année la plus représentative, et ayant le score de représentativité le plus fort pendant le cycle du précédent cultural si le premier critère ne permet pas de discriminer entre 2 groupes de 3 années consécutives.

Une fois le choix de 3 années consécutives effectuées, j'ai attribué un climat à chaque agent du modèle AROPAj, en définissant pour chaque région un climat par classe d'altitude RICA, en 3 étapes (voir figure 2.8). On commence par attribuer une classe d'altitude à chaque pixel de la grille de données climatiques (en fonction de l'altitude moyenne du pixel, à l'aide de données topographiques). Ensuite, on détermine pour chaque région, et par classe d'altitude, le nombre et la part de surface des pixels de la grille de données climatique qui recouvrent les régions. Enfin, on effectue une moyenne des données de climat sur les pixels concernés par chaque région et classe d'altitude, pondérée par la part de surface de chaque pixel inclus dans la région.

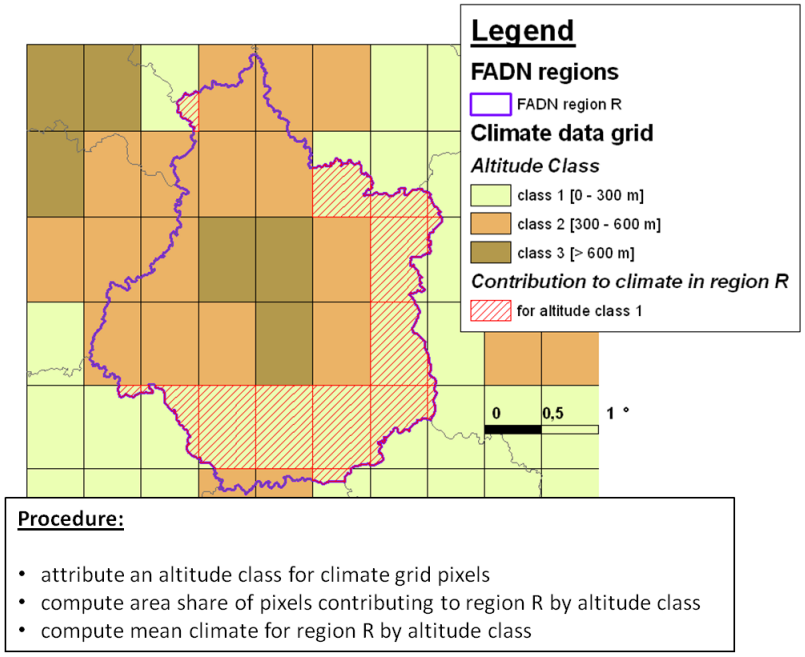


Figure 2.8 - Attribution spatiale des données de climat. Pour chaque région (ici la région R), il y a un climat par classe d'altitude (3 au maximum). Par ce cas de figure, le climat pour la classe d'altitude 1 de la région R est la moyenne du climat de chaque pixel beige en partie hachuré en rouge, pondéré par la part de surface hachurée.

La différence entre les jeux de données IERA et CTL, et de chacun de ces jeux de données pour la performance du modèle à simuler l'offre agricole telle que décrite dans le RICA puis telle que simulée par AROPAj seul sera l'objet du chapitre 3. Une description sommaire des différences entre les données de climat A2 et B1 par rapport au scénario CTL est présenté en annexe X1.

2.2.3. Jeux de données de sol et de pratiques agricoles

Les données de sol que j'ai utilisées dans le cadre de cette thèse reposent sur des travaux précédents (Godard, 2005), dans lesquelles la collecte et la construction des jeux de données ont déjà été réalisées. Je n'ai pas modifié ce jeu de données, à part quelques corrections ponctuelles de valeurs erronées. Je n'en fais ici qu'une brève description, et renvoie à lecture des travaux précédents pour plus d'information. La distribution Européenne des sols provient principalement de la carte Européenne des sols (version 1.0), qui décrit de manière harmonisée au millionième une typologie simplifiée des sols et de leur variabilité spatiale sur l'ensemble du domaine considéré. Cette base de données permet de définir à l'échelle de la RICA une liste des 5 sols les plus présents (en part de surface) sur les terres dont l'usage est identifié comme agricole dans les données d'usage des sols Corine Land Cover pour l'année 2000 (CLC200, version de décembre 2000). Ces 5 sols par région RICA forment une liste de sols probables pour les différents agents d'AROPAj. Les paramètres nécessaires à la description du sol dans STICS sont ensuite déterminés par une méthode de pédo-transfert développée conjointement avec l'Unité Sol de l'INRA d'Orléans, incluant des avis d'expert et des jeux de données additionnels (contenu en carbone organique des sols du Joint Research Center - JRC - de la Commission Européenne, et carte des rapports C/N de la matière organique des sols (Batjes, 2006)). On considère que pour un agent AROPAj donné, les cultures peuvent être présentes individuellement sur un seul sol, alors que deux cultures différentes d'un même agent peuvent êtres présentes sur des sols différents. La procédure d'attribution d'un sol unique à chaque couple « culture-agent » est traité conjointement avec les pratiques agricoles, et sera détaillé plus loin.

Pour chaque culture simulée, je considère une simulation de 3 ans, qui inclut la culture du précédent cultural (cf. figure 2.5). Les principales composantes de l'itinéraire technique dont STICS a besoin sont la gestion du précédent cultural (espèce et entrées techniques), la gestion de la durée et le positionnement du cycle cultural (date de semis et variété utilisée), les modalités de récolte (seuil de contenu en eau des organes récoltés et date butoir de récolte), des apports de résidus de culture (calendrier, quantité et qualité des résidus issus de la culture précédente), de la fertilisation azotée (calendrier, qualité et quantité des apports), et de l'irrigation (caractère irrigué, seuil de stress hydrique déclenchant l'irrigation, volume maximal journalier). Certaines entrées techniques sont décrites d'une manière stylisée qui ne correspond pas à des données directement observables (par exemple le seuil de stress hydrique de la plante déclenchement de l'irrigation) et doivent faire l'objet d'une interprétation qualitative d'observations. De fait, il n'existe quasiment pas de jeux de données harmonisés de ces pratiques agricoles à l'échelle Européenne, à part pour les zones irrigables et les dates de semis par culture. Une partie des paramètres techniques sont donc estimé à dire d'expert, de manière homogène sur l'Europe (seuil de teneur en eau déclenchant la récolte et date butoir, entrées techniques du précédent cultural, densité de semis pour chaque espèce, seuil de stress hydrique déclenchant l'irrigation, fractionnement des apports d'azote pour chaque culture, etc.). Les autres entrées techniques sont estimées de manière spatialisée à partir de jeux de données additionnels et d'avis d'experts : le caractère irrigué ou non d'une culture (basé sur la surface totale irriguée de l'agent déclarée dans le RICA et une règle de priorité d'irrigation entre

cultures), le type d'engrais azoté (données des engrais utilisés FAO et EUROSTAT). Ces jeux de données ont été construit dans un travail de thèse précédent (Godard, 2005), dans lequel on trouvera plus de détail.

Les jeux de données relatives à la gestion de la durée et du positionnement du cycle (dates de semis et les variétés utilisées) ont été reconstruits dans le cadre de cette thèse. Le seul jeu de données spatialisées à l'échelle Européenne disponible concernant les dates de semis est celui du JRC (Willekens et al., 1998), qui contient des estimations de dates de différents stades physiologiques pour différentes cultures, réalisées à partir d'avis d'experts nationaux et des procédures d'interpolation spatiale. Ce jeu de données ne couvre cependant pas toutes les cultures que je considère (par exemple le soja), ni toutes les aires de distribution de ces espèces en Europe. J'ai donc développé une méthode pour générer de nouveaux jeux de dates de semis, qui permet de plus de résoudre le problème de cohérence externe entre date de semis et cycle saisonnier de la température. La méthode est issue de celle utilisée dans le modèle de biosphère continentale LPJmL (Bondeau et al., 2007), et repose sur l'hypothèse que les agriculteurs sèment à une date qui correspond à des seuils particuliers de l'expérience qu'ils ont du cycle saisonnier des températures. Cette méthode est plus amplement décrite dans le chapitre 3. Cette méthode permet de générer des dates de semis qui sont adaptables au forçage de climat, tout en reposant sur des hypothèses réalistes de comportement de l'agriculteur. Elle permet aussi de distribuer spatialement une date de semis sur le domaine considéré, d'une manière cohérente avec les données de climat. Ces deux propriétés permettent de garder une cohérence externe entre jeux de données de climat et itinéraire technique.

Pour le choix des variétés utilisées pour chaque culture (qui diffèrent par leur précocité, et donc par leur durée de cycle), il n'existe pas de jeu de données Européen. De plus, le choix est restreint par les variétés disponibles dans le modèle STICS, certaines cultures ayant seulement de 1 à 2 variétés différentes (betterave, pomme de terre, colza, orges, tournesol, soja). Je l'ai donc considéré comme déterminée (betterave, pomme de terre, colza, orges, tournesol, soja) ou indéterminée parmi 3 variétés possibles parmi les différentes variétés disponibles dans le modèle STICS (cas du blé tendre, blé dur, maïs), en prenant des variétés contrastées en termes de groupe de précocité si plusieurs sont possibles (voir tableau X.2 descriptif des variétés en annexe X2). La variété de chaque couple « culture-agent » est ainsi déterminée dans une procédure plus large d'attribution conjointe de certaines composantes de l'itinéraire technique et du sol, détaillée dans le paragraphe suivant.

Il est difficile d'attribuer un sol et un itinéraire technique à chaque couple « culture-agent » tout en prenant en compte l'hétérogénéité infrarégionale de ces déterminants du rendement, pour deux raisons. D'une part les agents ne sont pas localisés à l'intérieur des régions RICA, et d'autre part les jeux de données à disposition sont limités ou inexistant dans certaines composantes de l'itinéraire technique, et limités dans leur couverture et leur résolution spatiale. J'ai utilisé une méthode développée dans les travaux de thèse précédents (Godard, 2005), pour déterminer de manière conjointe les composantes de l'itinéraire technique indéterminées et le sol propre à chaque couple « culture-agent ». Le principe consiste à considérer plusieurs combinaisons plausibles, pour lesquelles les fonctions de productions sont simulées avec STICS, puis à déterminer à posteriori la plus réaliste, à l'aide des informations

RICA (rendement et prix de vente de la culture observés pour chaque agent) et d'autres sources de données (prix des engrais utilisés par pays, FAO/EUROSTAT).

Les différentes possibilités considérées font varier le sol parmi les 5 plus représentatifs de la surface agricole régionale, et font varier deux composantes de l'itinéraire technique. La gestion du positionnement et de la durée du cycle est déclinée en 3 options différenciées par culture : soit 1 variété et 3 dates de semis possibles (date de semis calculée précédemment ± 3 semaines) ou 3 variétés possibles et une date de semis (comme calculée précédemment), en fonction du nombre de variétés à disposition (voir paragraphe précédent). Le choix du précédent est aussi considéré comme indéterminé, entre un blé d'hiver et une légumineuse de printemps (qui permet de laisser un plus grand contenu en azote dans le sol).

Le choix de l'option combinée {sol, ITK} la plus réaliste est donc à considérer parmi 30 options (5 sols x 3 options de gestion du cycle x 2 précédents). Ce choix se fait en 2 phases, sur les critères suivants:

i. on élimine d'abord les fonctions de production qui ne croisent pas le rendement renseigné dans le RICA, avec une marge de tolérance de 20% (ou 40% pour le maïs et le tournesol) si aucune courbe ne remplit ce critère. On élimine ensuite celles pour lesquelles la dose d'azote qui égalise le rendement au rendement RICA est supérieure à 400 $kgN.ha^{-1}$.
ii. On sélectionne ensuite parmi les options restantes celle pour la dose d'azote qui égalise le rendement avec le rendement RICA est la plus proche de la dose optimale d'intrant (voir figure 2.6), telle que définit par les prix observés d'achat d'intrant azoté et de vente de la production. Graphiquement, cela correspond à la fonction de production dont la pente de la tangente (pour la dose d'azote qui égalise le rendement au rendement RICA) est la plus proche du rapport de prix observés d'achat d'intrant azoté par rapport au prix de vente de la culture.

Cette procédure permet d'attribuer, pour chaque couple « culture-agent » un sol et un itinéraire technique réaliste et cohérent entre eux, ainsi qu'avec le reste de l'environnement physique (climat). L'ensemble de l'environnement physique et technique varie par conséquent en fonction du climat considéré. La différence induite par le choix d'un climat présent réaliste (IERA) pour l'année de référence du modèle AROPAj, ou plus adapté à l'évaluation du changement climatique (CTL) sera traitée dans le chapitre 3.

2.2.4. L'itinéraire technique en climat futur

Le concept d'itinéraire technique traduit l'idée d'une coordination des différentes techniques culturales et de leurs interactions en vue d'un objectif et dans un milieu physique donné. Si la variabilité spatiale importante des itinéraires techniques actuels à l'échelle régionale exprime plus la diversité des objectifs de production à l'échelle de la parcelle et de la distribution des sols, sa plus grande variabilité à l'échelle continentale est marqueur fort des différences des contrastes climatiques à cette échelle (Olesen and Bindi, 2002). Or l'évolution locale du milieu induit par le changement climatique est estimé plus proche des différences

existant aujourd'hui entre grande zones climatiques européennes que de sa variation spatiale à l'échelle infrarégionale (on attend par exemple des variations de plusieurs degrés des moyennes saisonnières de température à différentes saisons). Considérer l'impact d'un changement climatique à itinéraires techniques constants est donc une hypothèse pour le moins forte, surtout dans le cadre de l'étude de l'adaptation de court terme de l'offre agricole à ce changement climatique, ce que je propose de diagnostiquer (chapitre 4).

Pour autant, il est difficile de projeter leur évolution en contexte de changement climatique, d'une part parce que l'effet cumulé des techniques culturales reste encore difficile à appréhender aujourd'hui, et d'autre part parce que les changements climatiques envisagés devraient affecter un grand nombre de processus par lequel s'exprime les interactions entre techniques culturales (DaMatta et al., 2010). Ces points seront particulièrement mis en valeur dans le chapitre 5. Pour inclure l'adaptation des itinéraires techniques dans notre évaluation des impacts du changement climatique, j'ai donc simulé l'évolution des fonctions de production à itinéraire technique constant dans un premier temps, puis sous l'effet d'un ensemble de nouveaux itinéraires techniques, dont avons retenu le plus rentable (en utilisant le critère de maximisation de la marge brute par hectare, section 2.1.3).

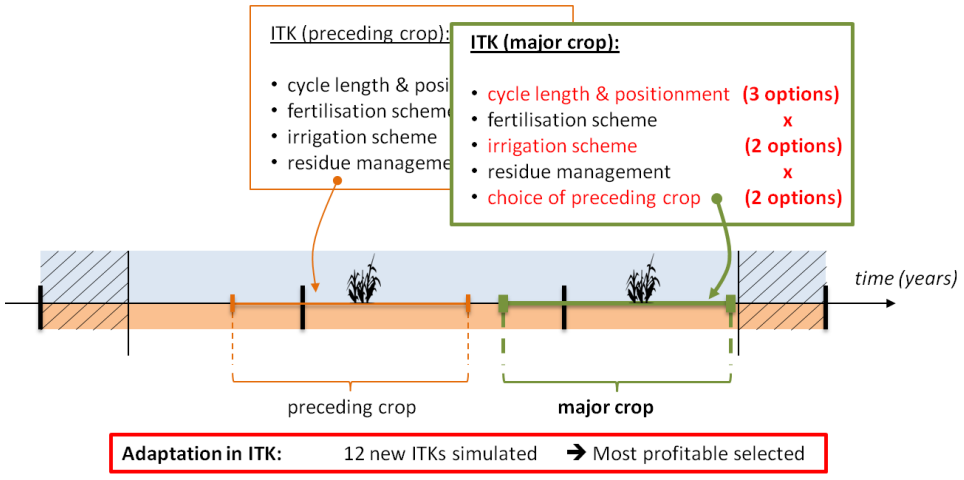


Figure 2.9 - Adaptation des itinéraires techniques. On considère 3 options de gestion du positionnement ou de la durée du cycle, l'adoption possible d'irrigation, et 2 précédents culturaux possibles.

J'ai considéré différents leviers d'adaptation des itinéraires techniques (voir figure 2.9). La gestion de la durée ou du positionnement du cycle (en fonction de la culture) permet de jouer les problèmes potentiels de réduction des cycles végétatifs et reproducteurs des cultures, ou de stress hydrique estival (date de semis du climat présent ± 3 semaines, ou choix parmi les 3 variétés initialement indéterminées en climat présent). Le choix du précédent (une légumineuse de printemps ou un blé d'hiver) permet de jouer sur l'évolution potentielle de l'état hydrique et de la teneur en azote minéral des sols avant démarrage de la culture d'intérêt. Enfin, l'adoption de l'irrigation a été autorisée, permettant de palier à d'éventuelles fortes réductions de l'eau disponible pour la plante.

Cependant, les ressources en eau utilisables pour l'irrigation pourraient fortement évoluer en cas de changement climatique (Falloon and Betts, 2010), et j'ai contraint d'une part l'adoption d'irrigation pour les couples « culture-agent » non irrigués en climat présent et d'autre part la poursuite de l'irrigation en climat futur dans les cas irrigués en climat présent. Cette contrainte est basée sur un bilan hydrologique simple à l'échelle de la parcelle. On considère qu'une contrainte réaliste est le maintien d'un débit minimum dans les rivières, nécessaire aux autres usages anthropiques des réserves d'eau douce de surface et au maintien des fonctions écologiques de ces rivières. A l'échelle de la parcelle, le bilan ce traduit de la manière suivante : les précipitations (P) non directement évapotranspirées (ETR) par le système sol-plante à l'échelle de la parcelle (eau « bleue », P-ETR), auxquelles on retranche le volume d'eau prélevée pour irrigation (V_{irrig}) représentent l'eau qui contribue aux systèmes hydrologiques de surface, et ne doit pas être inférieure à un flux minimum (Q_{min}). L'irrigation n'est donc possible que si le bilan suivant est respecté sur l'ensemble de la période de simulation:

$$[\ P - ETR\ ]_{irrigué} - V_{irrig} - Q_{min} > 0$$

La valeur de Q_{min} est interprétée comme un débit minimum spécifique annuel des rivières (débit minimum annuel d'un bassin versant divisé par sa surface). Le bilan d'eau est intégré sur l'ensemble de la période de simulation, avec une valeur de 95 mm pour Q_{min}, basée sur une valeur de 0,003 $m^3.s^{-1}.km^2$ estimée par (Gustard and Gross, 1989) sur 1350 rivières en Europe. Il faut noter cependant que les problèmes de prélèvement de ressources se posent surtout de manière saisonnière, quand la demande évaporative est la plus grande en période estivale et que le débit des rivières est le plus faible. La contrainte est donc probablement faible par rapport à la réalité, après intégration sur l'ensemble de la simulation. D'autre part la valeur du débit minimum spécifique est estimé pour le Nord-Ouest de l'Europe seulement, et est sans doute très variable spatialement. Cependant, un approfondissement de cette question sort du cadre de la thèse. Je ne prends pas non plus en compte de coûts supplémentaires liés à l'adoption d'irrigation, bien que je n'autorise cette adaptation que s'il n'existe pas d'itinéraire technique non irrigué équivalent en termes de marge brute à 10% près.

De manière plus générale, si je sélectionne le nouvel itinéraire technique le plus rentable parmi ceux testés, je ne prends pas en compte les coûts associés à chaque option. Cette question est partiellement prise en compte en climat présent (via la procédure de sélection d'un couple {sol, ITK} réaliste confrontant les rendements simulés aux rendements observés).

Néanmoins, il existe très peu d'informations disponibles sur ces coûts, et de manière plus générale, cette question de l'adaptation des itinéraires technique est encore très peu étudiée dans le cadre du changement climatique. Les adaptations d'itinéraires techniques que je propose doivent donc plutôt être considérées comme potentielles, plutôt que réalistes.

2.3. Conclusion

Durant ma thèse, j'ai donc utilisé un outil de modélisation innovant, qui permet d'articuler des mécanismes relatifs à la dépendance des systèmes de production agricoles à leur environnement physique. Il est particulièrement adapté à la prise en compte de l'effet sur ce lien de l'hétérogénéité spatiale de l'environnement physique, technique et socio-économique de l'offre agricole Européenne.

A l'origine développé à l'échelle d'une région française, je l'ai étendu à l'échelle Européenne, ce qui a nécessité la génération d'une partie des données physiques (variables atmosphériques), et techniques (les différentes composantes de l'itinéraire technique). Que ce soit dans l'objectif d'une évaluation des performances du modèle dans la simulation de l'offre agricole observée, ou dans la projection d'impact du changement climatique, j'ai pris en compte des contraintes de cohérence dans la génération de ces jeux de données.

Dans le contexte d'une évolution future du climat, j'ai développé des méthodes propres à la prise en compte de l'adaptation des pratiques agricoles. Entre autre, j'ai simulé un ensemble de modifications possibles de l'itinéraire technique concernant le précédent cultural, la gestion de la durée du cycle, et l'irrigation. Pour ce dernier point, j'ai pris en compte de manière stylisée l'évolution possible des ressources disponibles. Enfin, j'ai déterminé l'itinéraire technique adapté comme celui qui optimise la marge brute à l'hectare, en cohérence avec le traitement conjoint des entrées physiques et techniques tel que développé précédemment.

Dans les chapitres suivants, je présente l'évaluation de l'outil de modélisation ainsi développé (chapitre 3), puis son application à l'étude de diverses questions (chapitres 4, 5 et 6).

Chapitre 3
Evaluation de l'outil de modélisation

Dans ce chapitre, nous présentons une évaluation de l'outil de modélisation, avec un double objectif. Il s'agit d'une part d'évaluer la performance du modèle, en termes de réalisme de l'offre agricole Européenne simulée pour une année observée. Pour ce premier objectif, nous utilisons un jeu de données physiques et techniques le plus près possible des observations pour l'année 2002 (IERA), pour simuler l'offre agricole Européenne. Nous comparons ensuite l'offre agricole Européenne ainsi simulée aux données RICA 2002. D'autre part, nous voulons mesurer les déformations induites dans l'offre agricole Européenne simulée, lorsque nous utilisons un jeu de données physiques et techniques adapté à l'évaluation des impacts du changement climatique. Ce nouveau jeu de données est construit à partir de données de climat actuel, tel que vu par les outils de modélisation qui fourniront les données de climat futur (CTL). Ce travail a été finalisé sous la forme d'un article scientifique coécrit avec mes encadrants de thèse, et soumit au journal *Agricultural Systems*, que nous restituons ici. La version finale de cet article est amenée à évoluer.

Understanding the farm-scale response of European agriculture to climate change: Evaluation of a coupled economic-crop model

Leclère David [a, b], Pierre-Alain Jayet [a], Nathalie De Noblet Ducoudré [b]

[a] UMR d'Economie Publique, INRA/AgroParisTech, 78850 Thiverval-Grignon, France

[b] IPSL/Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR CEA/CNRS/UVSQ, 91191 Gif Sur Yvette, France

ABSTRACT. For more than two decades, climate change impacts on agriculture have been appraised with various methodologies and tools. They cover a wide range of issues from biological processes at the crop level to the economy worldwide. However, the role of farm-scale processes in response to changes in climate has not yet been assessed at a continental scale. We herein present and evaluate an integrated modelling framework that aims to diagnose this role for the current European agricultural supply. Our framework couples the STICS generic crop model to the AROPAj micro-economic model of European agricultural supply. It simulates the productivity of major crops and farm-scale outcomes such as the partitioning of resources among agricultural activities including land uses, and resulting agricultural gross margin and non-CO_2 greenhouse gas emissions. Evaluating its performances is far from being straightforward as there is insufficient availability of management practices and weather datasets at such a resolution over the whole of Europe. We first use best available datasets to force our coupled model and evaluate its performances under various scenarios with respect to the Common Agricultural Policy, agricultural goods and inputs prices. We show that despite some biases, the modeled gross margin, and non-CO_2 greenhouse gas emissions, as well as the gradients in regional distributions of yield and land use of major crops are all captured. However, climate change impact assessment give rise to additional methodological issues with regards to the modeled present-day baseline, and we thus tested the sensitivity of modeled outputs to an alternative baseline explicitly designed for climate change assessment. We show that changes in modeled outcomes are moderate and consistent, leading us to deem the proposed modelling framework adequately robust enough to undertake climate change impact assessments.

Keywords: farm-scale optimization; land use; agricultural supply; Europe; climate change; evaluation

3.1. INTRODUCTION

The impacts of future climate change on agriculture have been under study for more than 20 years, but they are still shadowed with uncertainty (Easterling et al., 2007). Agriculture is fundamentally of an intertwined nature, involving agronomic, environmental and socio-economic dimensions. Among numerous issues, understanding the impact of climate change on these interactions remains a challenge: firstly these dimensions interact over a wide range of time and spatial scales. Secondly, the projected changes in each of these dimensions exceed the historical record upon which our understanding of processes has been based. This has lead to a wide variety both in the outcomes assessed, and in the tools and methods used for that purpose (Smit and Wandel, 2006; Antle and Capalbo, 2010).

A part of the studies put to use global scale integrated modelling tools (Rosenzweig and Parry, 1994; Parry et al., 2004; Fischer et al., 2005; van Meijl et al., 2006). They rely on general or partial computable equilibrium models for the economic dimension, while the specific effect of climate is appraised by coupling them to large scale models of managed ecosystems. Their main contribution was to provide a relatively complete picture of the so-called *global change*, by comparing the evolution of the climate, and the other large-scale determinants of future agriculture (e.g., technological progress, changes in demand, trade, and environmental regulation). However, in such models the spatial resolution is generally rough (a mixture of continents, and individual or aggregated countries), and the representation of the complexity and heterogeneity in agricultural systems is very coarse (Rounsevell and Arneth, 2011). They reveal a large amount of uncertainty at the European scale (Busch, 2006; Verburg, 2006).

Another part of the studies provides much more accurate insights into the processes and their net effects at field to territorial scales. Firstly, there are several processes by which increased atmospheric carbon dioxide concentration ($[CO_2]$) and changes in climate can affect the functioning of the soil-plant system at the field scale (DaMatta et al., 2010). According to the results of field experiments and detailed crop models, their net effects in terms of either yield or economic value is highly and non-linearly sensitive to the local environment physical (e.g., soil), chemical (e.g. tropospheric ozone concentration), biological (e.g., pests, diseases, weeds), and technical (e.g., management practices) environments (Olesen and Bindi, 2002; Porter and Semenov, 2005; Reidsma et al., 2007). Secondly, the various agricultural land uses and activities are interacting at the farm scale, and several means of autonomous adaptations can occur (Smit and Skinner, 2002; Antle et al., 2004; Füssel, 2007). Such processes are studied with farm economic models (Janssen and van Ittersum, 2007), often coupled to 'biophysical' models providing the link to changes in the physical environment (e.g., (Rounsevell et al., 2003)). Furthermore, at landscape to regional scales, complex interactions taking place, involving farmers, the local structure of demand for agricultural goods, various institutions (such as regional to supra-national agricultural and environmental policies), as well as other economic sectors (through the competition for production factors, and natural resources). These interactions were appraised with agent-based models (ABM, e.g., (Happe et al., 2006)).

All these approaches converge towards a gap in knowledge between field and continental spatial scales (Ewert et al., 2011), which remains to be bridged. (Rounsevell et al., 2006; Hermans et al., 2010) provided European wide assessments of global change, accounting for downscaled proxies of larger scale economic processes, e.g. (Abildtrup et al., 2006). However, the accounting of changes in crop yields from climate change was limited: they relied on a statistic approach that does not account for important local determinants such as soil, management practices, and farm-scale processes (Metzger and Bunce, 2005;

Metzger et al., 2008). (Audsley et al., 2006) further included farm-scale processes, and used a simple crop model (the ROIMPEL crop model) to jointly account for changes in climate and [CO_2] for various crop 'types'. However, their accounting of both management practices and farm typology was limited. In the mean time, (Reidsma et al., 2007, 2008, 2010) have pointed out the importance of these effects.

In an effort to help close this gap, we extended to the European level the methodology developed by (Godard et al., 2008), that couples a micro-economic model of European agricultural supply (AROPAj) to a generic crop model (STICS). AROPAj (De Cara et al., 2005; Galko and Jayet, 2011) is a detailed model of European agricultural supply. It takes into consideration distributions of heterogeneous agricultural systems at a resolution similar to NUTS II regions, over Europe. AROPAj provides the spatial grounding of our modelling framework, while its coupling to the STICS generic crop model (Brisson et al., 2003) allows the modelling framework to account for the link of 9 major European crops to the physical (soil, climate) and technical (management practices) environments of the regional distributions of agricultural systems. The methodology of (Godard et al., 2008) allows this link to be heterogeneous across crops and agricultural systems at an infra-regional resolution. Our modelling framework thus simulates the agricultural supply at a regional resolution over Europe, with an explicit accounting of both (i) farm-scale behaviour of regionally heterogeneous agricultural systems, and (ii) their regionally heterogeneous physical, technical and socio-economic environments.

However, our approach requires large input datasets of various natures to properly capture this heterogeneity, and the scarcity and possible inconsistency of available datasets over Europe could substantially limit such an approach. When addressing climate change impacts, these factors could be all the more compromising, e.g., due to the difference in nowadays climate as seen by observation and climate models (Challinor et al., 2009; Soussana et al., 2010).

The questions we address in this study are thus twofold:

- How does the agricultural supply as simulated by the modelling framework compare to observations, from the regional to the European level?
- How are these performances affected by the use of an alternative baseline designed for climate change impact assessment?

In section 3.2, we present the modelling framework, the input datasets constructed and the methodology used to answer those questions. In section 3.3, we present and discuss the results. In section 3.4, we conclude.

3.2. MATERIAL AND METHODS

In this section, we describe the modelling framework (subsection 3.2.1), and the constructed datasets for the physical and technical environment of the European agricultural supply (subsection 3.2.2). Finally, we expose the evaluation procedure of our modelling framework (subsection 3.2.3).

3.2.1. Modelling framework description

3.2.1.1. The agricultural supply model (AROPAj)

The European agricultural supply is simulated with AROPAj, a supply-side model based on a micro-economic approach applied to a distribution of virtual farm-types. The distribution of farm-types is constructed against the Farm Accountancy Data Network (FADN) survey data[6]. A confidentiality clause in FADN data use constrains the regional farm-type distribution in AROPAj, thus delineated by regrouping FADN sampled farms in homogeneous altitude, economic size and production orientation classes of a minimal sample size. Here we use a version of the model covering the former 15 Member European Union (hereafter referred to as EU-15). It includes 1074 farm-types delineated after 2002 FADN survey data, and distributed across 101 regions. The model can thus be considered as representative of about 2 millions real-world full-time farms, over 90 millions of hectares. A region contains on average 10 agents, and an agent represents on average 1770 real farms over 81000 hectares.

Each farm-type is considered as an autonomous price-taker economic agent, fed with FADN data such as total agricultural land, animal capital, existing activities and related variable production costs, yields, prices, and policy bindings. Its production activities are organized to maximize its gross margin. The decision variables include the allocation of land resource to various activities, the animal number for each category, the level of inputs (such as purchased animal feeds and commercial fertilizer), and outputs (distinguishing between on-farm and marketed production). Each agent can have up to 31 animal activities and 41 vegetal activities. An ensemble of technical constrains and parameters extensively describes the link between inputs and outputs (market prices, premiums and variable costs, input-output production functions), the interrelations between activities (fertilization from on-farm manure, rotational constrains between land uses, animal capital demography, on farm use of animal feed sources), and public policy interventions (norms, taxes and subventions from the CAP and environmental policies). Formally, an agent k is modeled by the following mixed integer linear mathematical program (P_k):

$$(\boldsymbol{P_k}) \begin{cases} \max_{x_k} [\boldsymbol{\pi_k}(\boldsymbol{x_k})] = \boldsymbol{g_k} \cdot \boldsymbol{x_k} \\ \boldsymbol{s.t.} \begin{cases} \boldsymbol{A_k} \cdot \boldsymbol{x_k} \leq \boldsymbol{z_k} \\ \forall \boldsymbol{i}, \boldsymbol{x_{k,i}} \geq \boldsymbol{0} \end{cases} \end{cases} \quad [2]$$

where π_k denotes gross margin, x_k and z_k respectively denote activities and resources vectors, and g_k and A_k respectively denote the gross margin operator and the matrix of technical constrains.

[6] FADN is an annual accountancy survey sample of the agricultural holdings, harmonized across the European Union. For each FADN region, the sampling methodology selects holdings in order to provide accountancy information that is representative of the regional diversity of real-world farms, in terms of production orientation and economic size. See http://ec.europa.eu/agriculture/rica/concept_en.cfm for more information.

Most of the parameters are taken directly from FADN data, while some are determined from expert knowledge, the reminding parameters being determined through a calibration procedure. (De Cara et al., 2005) added a detailed module of non-CO_2 GHG emissions from various activities, based on IPCC guidelines. Detailed information on the model, its technical constrains and the calibration stage can be found in (De Cara et al., 2005; Galko and Jayet, 2011).

The modelling of land allocation can be summarized as follows: the optimal area allocation is the one maximizing total gross margin, within a set of constraints reflecting rotations and typology limits. Related parameters are calibrated for each farm-type, and are describing: (i) the maximal area share of each crop within cropland, (ii) the maximal area share of each aggregated groups (cereals, oilseed crops, fodder crops) within cropland, the maximal area share of oilseed crops with respect to cereals, and of fodder crops with respect to meadows. More details can be found in (De Cara et al., 2005).

AROPAj belongs to the 'agricultural input-output model' category of models identified by (van der Werf and Peterson, 2009). This type of model is characterized by a detailed description of the diversity and complexity of production systems, while it has no endogenous representation of supply-demand dynamics for agricultural inputs and outputs in the agricultural sector and trade with other regions of the world (contrary to models such as CAPRI[7]). AROPAj does not account endogenously for the interactions with the other economic sectors (contrarily to models such as GTAP (Hertel, 1997)). Although the model considers a distribution of agents whose behavior is modeled, it differentiates from agent-based models (e.g., (Happe et al., 2006)), since the agents do not learn nor interact one with another, and the regional typology of agent does not change. For instance, we do not model farm exit, land reallocation between agents, and off-farm labor. It is thus closer to the ACRE model (Henseler et al., 2009), except that this later is based on positive mathematical programming. Our model has also a larger spatial resolution (c.a. NUTS II regions instead of NUTS III), but considers a region specific typology of agent (instead of one unique agent), and its domain is much larger (EU-15, instead of Upper Danube Basin).

3.2.1.2. Coupling to the STICS generic crop model

In order to account for changes in either the physical (climate, soil properties) or technical (crop management practices) environment of agents, we extended to EU-15 the methodology developed by (Godard et al., 2008). Its objective is to replace observed FADN crop yields and nitrogen inputs by simulated ones. As shown on Figure 3.1, we simulate the yield of nine European major crops (bread wheat, durum wheat, barley, maize, rapeseed, sunflower, soybean, potato and sugarbeet) with the STICS crop model (Brisson et al., 2003) using spatialized inputs for soil, weather and management practices.

[7] Common Agricultural Policy Regionalized Impact Modeling System, see http://www.capri-model.org/dokuwiki/doku.php

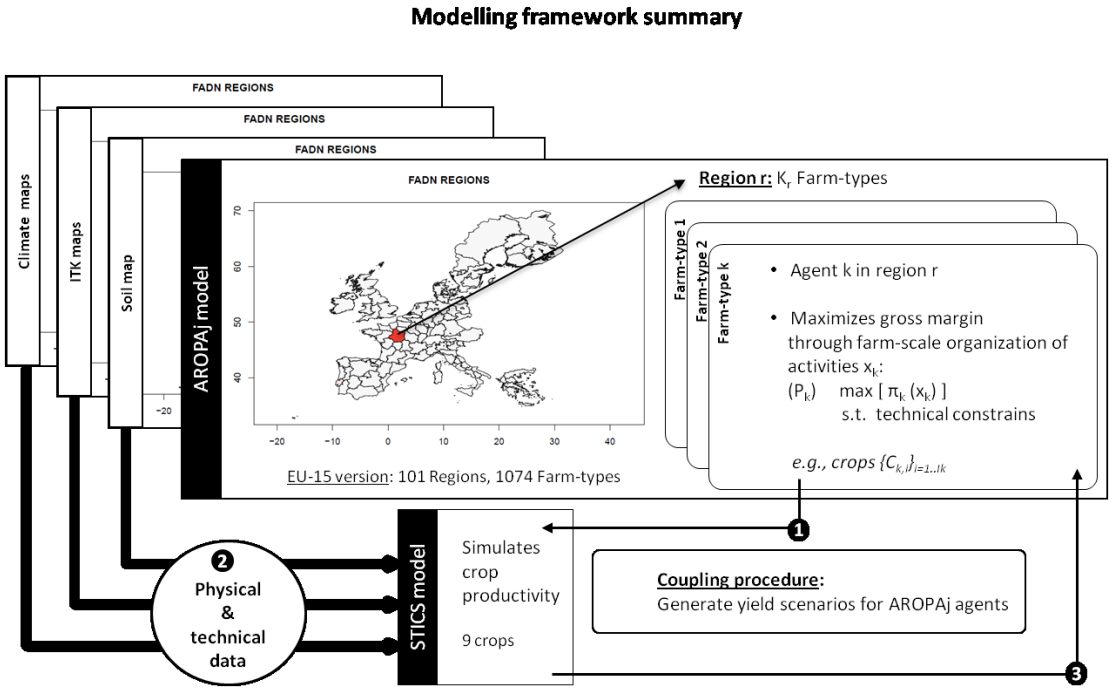


Figure 3.1 - Modelling framework overview: AROPAj agricultural supply side microeconomic model considers regional distributions of agents for which crop distribution, market prices, local soil, management practices (ITK options) and weather data can be stored in a PostgreSQL database. Java application Artix links the database to STICS crop model to generate sets of production functions linking yield to N-input level. The optimal fertilisation rate is then determined under price scenarios.

For each crop C (within the 9 major crops) of each economical agent k considered in AROPAj (hereafter referred to as a "crop-agent" couple), the procedure is composed of three steps:

i. We simulate with STICS the response of crop yields to nitrogen input for increasing nitrogen inputs.

ii. We interpolate it as production functions $Y_{C,k}$ (as formulated in equation [2]), defined by 3 parameters $A_{C,k}$ (no fertilisation yield), $B_{C,k}$ (N non limited yield) and $\tau_{C,k}$ (yield sensitivity to N input):

$$\boldsymbol{Y_{C,k}} : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+ \qquad [3]$$
$$\boldsymbol{N} \mapsto \boldsymbol{B_{C,k}} - \left(\boldsymbol{B_{C,k}} - \boldsymbol{A_{C,k}}\right) \cdot \boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{\tau_{C,k}} \cdot \boldsymbol{N}}$$

iii. The fertilization rate is determined for a price specific context, by maximizing per hectare crop gross margin, using additional information from AROPAj concerning fertilization costs (including on-farm manure availability and commercial fertilizer price), and market price for the crop specific agricultural good.

Although the coupling of farm economic models to biophysical models is relatively common (Janssen and van Ittersum, 2007), climate change is a challenging issue for such coupled models. There are large uncertainties in the potential changes of the determining factors of the soil-plant system, and in their net effects on outcomes relevant for agricultural production. While the consideration of the former source of uncertainty requires the use of different scenarios, the latter is highly constrained by

the biophysical tool used. STICS runs at daily time-step and simulates the interaction of the soil-plant system with management practices. It has a relatively complete accounting of the effects of various meteorological variables and [CO_2], stresses from heat, and soil water or nitrogen availability on various processes: crop ecophysiological development, biomass production, water-use efficiency, grain filling, etc. It also has a well detailed accounting of management practices: sowing date, cultivar cycle length, fertilisation, irrigation, initial soil state and residual biomass incorporation from preceding crop, etc. Lastly, STICS is a generic crop model, allowing us to simulate most major European crops. However, it has to be noticed that STICS does not account for some reducing factors such as biotic factors (e.g. pests, weeds, and diseases) and tropospheric ozone pollution. It thus provides *limited* yields, according to the terminology used by (van Ittersum et al., 2003), and may overestimate actual yields.

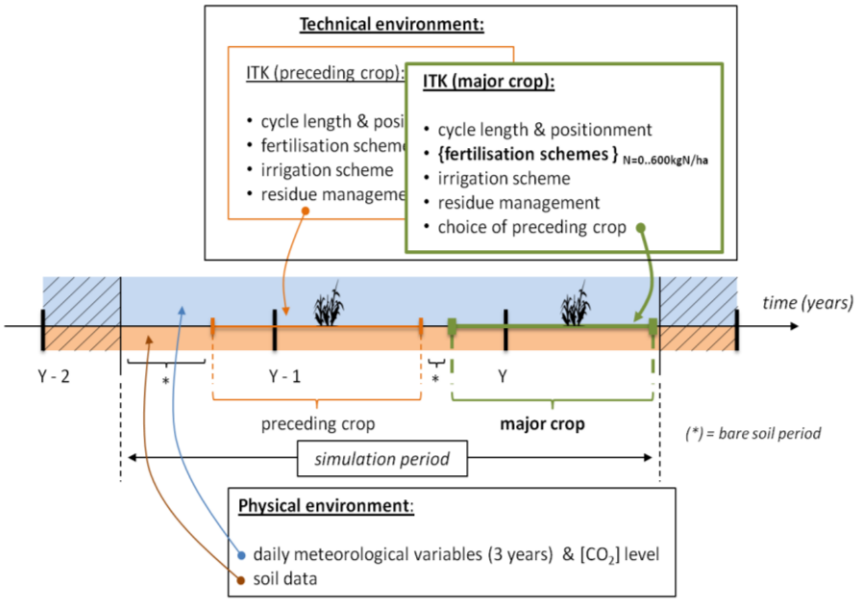


Figure 3.2 - STICS simulations set up. For each crop-agent couple (major crop), we simulate yield values for increasing nitrogen (N) input a full crop cycle harvested in year Y, under a predetermined physical (soil, daily meteorological variables and atmospheric CO_2 concentration) and technical (ITK) context. The simulation is run over 2 crop cycles, including the preceding crop (different from the major one) harvested in the preceding year (Y - 1).

As described in Figure 3.2, for a given crop-agent couple the simulation set-up consists in simulating 2 crop cycles over the simulation time period, one for the major crop and one for the preceding crop. The soil description, [CO_2], and daily meteorological inputs are provided for the simulation period. Management practices (hereafter referred to as ITK) consist in: the choice of crop cycle length and timing (through sowing date, crop cultivar precocity group and harvest modalities), the choice of the preceding crop (winter wheat or spring leguminous), the use of irrigation (if available, irrigation is non-limiting and automatically managed), and finally the fertilisation schemes (type, timing and fractionation of total nitrogen input) associated with increasing nitrogen inputs, by steps of 20 $kgN.ha^{-1}$ from 0 to 600 $kgN.ha^{-1}$. Vegetation cover is considered as bare soil during the part of the simulation period before the sowing of the preceding crop, and between the two crop cycles.

3.2.2. Construction of datasets describing the physical and technical environment

Our modelling framework considers at the resolution of a FADN region a distribution of farm-types, which are not further localized in space. However, we intend to include the heterogeneity in the physical (climate and soil) and technical (management practices) environment at a sub-regional resolution, and these datasets are different for each crop-agent couple.

As inputs, STICS needs information regarding weather, soil characteristics, and management practices. Because there are few available and consistent datasets that provide such information, (Godard et al., 2008) defined a methodology to attribute for each crop-agent couple a realistic physical and technical context. Climate data input is considered as homogeneous for agents of the same altitude class within a region. Part of the management practices are considered as determined (the irrigation availability, the fertilisation schemes, the harvest modalities) and generated from available datasets and expert knowledge.

On the contrary, soil parameters and part of the management practices (crop cycle length and timing, and the preceding crop) are considered as *undetermined* for each crop-agent couple. A set of 30 different combinations of soil and management practices are simulated, among the 5 major agricultural soils per region (based on Corine Land Cover 2000 and the European soil database v1.0 datasets) and 6 plausible management practices (3 options for crop cycle length and timing, and 2 different preceding crops). After determination of the optimal fertilisation rate, the final combination for each crop-agent couple is determined by a confrontation to FADN crop yields, fertilisation rates and prices, and crop market prices.

The procedure excludes from coupling the crop-agent cases for which unrealistic values are generated, that is to say, cases for which the range of simulated yield values does not match FADN yield. Such cases are not coupled, and the original FADN yield and nitrogen input is kept in AROPAj. In this study, we included some technical modifications to the procedure (Appendix 1), and more thoroughly worked on climate and sowing dates, as discussed in the following sections.

3.2.2.1. The choice of climate scenarios

IERA baseline. Evaluating the performance of our modelling framework against observations requests that the weather data used is as close as possible to real weather while being continuously distributed over time and space with physical consistency. Atmospheric reanalysis provides all the needed atmospheric variables with sufficient consistency, although they generally contain systematic

biases. We use the latest available atmospheric reanalysis produced by the European Center for Medium-range Weather Forecast, the ERA-Interim product (Berrisford et al., 2009), at a 0.5° latitude-longitude resolution for the 2002 agricultural campaign. Our simulations span over the years 2000, 2001 and 2002, to include preceding crops (see section 3.2.1.2).

CTL baseline. If our modelling framework is used for an assessment of future climate change impacts, IERA cannot be used as the baseline (or control) simulation. Projections of future climate change are carried out using global climate models (GCM). Such models also simulate present-day conditions, but generally with biases. What is important though is the difference between simulated future and simulated present climates. Thus, a proper present day baseline simulation for our modelling framework uses the present-day climatology as seen by a GCM, while the deviations of such baseline compared to more realistic climate data must be previously assessed. We have used the results of the ECHAM5 GCM forced with the A2 SRES scenario over the period 1950-2100, downscaled at the 0.5° latitude-longitude resolution by (Kjellström et al., 2011) using the regional climate model RCA3 (Samuelsson et al., 2011). The time period 1976-2005 was considered as the present climate, and to carry out our simulations we have selected the 3 consecutive years that best represent the climatology of this time period.

CTL and IERA baselines differ, due to the above mentioned differences in sources, time period and type of climate concept they aim at representing, and their biases. Theses biases and the differences between CTL and IERA are detailed in Appendix 2.

3.2.2.2. Crop cycle length and timing

Similarly to (Godard et al., 2008), we consider that the undetermined options are differentiated by crop with respect to the management of crop cycle length and timing: either the crop cycle length is adjusted, among 3 cultivar precocity groups for one sowing date (for bread and durum wheat, maize, and sunflower), or the crop cycle timing is adjusted through the choice of 3 sowing dates for one cultivar (for rapeseed, barley, potato, sugarbeet and soybean). Since no dataset is available at the European level concerning the cultivars, they are taken from the available STICS cultivars (based on main cultivars available in France).

Concerning the distribution of sowing dates for major European crops, the only dataset available at the EU-15 level is the crop calendar constructed by the Joint Research Centre (JRC) for the MARS project (Willekens et al., 1998). Considering that a reanalysis was used to generate climate data for IERA baseline (thus possibly containing biases), and that for CTL scenario we need to generate management practices that are representative of the 1976-2005 time period as simulated by a GCM, we decided to use our own computation of sowing dates. This methodology is adapted after (Waha et al., 2012), and considers that the sowing date is determined, within a predefined time window, by the seasonality of temperature. The method, its different implementations, and the resulting differences in sowing dates under CTL and IERA baselines are presented in Appendix 3.

3.2.3. Procedure for the evaluation of modelling framework performances

We first validate our modelling framework, under a realistic baseline (IERA) for year 2002. Then we evaluate the implications for our modelling framework performances of the use of an alternative baseline designed for climate change impact assessments (CTL). To do so, simulations were carried out with our modelling framework, and evaluated using different metrics: the coupling rate achieved (subsection 3.2.3.1), and a set of modelling framework metrics addressing simulated distributions of regional crop yields, areas, and productions (subsection 3.2.3.2).

3.2.3.1. Assessing coupling effectiveness

As explained in section 3.2.2, the coupling of crop-agent cases is restricted to realistic simulated production functions. Prior to any AROPAj simulation, the analysis of the resulting coupling rate provides useful information for the coupling methodology in terms of realism and effectiveness, for various crops and regions. We thus computed a *coupling coverage* metric, measuring the proportion of successfully coupled crop-agent cases. However, from an aggregated point of view, the importance of coupling successfulness depends on crop-agent case, since they differ in area shares. We thus weighted the contribution of each crop-agent case by its area, as provided by the original FADN data (a^{FADN}). For a given subset *L* of crop-agent cases (e.g. a country or a crop), the coupling coverage is thus computed as described by equation [3]:

$$\boldsymbol{coupling\ coverage}\ (\boldsymbol{L}) = \frac{\sum_{\boldsymbol{i} \in \boldsymbol{L}} [\ \boldsymbol{a}_i^{FADN} \times\ \delta_i\ ]}{\sum_{i \in L}\ [\ a_i^{FADN}\ ]}$$
$$\text{with } \forall\ i\ \in L,\ \delta_i = \begin{cases} 1,\ if\ case\ \text{i}\ is\ coupled \\ 0,\ otherwise \end{cases} \qquad [4]$$

3.2.3.2. Assessing modelling framework performances

Simulated distributions of regional yield, area and production distributions. We confronted the simulated EU-15 *distributions of regionally averaged yields, and of total regional areas and productions* of vegetal activities with the 2002 FADN data. For yields, the contribution of each crop-agent case to the regional level is weighted by its area share. As AROPAj is constructed and calibrated on these data, it provides a *partial* validation for IERA baseline. The simulations were carried out under a socio-economic context designed to be representative of 2002 conditions (REF scenario). It is based on FADN and EUROSTAT data for input and output prices (hereafter referred to as 2002 price scenario), and an implementation of 2002 Common Agricultural Policy, extensively describing European and national specific CAP rules and interventions (Agenda 2000 CAP scenario).

To capture the specific bias of the coupling and the use of different baselines for physical and technical environments, we run these simulations with simulated production functions under the IERA and CTL baselines. However, in its uncoupled version the AROPAj model presents some biases, which have been isolated with an additional baseline without any production function (NONE baseline, see Table 3.1). We looked at two different issues:

- the comparison of *simulated distributions of regional crop specific yield, area, and production values* with FADN data. Since these distributions are generally asymmetric, we use the median (m), the interquartile range (dQ) and the skewness values of simulated and FADN regional distributions. Skewness is a measure the asymmetry of distributions compared to a normal distribution. Positive

(respectively negative) values indicates a left (respectively right) tail higher than for a normal distribution, while the absolute its absolute value is proportional to the deviation compared to the normal distribution.

- the distribution of the regional *errors* in simulated values compared to FADN, and their impact on the modelling framework *ability to simulate regional disparities*. We look at the median regional error (m_DIFF, [%], relative to the median regional FADN value), the typical range of the error compared to the typical range of FADN values (defined as the ratio of the interquartile range of regional differences over the interquartile range of regional FADN values, hereafter referred to as the noise ratio). Additionally, we use the Spearman's correlation for ranks (R_s), to test for the ability to the reproduce the ranking across regions according to FADN data.

Sensitivity of EU-15 land use, gross margin and non-CO_2 GHG emissions. We conducted a sensitivity analysis with respect to prices and CAP regime for each baseline, providing information of the effects of the coupling for outcomes that are typically assessed with AROPAj. For this sensitivity test, we measured at the *EU-15 aggregated level* the changes in *land allocation* between different land-uses, in *total agricultural gross margin*, and in *total agricultural non-CO_2 GHG emissions* (methane and nitrous oxide).

Table 3.1 provides a summary of the different baselines (NONE, IERA and CTL) for the physical and technical input datasets, and the two additional socio-economic scenarios considered. The CAP scenario considers an alternative Common Agricultural Policy, corresponding to the CAP changes since 2002. Sugarbeet production quotas were lowered (resulting from 2006 sugar Common Market Organization reform), partial decoupling was introduced (resulting from 2003 Luxembourg agreement) and compulsory set-aside is suppressed (resulting from 2008 CAP Health-Check). The DPrices scenario is an idealized experience of a price shock comparable to the swap in prices for agricultural commodities around years 2007 and 2008. We have considered this price changes to be homogeneously implemented over EU15, based on Eurostat statistics (from 2002 to 2008): + 50% for wheats, barley and oat, +40% for grain maize, potato and other cereals, +50% for purchased fertilizer, +20% for purchased animal feed, +15% for milk, + 27% for poultry, + 5 % for pig and calves, and -12% for sheep.

Baseline		Scenario	
Name	*characteristics*	*Name*	*characteristics*
(a) Evaluate simulated EU-15 distributions of regional yield, area and production levels			
NONE	FADN 2002 yields	REF	Agenda 2000 CAP & 2002 Prices
IERA CTL	Simulated yields if successfully coupled, FADN 2002 otherwise		
(b) Evaluate sensitivity of EU-15 aggregated land allocation, gross margin and non-CO_2 GHG emissions			
NONE IERA CTL	(same as above)	CAP	2010 CAP & 2002 Prices
NONE IERA CTL	(same as above)	DPrices	Agenda 2000 CAP & 2007-8 Prices

Table 3.1 - List and detailed configurations of our numerical experiments.

3.3. RESULTS & DISCUSSION

We first present the coupling effectiveness under IERA and CTL baselines (section 3.3.1). We then look at the modelling framework performances in terms of simulated distributions of regional yield, area and production levels (section 3.3.2). Finally, we present the results of the sensitivity test (section 3.3.3).

3.3.1. Coupling effectiveness

Table 3.2 presents the achieved coupling coverage per (a) crop and (b) country for the whole EU-15, under IERA and CTL baselines. In addition, the area shares in EU-15 total Utilized Agricultural Area (UAA) are given for each subset. Under IERA baseline, the mean coupling coverage accounting for all coupled crops is 80%. The crops covering the largest share of EU-15, i.e. wheat, barley, maize, rapeseed and sugarbeet have in general selection rates above 75%, while relatively minor crops (i.e. potato, soybean and sunflower) have a selection rate lower than 50 %. When looking at country specific values, the coupling coverage is above 80% for Northern and Central EU-15 countries, while they are quite lower for Mediterranean countries (34%, 50% and 60% for respectively Portugal, Spain and Greece). In these countries, the low coupling coverages are essentially due to either too low (wheat, sunflower, soybean) or too high (barley) simulated yields, that does not pass the realism criteria (see section 3.2.2). In some

cases, STICS simulates crop failures, e.g. for potato in the Netherlands, sunflower in Portugal, and soybean in Italy. Most of those failures occur for crops that have been validated over very few regions when simulated by STICS, and in regions for which the ensemble of simulated crop management practices may not capture reality (e.g. use of cultivars with improved drought resistance).

The mean selection rate accounting for all major crops is better in CTL (85%), and for six out of the nine crops considered, the coupling coverage is larger hence increasing country specific coupling coverage for all EU-15 Member States except for Italy. The coupling coverage for maize is lower in CTL (62%) compared to IERA (84%), and cases not coupled anymore are mainly located in Italy. Sunflower and barley coupling coverages are unchanged in CTL baseline, while for potatoes it significantly increases from 26% to 82% (particularly in France, Germany and the Netherlands). These differences between IERA and CTL result from the differences in weather patterns, especially precipitations. In some regions of Northern Italy for example, precipitation is three times lower in CTL than in IERA, thus triggering a hydric stress in early vegetative stages for maize. In contrary, precipitation is roughly 50% higher in CTL compared to IERA, in Northern France and in the Netherlands. Potatoes are subject to high water stress under IERA baseline.

Subset of	Share in EU-15 [%]	Coupling coverage IERA [%]	Coupling coverage CTL [%]	Subset of cases	Share in EU-15 [%]	Coupling coverage IERA [%]	Coupling coverage CTL [%]
(a) by crop				(b) by country			
Bread wheat	15.6	86	99	France	12.6	83	97
Barley	12.1	80	78	Germany	7.7	95	96
Maize	4.3	84	62	Spain	7.1	50	52
Durum wheat	3.3	75	86	UK	5	98	100
Rapeseed	3.2	85	93	Italy	4	80	63
Sugarbeet	2.2	85	93	Denmark	1.8	98	99
Sunflower	1.6	49	52	Greece	1	60	78
Soybean	0.2	29	43	Sweden	1	90	93
Potato	1.3	26	81	Austria	0.9	68	85
ALL	43.8	80	85	Finland	0.9	65	78
				Netherlands	0.6	59	98
				Belgium	0.5	87	98
				Ireland	0.4	96	100
				Portugal	0.3	34	73
				Luxembourg	0	97	97

Table 3.2 - Coupling coverage: (a) by crop, and (b) by country. For each subset, figures are the share (in %) of each subset in the total EU-15 Utilized Agricultural Area (UAA), and the coupling coverage achieved under IERA and CTL baselines (see definition in section 3.2.3.1).

3.3.2. Simulated distributions of crop specific regional yields, areas and production

Figure 3.3 shows the comparison of regional FADN values to simulated values of average yield, total covered area, and production levels for wheat and potato. For these two crops, Table 3.3 provides the descriptive values of FADN and simulated regional distributions (median *m*, interquartile range *dQ,* and *skewness*), the median regional value of the errors of simulated values (*m_DIFF*), the *noise ratio* and the Spearman correlation *R_s*. For the other crops, a visual summary of *m_DIFF*, *noise ratio* and *R_s* values is provided in figure 3.4.

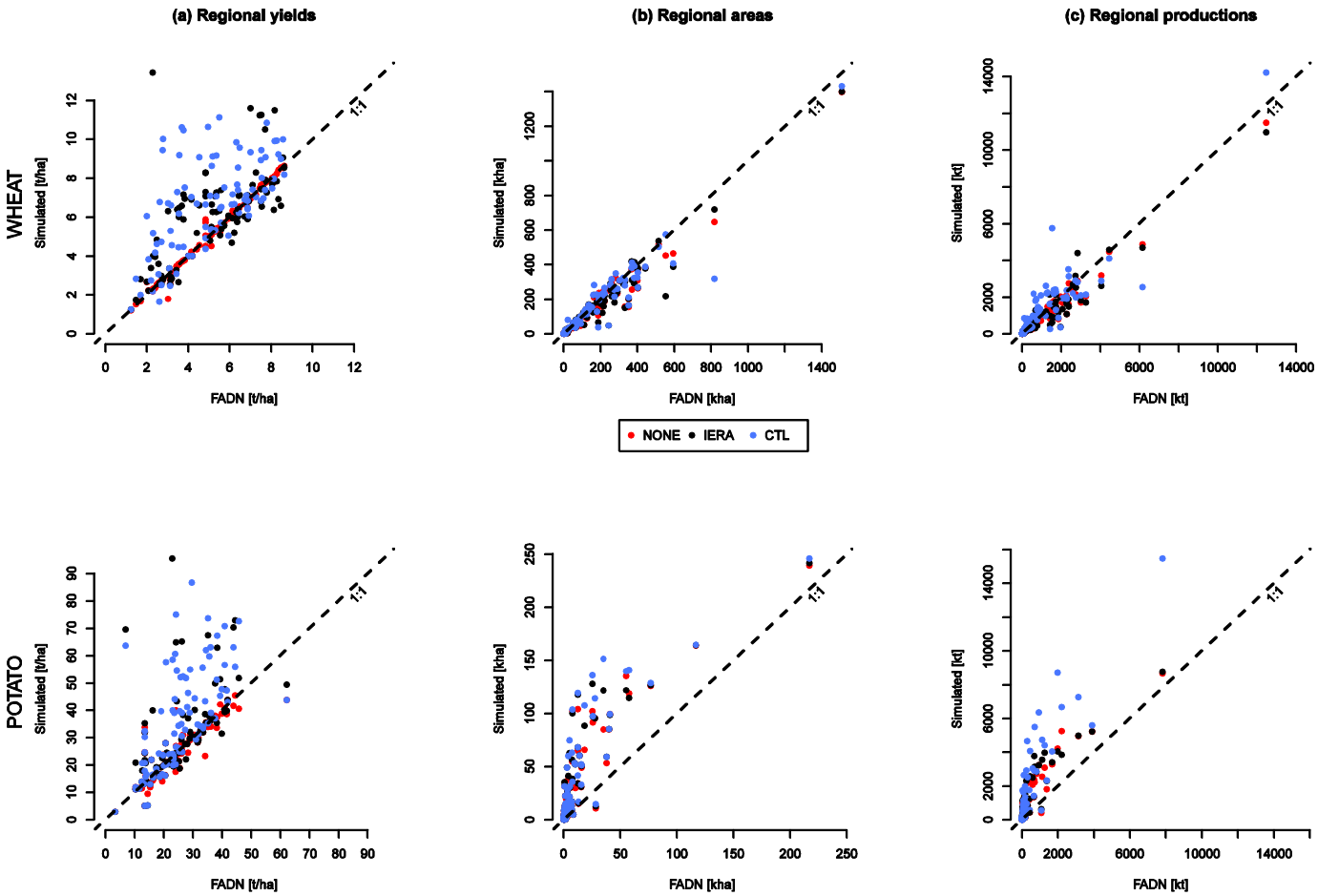


Figure 3.3 - Simulated EU-15 distributions of regional values of (a) yield, (b) area, and (c) production level compared to FADN data The values are plotted for wheat (aggregated; upper panels) and for potatoes (lower panels). The dotted black line shows the 1:1 line, while simulated values for the NONE, IERA and CTL baselines are respectively plotted in red, black and blue colors.

CROP	VARIABLE	Scenario	m	dQ	skewness	m_DIFF	noise ratio	correlation
WHEAT	Yield [t/ha]	*FADN*	5.1	3.6	0.01	-	-	-
		NONE	5.3	3.5	-0.04	0	0.03	0.99
		IERA	6.3	3.1	0.44	4	0.56	0.71
		CTL	6.8	3.5	-0.24	20	0.70	0.61
	Surface [kha]	*FADN*	*114*	*229*	*3.14*	-	-	-
		NONE	102	200	3.48	-4	0.14	0.97
		IERA	96	185	3.63	-2	0.15	0.96
		CTL	108	222	3.43	0	0.10	0.95
	Production [kt]	FADN	*449*	*1393*	*4.13*	-	-	-
		NONE	383	1122	4.56	-4	0.15	0.98
		IERA	473	1055	4.22	0	0.25	0.95
		CTL	634	1716	4.69	10	0.27	0.89
POTATO	Yield [t/ha]	*FADN*	*24.2*	*14.3*	*0.56*	-	-	-
		NONE	24.5	13.5	0.01	-2	0.16	0.86
		IERA	25.3	16.4	1.39	1	0.55	0.73
		CTL	34.0	27.0	0.48	24	1.26	0.73
	Surface [kha]	*FADN*	*3.3*	*8.1*	*5.23*	-	-	-
		NONE	10.5	30.4	2.30	237	2.83	0.86
		IERA	12.4	41.0	2.11	237	3.80	0.85
		CTL	12.3	45.8	2.01	238	3.38	0.86
	Production [kt]	*FADN*	*78*	*170*	*5.22*	-	-	-
		NONE	202	855	2.86	151	3.82	0.71
		IERA	353	914	2.53	280	4.26	0.68
		CTL	294	1391	3.20	282	6.04	0.69

Table 3.3 - Modelling framework performances in simulated regional distributions and regional disparities for wheat and potato, in terms of yield, covered area and production level. See section 3.2.3.2 for the definition of the different variables. Figures are given for original FADN data (*FADN*, for variables m, dQ and skewness) and for simulated values under three distinct baselines for physical and technical datasets (NONE, IERA and REF), for the REF socio-economic scenario (see Table 3.1).

NONE baseline. As suggested from the figure 3.3 (b, red dots) and from the Table 3.3 (figures relative to area distributions for NONE baseline), the realism of AROPAj regional land allocation greatly differs from one crop to another. While for example the areas covered with wheat are very well represented (median error of -4%), they are largely overestimated for potato (much higher median value and interquartile range, and much lower skewness). However, such large errors for relatively minor crops actually represent quite small absolute area (~11.1 kha, i.e. one tenth of the median regional area dedicated to wheat). To a much lower extent, maize and sunflower simulated area shares have a similar

bias, with respective *m_DIFF* values of +33% and +16%. Soybean is present in 18 regions according to FADN data, while AROPAj simulates its presence in only 8 regions without coupling. This bias is higher under IERA (5 regions) and CTL (2 regions) baselines. The values of the evaluation metrics used are thus not very informative, and soybean is excluded from further analysis.

The variability across regions of the error in area is relatively small (noise ratio less than 0.25, see figure 3.4 (b), red dots), except for potato, and to a lower extent for maize and sunflower (noise ratios of respectively 2.82, 0.38 and 0.30). Consequently, the correlation between simulated and FADN regional individual crop areas are very good (between 0.93 and 0.98), although a bit lower for potato and sunflower (respectively 0.86 and 0.88).

Such bias is relatively usual for mathematical programming models (e.g., (Rounsevell et al., 2003; Lotze-Campen et al., 2005)), from which results tend to promote “extreme” land use solutions: if two significantly different land-use configurations have very little difference in terms of total gross margin, then the most profitable will be chosen. In AROPAj, this issue is treated by imposing rotational constraints (as described in section 3.2.1.1). Individual crops are only bounded by a maximum area share, reflecting agronomic knowledge in simple stylized forms: for example, potato is known to be difficulty cultivated in the same field two years in a raw, and in our model the area share of potato is hence limited to half cropland. Furthermore, the parameters involved in these constraints are calibrated through a least square process (see (Galko and Jayet, 2011)), in which the sum of squared absolute errors on land allocation is minimized. Thus, the major crops at farm scale (e.g., wheat) according to FADN data have a tendency to be better simulated than the minor ones (e.g., potato).

This systematic bias in land allocation has consequences for the simulated distributions of both yield and production levels. As it can be seen in Table 3.3 and figure 3.3a, it induces firstly a bias in simulated regionally averaged yields. However, it is negligible over EU-15 (only potato has a median error different from 0, i.e. -2%) and weakly variable across regions: the noise ratio in yields is less than 0.1, except for potato and sunflower (respectively 0.16 and 0.22). Consequently, the correlation in yield values is above 0.9, except for potato and sunflower (respectively 0.86 and 0.71). Secondly, the distribution of simulated regional productions is affected, with a bias very similar to the one of simulated areas (red dots in figure 3.3c and 3.4c, and Table 3.3).

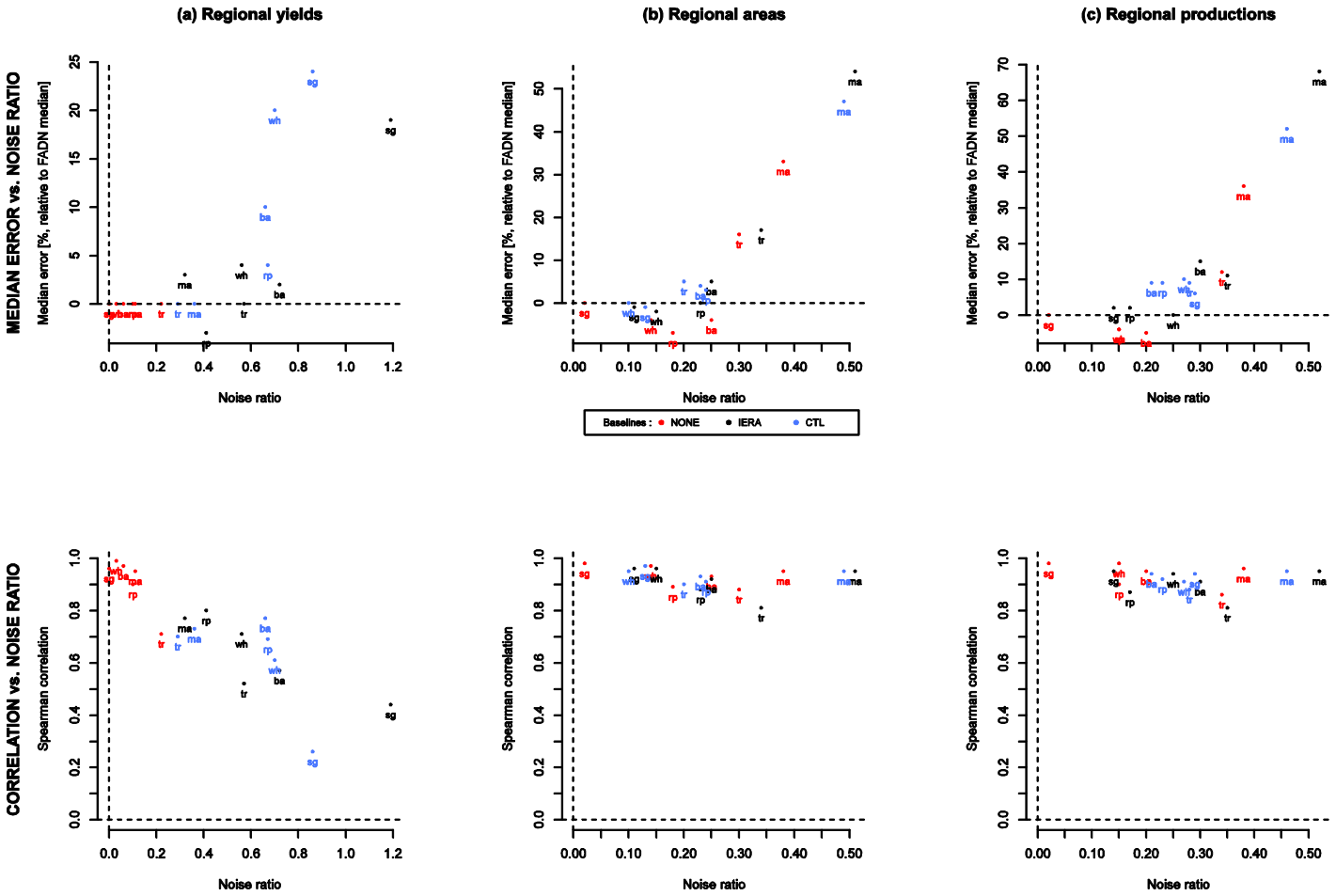


Figure 3.4 - Graphical display of evaluation metrics for simulated crops, under NONE, IERA and CTL baselines. For each crop, the evaluation metrics are presented of the simulated EU-15 distributions of regional (a) yields, (b) areas, and (c) productions values. Upper panels display median regional errors vs. noise ratios, while lower panels display the Spearman correlations vs. noise ratios (see section 3.2.3.2 for definitions). Crops are labeled, and include: wheat (*wh*, i.e. durum and bread wheat aggregated), maize (*ma*), barley (*ba*), sugarbeet (*sg*), rapeseed (*rp*), and sunflower (*tr*). Potato is excluded (figures are displayed in Table 3.3), as well as soybean (the low number of regions where soybean is simulated hampers the interpretation of evaluated metrics). Colors indicate the baselines: NONE (red dots), IERA (black dots), and CTL (blues dots). In the upper panels, simulations having high noise ratio and median error can be considered as less realistic. In the lower panels, a realistic simulated point should have a correlation close to 1 and a small noise ratio. Note that the range of noise ratio values (x-axis) in panels (a) is about twice the one in panels (b) and (c). Similarly, the range of values for median error (y-axis, upper panels) is different in panels (a), (b), and (c).

IERA baseline. Compared to NONE baseline, the main difference is the introduction of simulated production functions. As it can be seen in figures 3.3a and 3.4a (black dots), and in Table 3.3, the median error in regional yields is overall small (-2 to +4%) for all crops, with the exception of sugarbeet (+19%). However, compared to NONE baseline, the error is much more variable across regions, and the noise ratio is generally about 0.2 to 0.5, with larger values for sunflower (0.66) and sugarbeet (0.7). The ability of the modelling framework to capture the disparities of yields across regions is therefore smaller than under NONE-REF. However, the correlation remains quite good (about 0.7 to 0.8), except for sunflower and barley (0.57), and sugarbeet (0.44).

There are two explanations for IERA-REF being less realistic, that can be separated regarding first the scale of a crop-agent case, and then the scale of EU-15 regional distributions. *At the scale of a specific crop-agent case*, the realism of simulated yields relies both on the range of simulated possible values of the production function, and the optimal fertilisation rate. For most crops, FADN yields are generally in the lower bound of the range of values simulated by the STICS crop model. This can be partly explained by the fact that STICS does not account for yield reducing factors (section 3.2.1.2). For the specific cases of potato, and sugarbeet, the simulated values can even be significantly higher than the range of FADN values, thus providing unrealistic values. For these crops, the harvesting date is weakly constrained, and is simulated about one to two months later than in reality. During that time, the harvested organ is still accumulating biomass, and the yields are finally overestimated. Furthermore, the optimal fertilisation rates are determined by market prices of nitrogen input and crop output, as a proxy for implicit prices (which theoretically determine the optimal fertilisation price). Market and implicit prices however differ for vegetal activities subject to either on-farm use (e.g., wheat), or to quotas (e.g., sugarbeet, see Appendix 4). This results in choosing a fertilisation rate under IERA baseline that is globally (i.e. for all crops aggregated) higher (14%) than under NONE baseline. *At the scale of EU-15*, errors at the field scale combines with the coupling coverage. For example, although the simulated yield values are generally overestimated for sugarbeet and potato, the median regional error remains large only for sugarbeet. This difference is explained by the coupling coverages of the two crops (26% for potato and 85% for sugarbeet).

These biases in simulated regional yield distributions have however very few consequences for the simulated distributions of both regional areas (Figure 3.3b and 3.4b, black dots, and Table 3.3) and productions (figure 3.3c and 3.4c, black dots). Simulated areas are very similar to NONE baseline. The main differences are a slightly higher noise ratio for the crops already identified as being subject to systematic biases (potato, and to a lower extent maize and sunflower), and a generally slightly overestimated area share dedicated to crops (+1% to +7% in median error). Consequently the ability of the modelling framework to capture the disparities across regions in dedicated area is weakly affected by the coupling: correlation values are almost identical to those of NONE (slightly decreased by 0.01 to 0.02). This is also true for production levels (correlation slightly decreased by 0.01 to 0.04).

CTL baseline. The biases in simulated yields are consistent with those of IERA, while more pronounced (Table 3.3, and figure 3.3a and 3.4a, blue dots): the median error is positive for wheat, sugarbeet and potato (about 20 to 25%), as well as for barley (10%). The variability in the error across regions (as well as the correlation) is roughly equivalent to IERA-REF. It means that CTL baseline do not induce additional bias in the simulated regional disparities higher than the coupling itself. Furthermore, the interquartile range and the skewness of simulated distributions are very similar to those of IERA baseline. The overestimation of some crop yields may be explained by the slight overestimation of yearly cumulated values of incoming shortwave radiation and precipitation (section 3.2.2.1). In addition, the

fertilisation rate per hectare of cropland is generally higher than in IERA (leading to a deviation of +30% compared to NONE baseline).

In terms of simulated distribution of *regional area*, there are weak differences in the median error, the noise ratio and the correlation for the various crops compared to IERA baseline (Table 3.3, figures 3.3b and 3.4b, blue dots). In terms of regional productions, the overall performances are thus driven by the AROPAj bias in land allocation: except for potato (and to a lower extent for maize) the median deviation is between +6% and +10% (Table 3.3, figures 3.3c and 3.4c, blue dots). Similarly, the noise ratio is increased for potato and sugarbeet, but the differentiation among crops is still very close NONE baseline. Finally, the correlation is altered (-0.03 to +0.07), thus being comparable to the NONE and IERA baseline.

In summary, the simulated EU-15 distributions of regional yield, area and production differ. On the one hand, the coupling generates slightly overestimated yield values, and a general weakening of the modelling framework ability to capture the regional disparities in regional yield values. The correlation dramatically decreases for sugarbeet, and unrealistic yield values can be simulated (also true for potato). On the other hand, the distributions of the simulated regional area and production level are systematically overestimated for potato, maize and sunflower, and the ability to capture regional disparities for these crops is lower. Soybean is not properly simulated. These latter biases are clearly attributable to AROPAj modelling of land allocation, and are weakly affected by the coupling. The use of an alternative baseline (CTL) that will allow further analysis of climate change impacts does not significantly deteriorate the simulated land allocation and production levels.

3.3.3. Simulated sensitivity to alternative CAP and prices scenarios

Figure 3.5 displays at the EU-15 aggregated level the changes in (a) land allocation to various land uses, (b) total gross margin, and (c) total non-CO2 GHG emissions (methane and nitrous oxide, aggregated in tCO_2eq) for CAP and Dprices scenarios of socio-economic environments (compared to REF), under NONE, IERA and CTL baselines for physical and technical environments.

NONE baseline. CAP reform reduces the area dedicated to cereals and fodder crops (respectively -3.4 and -1.5 Mha, i.e. -10 and -15% in their respective area; Figure 3.5a), while the removal of compulsory set-aside leads to a reduced land allocation to set-aside (-1.8 Mha i.e. -17% for category ‘other, non-cropland’ category). Both changes benefit to meadows, greatly increased (+5.8 Mha i.e. +24%). In the DPrices scenario, the high increase of all marketed crop prices reduces the *marginal* per hectare gross margin of meadows, i.e. the increase in gross margin from an additional land unit devoted to meadow. Consequently meadows decrease by 12% (-2.9 Mha), in favor of cereals (+2.3 Mha, i.e. +7%) and to a lower extent to oilseed, root and tuber crops.

Gross margin slightly increases in the CAP scenario (+3%, i.e. +3.4 M€; Figure 3.5b). This result is in line with the decoupling reform, introducing more flexibility in production systems while guaranteeing producers their income level (by premiums). In the DPrices scenario gross margin is significantly increased (+24.6 M€, i.e. +25%) as a result of higher crop prices, and increased cropland area.

Methane emissions are highly related to livestock and its feed sources: in all our experiments, the livestock remains fixed, while the adjustments in feed source are insignificant. Methane emissions stay stable in all scenarios and are excluded from the analysis. In contrary, nitrous oxide emissions are strongly related to the area share of the different land-uses, differing by their emission factors (reflecting differences in fertilisation rate and nitrogen losses). Nitrous oxide emissions decrease in CAP (-5% i.e. -7.7 $MtCO_2eq$), as a result of an overall reduced area dedicated to crops (generally more fertilized than meadows). Inversely, they increase moderately in DPrices (+2% i.e. +3.9 $MtCO_2eq$) due to the conversion of meadows to cereals and fodder crops.

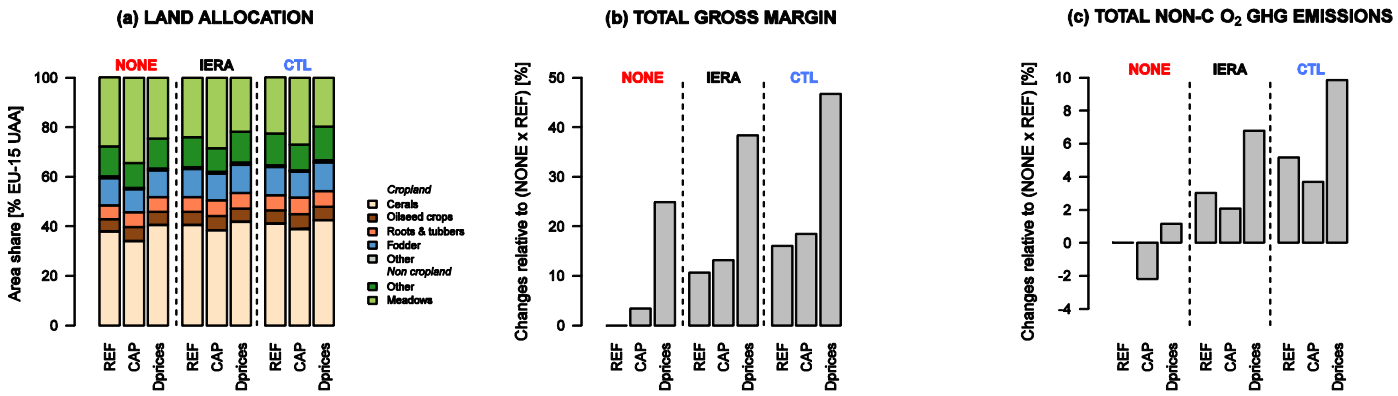


Figure 3.5 - EU-15 aggregated sensitivity of (a) land allocation, (b) total gross margin, and (c) non-CO_2 GHG emissions. Changes relative to the (NONE x REF) configuration are displayed for all nine simulations listed and described in Table 3.1. Agricultural categories considered for land allocation (a) are: cereals, oilseed crops, root and tuber crops, fodder crops, other crops (for cropland), and permanent meadows, and other (fallow, set-aside & forested area). Agricultural non-CO_2 GHG emission (b) is the sum of methane and nitrous oxide emissions (aggregated in CO_2eq).

IERA baseline. As detailed in section 3.3.2, the area dedicated to arable crops in IERA is slightly higher compared to NONE baseline. At the scale of EU-15 (Figure 3.5a) the area dedicated to crops is increased in REF scenario by 3.2 Mha i.e. +6% (respectively +2.3 Mha i.e. +7% for cereals, +0.3 Mha i.e. +6% for root and tuber crops, +0.3 Mha i.e. +7% for oilseed crops) hence significantly reducing area dedicated to meadows (-3.3 Mha, i.e. -14%). It results from a slightly higher per hectare *marginal* gross margin for cropland compared to meadows than under NONE baseline.

Due to its higher marginal per hectare marginal gross margin, cropland is less sensitive to CAP and DPrices scenarios. The direction of changes resulting from both scenarios is therefore similar in IERA than under NONE baseline, but of lower magnitude (in both relative and absolute terms). CAP induces less reduction in cropland (e.g. for cereals, -1.9 Mha i.e. -6% for IERA instead of -3.3 Mha i.e. -10% for NONE), and less increase in meadows (+16% instead of +24%). Similarly, the amount of land converted from meadows to cropland under Dprices is smaller (-8% i.e. -1.9 Mha instead of -12% i.e. -2.9 Mha).

Gross margin is increased in the REF scenario (+10.5 M€ i.e. +11%), compared to NONE baseline (consistently with slight higher productions). Nevertheless, IERA baseline responds to CAP and price changes in the same proportions than under NONE baseline: +2% instead of +3% for CAP, and +25% for DPrices (similar to NONE).

In REF scenario, non-CO_2 GHG emissions are also affected under IERA baseline: N_2O emissions are increased by 5%, since both per hectare fertilization rate and cropland area are increased. Compared to NONE baseline, the nitrous oxide emissions under IERA baseline are slightly less decreased (resp. more increased) in CAP (resp. DPrices) scenarios (-2% instead of -5% under CAP changes; +7% instead of +2% under price changes). This result is in line with the difference in land-use changes between IERA and NONE baseline (lower increase in fertilizer intensive land-uses). It is less intuitive under price changes: compared to NONE baseline, N_2O emissions are more increased under IERA baseline despite a lower conversion from meadows to croplands. This is due to the supplementary degree of freedom in IERA baseline, by which fertilization rate is increased: while the amount of additional cropland is lower, the increase in purchased fertilizers is more than doubled (+26% instead of +11%).

CTL baseline. Figure 3.5 shows that under REF scenario and CTL baseline, the overestimation of cropland area is slightly higher than under IERA baseline (e.g., +8% i.e. +2.8 Mha for cereals, instead of +7%, i.e. +2.3 Mha) at the expense of meadows (-4.6 Mha i.e. -19%, instead of -14% under IERA baseline). However, land-use responses to CAP and price changes are very similar to IERA baseline: the same relative amount of land is gained by meadows (+16%) in CAP. Under price changes the EU15 aggregated land-use response is also qualitatively very close to IERA baseline, except that more meadows are converted (-2.5 Mha instead of -1.9 Mha in IERA baseline) to cropland.

Compared to NONE baseline, EU-15 gross margin is further increased than under IERA baseline: +16%, instead of +11% under IERA baseline. However, relative changes under CAP and DPrices are very close to values obtained under IERA baseline: respectively +2% and +26% (compared to +2% and +25% under).

Nitrous oxide emissions also show the same type of deformation under CTL and IERA baseline, although with higher intensity under CTL: due to a higher area share of cropland and an increased fertilization rate, N_20 emissions are overestimated by 10% under CTL baseline (compared to +5% under IERA). Under alternative CAP and prices, CTL baseline provides similar relative changes: respectively -3% (instead of -2% for IERA), and +8% (instead of +7% for IERA).

In summary. The coupling (IERA baseline) generates a higher fertilisation rate, and a higher share of cropland area over meadows. This leads to an increased gross margin. Nevertheless, the modelling framework responds in a very similar way to CAP and price changes in terms of land allocation, although the sensitivity of area dedicated to crops is lower. The use of an alternative baseline specific to climate change impact assessment (CTL baseline) further enhances the above mentioned biases in fertilization rate, land allocation and gross margin. However, the responses to CAP and price changes are very similar. These findings highlight that our modelling framework performances are not much affected when using an alternative physical and technical baseline designed for climate change impact assessment.

3.4. CONCLUSION

In the literature of climate change impact on agriculture assessment, the role of farm-scale processes has not yet been quantified at the European scale. We present a modelling framework designed to diagnose the impact of such processes in European agricultural supply response to changes

in farmers' physical, technical and socio-economic heterogeneous environment. Building on existing methods, this modelling framework couples STICS generic crop model to AROPAj micro-economic model of European agricultural supply, by replacing fixed yields and fertilisation rates by simulated yield response to nitrogen input for major European crops. The coupling methodology, already evaluated at the scale of two French regions, is here extended to EU-15 and partially validated against FADN data.

We faced different issues in the validation procedure, relatively usual for this kind of modelling framework. Firstly, no dataset exists concerning observed weather and management practices over all of Europe at such resolution, while respecting consistency criteria. Secondly, the modeled productivity and fertilization rates are not always realistic, although we use as realistic as possible reconstructed weather and management practices datasets. To prevent our modelling framework from relying on a too unrealistic coupling, we had to consider a realism criterion in the coupling procedure and consequently accept an incomplete coupling coverage. In this respect, we reached an effective coupling rate of 80%. Thirdly, the realism of the modeled productivity and land-use is also constrained by the nature of the economic model representation of land allocation, by its calibration and by the approximation of theoretical criterions used in the coupling procedure and in the determination of fertilization rates.

We find that our modelling framework model is able to capture the observed gradients in regional yield values for almost all crops, despite an overestimation of yields and a high variability in yield realism, especially for root and tuber crops. These findings rely as much on imperfect reconstructed weather and management practices as on the crop model performances and on the approximation of theoretical criteria used in the coupling procedure and in the determination of the fertilization rate. Although we also capture gradients in regional distributions of crop specific area, the realism of modeled land use, and hence production, present more variability among crops. This bias is primarily attributed to the modelling of land allocation, and major crops at the farm scale are more realistically modeled. These findings rely more on the economic model itself and although they need to be accounted for, they are little affected by the coupling procedure. At a European scale, the coupled model responds consistently to different market price and Common Agricultural Policy scenarios, despite an overestimated cropland area share.

As climate change impact assessment places additional constraints on the design of our modeled baseline for present-day climate, we tested our modelling framework under an alternative baseline designed specifically for such an experiment. As expected, there are some differences in the coupling coverage and its realism, but no specific additional biases. Finally our modelling framework demonstrates its ability to be used to appraise farm-scale processes under changes in climate, agricultural prices, and policies.

APPENDIX 1 - ADAPTATIONS TO (Godard et al., 2008)

As explained in section 3.2.2, part of the input to STICS crop model are considered as undetermined when generating a coupling for each crop-agent case. Since firstly, the optimal crop yield and fertilisation rate are highly sensitive to the interpolated parameters, and secondly STICS model did not always generate reasonable simulated values, a few adaptations were added to the method developed by Godard et al. 2008:

(i) Yields have been generally capped by a 0.2% increasing linear trend for fertilization rates higher than N0=400 kgN/ha;

(ii) Cases were reference yield is reached for a fertilization rate higher than N0 are excluded;

(iii) During the interpolation procedure, yields with a fertilization rate higher than 300 kgN/ha have been given a higher weight to better capture curvatures; and

(iv) A tolerance is allowed if the range of simulated yield values do not match the reference yield for all of the 30 (soil x ITK) options considered. The selection is to the cases for which the range of simulated values match the reference yield with a tolerance of α (α=20% for all crops, excepted maize and sunflower for which α=40%). If it's not the case, no producing function can be generated the crop-agent couple, and FADN reference yield and fertilization rate will be kept.

APPENDIX 2 - CLIMATE DATASETS

We consider 2 different baselines for climate:

- IERA baseline is extracted from ERA-Interim reanalysis product (Berrisford et al., 2009), for years 2000 to 2002, and is supposed to be close to observed weather for those years.
- CTL baseline is constituted of 3 consecutive years extracted from the simulations of the RCA3 regional climate model (driven by ECHAM5 simulations of historical climate), and is supposed to be representative of 1976-2005 climate (Kjellström et al., 2011). An expectation-maximization method (McLachlan and Peel, 2000) has been used to analyze the monthly latitudinal and longitudinal spatial gradients of the 1976-2005 averaged temperature and cumulated precipitation. The 3 consecutive years that show the closest similarity to those gradients have been selected and used to produce our CTL baseline.

Whatever the nature of climate data these baselines aim at reconstructing, they contain biases with respect to corresponding observed climate. For instance, (Szczypta et al., 2011) compared ERA-Interim to a higher resolution weather product over France, and found that ERA-Interim has a good timing in precipitation but underestimates precipitation volume of about 27%. It also overestimates the incoming solar radiation by about 10 $W.m^{-2}$. The RCA3 model has been evaluated for present day climate over Europe (Samuelsson et al., 2011), when forced with reanalysis data. In winter and fall, RCA3 simulates a slightly overestimated temperature and incoming solar radiation in northern Europe, while it is the opposite in southern Europe. Precipitations are slightly overestimated, particularly over mountainous regions. When RCA3 is forced by ECHAM5 climate instead of reanalysis (Kjellström et al., 2011), a cold bias appears over Europe in summer, the warm winter temperature bias in northern winter is enhanced, and the mean absolute error in seasonal cumulated precipitations may reach locally 41% to 48%.

Differences between IERA and CTL baselines. Due to their differences in terms of sources, time period and type of climate concept they aim at representing, the two baselines are expected to show large differences. The analysis of their differences thus provides insights into the difference of performances of the modelling framework under IERA and CTL baselines. The mean and standard deviations over land grid cells of the differences between IERA and CTL datasets are displayed in Table 3.A2, at the yearly and seasonal time scales. At the *yearly time scale*, averaged temperature are close in both scenarios, while in CTL cumulated precipitations are larger by 15%, and cumulated incoming shortwave solar radiation lower by 7% than in IERA. As illustrated by a standard deviation over the spatial domain of about 40%, the two datasets differ in their spatial patterns for cumulated precipitations, while they seem to have more similar spatial patterns of average temperature and cumulated incoming shortwave solar radiation (standard deviations are respectively 0°C and 10%).

At the *seasonal time scale*, it can be seen that CTL is especially wetter than IERA in autumn and winter (for South-Western EU-15) and in spring (for Northern EU-15), respectively +43%, +27% and +17% in average. Moreover, the mismatch in the spatial patterns of yearly cumulated precipitations between the two datasets is larger at seasonal time scales (standard deviations of 54% to 72%). In terms of seasonal temperature cycle, CTL has a lower amplitude than IERA (a warmer winter and a cooler summer), this difference being located mostly in Eastern EU-15. The lower incoming shortwave radiation in CTL is generalized (3 seasons out of 4), but the spatial patterns of baseline differences are a slightly more variable, and season dependant.

In summary, at yearly time scale CTL and IERA baselines are mainly differing by the cumulated precipitations (15% more important in CTL, with significantly different spatial patterns). Temperatures are much closer in the two baselines, while incoming shortwave radiation is a little bit lower for CTL. However, the seasonal time scale reveals stronger differences in the average differences between baselines, and in their spatial variability.

Variable	unit	time slice	IERA	CTL	CTL - IERA *[%, except °C for T]*
Air temperature (2m)	*[°C] averaged over time averaged over EU-15*	year	10 ± 4	10 ± 4	0 ± 1 °C
		SON	11 ± 5	11 ± 4	0 ± 2 °C
		DJF	2 ± 6	4 ± 5	2 ± 2 °C
		MAM	10 ± 4	9 ± 4	-1 ± 1 °C
		JJA	19 ± 4	17 ± 4	-2 ± 1 °C
Total precipitation	*[mm] cumulated over time averaged over EU-15*	year	814 ± 318	934 ± 494	15 ± 37 %
		SON	215 ± 93	292 ± 158	43 ± 70 %
		DJF	219 ± 130	237 ± 133	27 ± 72 %
		MAM	170 ± 71	190 ± 111	17 ± 54 %
		JJA	202 ± 108	203 ±158	0 ± 58 %
Incoming SW radiation	*[GJ] cumulated over time averaged over EU-15*	year	4.64 ± 1.18	4.39 ± 1.40	-7 ± 10 %
		SON	0.76 ± 0.36	0.73 ± 0.35	-4 ± 12 %
		DJF	0.44 ± 0.29	0.43 ± 0.26	5 ±18 %
		MAM	1.54 ± 0.27	1.49 ± 0.30	-3 ± 8 %
		JJA	1.86 ± 0.29	1.70 ± 0.49	-10 ± 16 %

Table 3.A1: IERA and CTL weather properties over EU-15. Numbers are mean ± 1 standard deviation averaged over the land points of the following region: [12°W,30°E] x [35°N,75°N]. Variables displayed are: averaged 2 meter air temperature, cumulated precipitation (rainfall and snowfall) and incoming short wave solar radiation. The values are cumulated over the time slice considered, except for temperature (average). The time slices considered are the year, and the 4 seasons: winter (DJF=December-January-February), spring (MAM=March-April-May), summer (JJA=June-July-August) and fall (SON=September-October-November).

APPENDIX 3 - SOWING DATE DATASETS

As explained in section 3.2.2.2, we adapt a method from (Waha et al., 2012) to generate spatialized sowing date datasets. Our calculation relies on the hypothesis that sowing dates can be determined by temperature seasonal trends. The underlying hypothesis (considered as reasonable by (Sacks et al., 2010)) is that under the temperate regions of the EU-15, the decision to sow is mainly driven by farmer's knowledge of the temperature seasonal trends (T^*) around an a priori time window (W) over D years, based on favorable temperature thresholds for sowing (e.g., avoiding late spring frost for spring crops). More precisely, a smoothed temperature (T^*) is first generated by interpolating linearly the monthly mean temperature to a daily resolution. The sowing date (sd) is designated as the mean over a predefined number of years (D) of the day d when the smoothed temperature reaches a certain threshold (T_c), within a certain time window (W) of the year.:

$$sd(D, T_c, W) = mean\{ d_i(T_c, W) \}_{i=1..D}$$

$$with\ \forall\ i \in D, \qquad d_i(T_c, W) = \begin{cases} d(T_i^* = T_c), & if\ within\ W \\ \min(W), & otherwise \end{cases}$$

where for each year i of the D time period, $d_i(T_c,W)$ is the day when T^* reaches T_c if it exists within W, or the first day of W time window (default date).

We calibrated the temperature thresholds for each of the nine crops considered, by minimizing the difference of simulated sowing dates to the JRC crop calendar data (Willekens et al., 1998), using a least square procedure. However, the method was adapted differently under IERA and CTL baselines:

- Under IERA baseline, the time window W was limited in earlier possible sowing date to 15 days before JRC reference sowing date for each pixel wherever reference was available (in order to fit to JRC reference). The sowing dates were computed over the whole studied domain with linearly interpolated 2001 (for winter crops) or 2002 (for spring crops) ERA-Interim monthly temperatures (assuming that the farmer has a fine understanding of the seasonal temperature of the weather trends for the crop cycle year).
- Under CTL baseline, the whole 1975-2006 time period was used for computation and calibration (we thus consider the farmer's view of a 'mean' temperature seasonal cycle typical from a climate scenario). The time window was also enlarged to give a higher weight to temperatures as a determinant of sowing dates, and starts sooner. It reflects what would be expected in the design of a present climate baseline for climate change impact assessment: the calibrated temperature thresholds are more sensitive to the temperatures (because the sowing dates are less constrained to remain close to the JRC reference), making it more consistent to reuse them to compute new sowing dates under an alternative climate.

Differences in IERA and CTL sowing dates. Similarly to differences in climate datasets under IERA and CTL baselines, the analysis of the differences in sowing date datasets helps understanding the differences in the simulated agricultural supply under CTL and IERA baselines. For IERA, most dates are within ±15 days of JRC crop calendar reference where available (not shown), except for winter wheat in Greece where actual sowing occurs about 3 weeks later than reference in IERA. In CTL on the other hand, sowing dates are not as close to the reference calendar: differences have a standard deviation of about 3 weeks and can present regional differences up to 2 months – e.g. around the Alps, southern France,

central Spain. This result is consistent with IERA weather data being expected to better capture regional temperature patterns, and IERA implementation of sowing date computation method being more constrained by JRC reference.

Crop		IERA	CTL	CTL - IERA
Specie	*Sowing season*			
Durum wheat	Winter	Oct. 8th ± 16 days	Sep. 22th ± 25days	-16 ± 20 days
Bread wheat		Oct. 13th ± 17 days	Oct. 1st ± 27 days	-12 ± 18 days
Rapeseed		Sep. 1st ± 2 days	Aug. 28th ± 21 days	-4 ± 21 days
Barley		Oct. 12th ± 23 days	Sep. 27th ± 23 days	-16 ± 20 days
Barley	Spring	Mar. 2nd ± 24 days	Mar. 16th ± 33 days	+13 ± 23 days
Potato		Apr. 12th ± 14 days	Apr. 25th ± 17 days	+12 ± 21 days
Sugarbeet		Mar. 30th ± 13 days	Apr. 12th ± 20 days	+12 ± 15 days
Maize		Apr. 21st ± 13 days	Apr. 29th ± 30 days	+7 ± 26 days
Sunflower		Apr. 8th ± 9 days	Apr. 28th ± 26 days	+19 ± 25 days
Soybean		Apr. 23th ± 9 days	May 13th ± 26 days	+19 ± 25 days

Table 3.A2: Computed sowing dates for various crop types, under IERA and CTL baselines. Numbers are mean ± 1 standard deviation, averaged over all FADN EU15 regions.

Table 3.A2 presents the computed sowing dates by crop for both scenarios, and their differences. The simulated sowing dates show systematic differences in their mean European values: winter crops are systematically sown earlier in CTL (~4 to 16 days), while spring crops are systematically sown later (~7 to 19 days). As sowing dates are mainly depending on temperature in EU-15, this result is quite consistent with the differences discussed earlier between CTL and IERA weather data as CTL displays warmer winter and colder summer temperatures. This mean change varies quite a lot spatially as the standard deviations of differences are higher than their mean.

Nevertheless, reconstructing sowing dates is a difficult task. First, JRC crop calendar is rather homogeneous at the national scale while having some discontinuities around administrative borders and its accuracy at sub national scale may thus be questionable. Our calculations also rely strongly on seasonal temperature trends which are more variable at sub national scale than JRC reference: most EU15 countries have regions with various topography and distance to coastal zones. Secondly, our method rely on the assumption that sowing dates are mainly determined by temperature seasonal cycle, which may not be sufficient, since farmers may have to allow their labor to several activities at the same time, wait a certain time after preceding crop harvest, and consider soil humidity both for engine intervention possibility on fields and seed bed moisture issues (Olesen and Bindi, 2002; Rounsevell et al., 2003; Audsley et al., 2006).

APPENDIX 4 - OPTIMAL FERTILISATION RATE ASSUMPTIONS

For each baseline, the selection of a unique $Y_{baseline}(N)$ production function among simulated possible production functions $\{Y_i(N)\}_{i=1..30}$ is based on a minimal difference between the price ratio of purchased nitrogen input over marketed crop production and the derivative of each possible production function $Y_i(N_{opt,\,i})$ at $N_{opt,i}$, defined by the fertilization rate for which each production function *i* reaches the FADN yield Y^o . We thus assume (Godard et al., 2008) that in reality farmers reach economic optimality with respect to the fertilization rate, and that the most realistic production function is the closest to this economic optimality, defined by the maximization of per hectare crop specific gross margin with respect to N input. Based on mathematical programming theory, in case the optimal nitrogen input N_{opt} is strictly positive, the derivative of the production function has to be equal to an implicit price ratio (instead of the market price ratio) as summarized by the following equation:

[X1] $$\frac{\partial Y}{\partial N}(N_{opt}) = \frac{\xi}{\rho}$$

with implicit prices ξ and ρ respectively referring to the N-input and to the crop yield.

Due to the relatively complete description of internal farm-type activities links and to the mixed integer and linear approach used (allowing to represent CAP measures such as quotas), there are several reasons for the implicit and market prices to be different. That may lead to a biased estimation of implicit prices ratio by marketed prices ratio, and then to lower realism performance in the choice of both baseline production functions and in modeled fertilization rates.

Let us consider the economic farm model, accounting for *(i)* possible mineral and organic nitrogen contributions (the organic source of nitrogen is provided by on-farm recycling of manure, and converted to mineral nitrogen input by a constant factor), *(ii)* a limit in manure application rate (based on European Nitrate Directive), *(iii)* limits to crop production (e.g. quotas) or area share (e.g. rotation bindings), *(iv)* a choice between marketed or on-farm use of production as animal feed. If the crop is assumed to be produced and assumed to use a strictly positive nitrogen input, the optimal yield and nitrogen input can be theoretically determined according to two cases:

In the first case, when at least a part of mineral nitrogen is used and at least a part of the production is marketed, the optimal derivative is equal to or greater than the market price ratio (strictly equal when production and nitrogen limits do not hold).

In the second case, when mineral nitrogen input is null or when the share of marketed production is null, the derivative and the market price ratio differ. In this case, the optimal derivative is lower than the market price ratio. This result means that either production is more valuable through on-farm consumption than through market exchange, or organic N-input is more valuable than purchased mineral nitrogen source (formal proof can be provided on request).

Chapitre 4
Impact du changement climatique et adaptation autonome à l'échelle de la ferme

Après avoir présenté et évalué le modèle développé lors de cette thèse, nous en présentons ici une application. Dans ce chapitre, nous mettons en valeur à l'échelle Européenne le rôle des adaptations autonomes à l'échelle de l'exploitation, en réponse au changement climatique.

Ce travail a été finalisé sous la forme d'un article scientifique coécrit avec mes encadrants de thèse, et soumis à la revue *Ecological Economics*. La version finale de cet article est amenée à évoluer.

Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change

David Leclère[*1,2], Pierre-Alain Jayet[2], Nathalie De Noblet-Ducoudré[1]

[1] CNRS, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL, UMR CEA/CNRS/UVSQ, CEA-Orme des Merisiers, F-91191 Gif Sur Yvette, France

[2] UMR Economie Publique INRA/AgroParisTech, Avenue Lucien Brétignière, 78850 Thiverval-Grignon

ABSTRACT

The impact of climate change on European agriculture is subject to a significant uncertainty, which reflects the intertwined nature of agriculture. This issue involves a large number of processes, ranging from field to global scales, which have not been fully integrated yet. In this study, we intend to help bridging this gap by quantifying the effect of farm-scale autonomous adaptations in response to changes in climate. To do so, we use a modelling framework coupling the STICS generic crop model to the AROPAj microeconomic model of European agricultural supply. This study provides a first estimate of the role of such adaptations, consistent at the European scale while detailed across European regions. Farm-scale autonomous adaptations significantly alter the impact of climate change over Europe, by widely alleviating negative impacts on crop yields and gross margins. They significantly increase European production levels. However, they also have an important and heterogeneous impact on irrigation water withdrawals, which exacerbate the differences in ambient atmospheric carbon dioxide concentrations among climate change scenarios.

Keywords: climate change; agriculture; Europe; residual impact; autonomous adaptation; water-use efficiency; modeling

4.1. INTRODUCTION

The impacts of climate change on agriculture have come under scientific scrutiny for more than two decades, but are still shadowed with uncertainty. Agriculture is fundamentally of an intertwined nature, involving agronomic, environmental and socio-economic dimensions. Studies set out to disentangle what is at stake from these points of views (Parry et al., 2007). The estimates and the tools used to carry them out varied greatly.

Recent studies covering at least the European continent (Parry et al., 2004; Fischer et al., 2005; Rounsevell et al., 2005; Audsley et al., 2006; van Meijl et al., 2006; Alcamo et al., 2007; Hermans et al., 2010) generally appraise *global change*, dealing with issues covering more than changes in climate alone. Indeed, they pay much attention to accounting for the evolution of the main determinants of agriculture other than climate itself, in accordance with the assumptions underlying the different pathways leading to the anthropogenic perturbation of the climate. More specifically, these global change assessments include the determinants of the future agricultural supply (e.g., technological progress, climate change, land use change), and the future demand for agricultural goods (e.g., global-wide demography and its food diets, trade regimes, and economic growth rates). On the one hand, global-scale partial and general equilibrium models endogenously model changes in technological progress, demand for agricultural goods and land use consistently across the given spatial domain, and dynamically over time (Fischer et al., 2005; van Meijl et al., 2006). On the other hand, finer-scale land-use models (Rounsevell et al., 2005; Audsley et al., 2006; Hermans et al., 2010) use downscaled and static versions of these determinants (Abildtrup et al., 2006; van Vuuren et al., 2007). No matter the means, these studies suggest that climate change may be a relatively minor driving force behind the evolution in the European agricultural supply (Ewert et al., 2005; Audsley et al., 2006; van Meijl et al., 2006; Hermans et al., 2010).

We have reason to believe that in these recent studies the complexity of agricultural systems is not fully reflected in the way the impact of future climate on agriculture is accounted for, from both conceptual as well as methodological points of view. To better understand the various facets of adaptation, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has defined a conceptual framework. It separates the *potential impacts* of climate change on a particular system from the *residual impacts*, including the *effective adaptation* (defined by *adaptation options* and the ability of the system to implement them, i.e. the *adaptive capacity*). Adaptation is further differentiated (Füssel, 2007) according to various criteria, including its purposefulness (autonomous vs. planned), planning horizon (short-term or long-term), form (technical, institutional, financial, behavioral or educational), and the actors involved. In this respect, the most common pattern in the previously diagnosed changes in the European agricultural supply are a reduction in the agricultural share in land use as a result of technological progress, and global spatial redistribution of agricultural supply through dynamic trade regimes. They refer to long-term structural changes in the agricultural supply, and the adaptation possibilities of holdings at the farm-scale were only partially accounted for, such as changes in management practices, or in the crop portfolio at the farm-scale (Smit and Skinner, 2002; Antle et al., 2004; Bindi and Olesen, 2010; Olesen et al., 2011). These adaptations are of an *autonomous* nature, defined as the ongoing implementation of existing knowledge and technology by farmers themselves, in response to experienced changes in climate. They are known to have played an important role in Europe (Reidsma et al., 2010), and have been identified as a key uncertainty in climate change impact assessments (Easterling et al., 2007).

From the methodological point of view, the tools used to assess the effects of changes in climate alone may not be able to fully capture the spatially heterogeneous link between outcomes of the agricultural supply and its physical, technical and socio-economic environment. Firstly, the atmospheric variables (such as atmospheric carbon dioxide level and weather) have impacts on several processes of the soil-plant system (DaMatta et al., 2010), and their net effects as well as their spatial variability is heavily dependent on the species under consideration and the distribution of the physical (climate and soil), and technical (management practices) environment. In this respect, tools such as the AEZ methodology used in (van Meijl et al., 2006), the ROIMPEL agro-climatic model used in (Audsley et al., 2006), or the Environmental Strata method (Metzger et al., 2008) used in (Rounsevell et al., 2005; Hermans et al., 2010), have a relatively coarse representation of this link. Secondly, this link has been measured across Europe as spatially heterogeneous, and very dependent on the socio-economic context of agricultural systems (e.g., farm economic size and production orientation, see (Reidsma et al., 2007)). This latter context also strongly influences the farm-scale adaptations (Reidsma et al., 2010), and has not been accounted for in the studies cited above.

In this paper, we propose to quantify the specific role of short-term autonomous adaptations in the European agricultural supply response to climate change, relying on the coupling at the farm-scale of a micro-economic European agricultural supply-side model (AROPAj, (De Cara et al., 2005; Galko and Jayet, 2011)) with a generic crop model (STICS, (Brisson et al., 2003, 2008)). This modeling framework is designed to perform a quantitative analysis of the European agricultural supply, through the diagnosis of agricultural supply outcomes at the farm to continental-wide aggregated level. It models the behavior of a distribution of economic agents, who optimizes the use of resources and the agricultural activities at the farm scale by maximizing profit. The effects of changes in climate and management practices for various crops are accounted for by the coupling to the crop model. Moreover, the model has a regional spatial resolution and a fine accounting for the infra-regional heterogeneity in the physical and socio-economic determinants of agricultural activities. It consequently provides an adequate tool to address autonomous adaptations, and it opens the door to addressing the following set of questions:

- How do farm-scale adaptations alter the projected changes in yields, production levels, gross margins and environmental impacts of the European agricultural supply?
- Do they alter the north-south geographical gradient generally associated with climate change impact on agriculture over European?
- Would they alter the place of climate change in the ranking of the determinants of future European agricultural supply?

In the next section, we detail the modelling framework and the scenario under consideration. In section 4.3, we present our findings in terms of changes in crop productivities, production levels, and finally gross margins and the environmental and resource use impacts. In section 4.4, we discuss our results with respect to any limits in the modelling framework and previous studies, before highlighting their importance and implications for future climate and global change impact assessments on European agriculture.

4.2. MATERIAL AND METHODS

We first briefly detail the modelling framework, and then the scenarios constructed to assess the effect of both climate change and farm-scale autonomous adaptations.

4.2.1. The modelling framework

The European agricultural production is represented by AROPAj, a supply-side model belonging to the 'agricultural input-output models' category identified by (van der Werf and Peterson, 2009), that is based on a micro-economic approach applied to a distribution of virtual farm-types representative of real-world farms (excluding horticulture, wine and grapes, and arboriculture). The distribution of farm-types is constructed against the Farm Accountancy Data Network (FADN) census data, a harmonized annual survey sample of the agricultural holdings in the European Union. For each of the FADN regions (figure 4.1), the FADN sampling methodology selects holdings in order to provide a representative (in terms of production orientation and economic size) accountancy information of agricultural holdings. The regional farm-type distributions in AROPAj are delineated by regrouping FADN farms in homogeneous elevation, economic size and production orientation classes of a minimal sample size. Here we use a version of the model covering the former 15 Member European Union (hereafter referred to as EU-15), including 1074 farm-types delineated after 2002 FADN census data, distributed across 101 regions.

Each farm-type is considered as an autonomous price-taker economic agent, fed with FADN data (total agricultural land, animal capital, existing activities and related variable production costs, yields, prices, and policy bindings), who organizes its production activities to maximize its gross margin. Thus an agent *k* is modeled by the following mixed integer linear mathematical program (P_k):

$$(P_k)\begin{cases} \max_{x_k}[\pi_k(x_k)] = g_k \cdot x_k \\ s.t. \quad \begin{cases} A_k \cdot x_k \leq z_k \\ \forall\, i, x_{k,i} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \qquad [5]$$

where π_k denotes gross margin, x_k and z_k respectively denote activities and resources vectors, and g_k and A_k respectively denote the gross margin operator and the matrix of technical constrains.

An economical agent in AROPAj can thus react to changes in demand (via prices) or policies (via premiums or other incentives) by adjusting its activities (e.g. land allocation to different uses, adjustment in animal capital and its feed sources, allocation of on-farm grain production to market or animal feed, of on-farm sources of manure as fertilizer, etc ...). (De Cara et al., 2005) developed an additional module that computes a detailed accountancy of non-CO_2 GHG emissions related to the various activities. More information on the technical description of the AROPAj model can be found in (De Cara et al., 2005; Galko and Jayet, 2011).

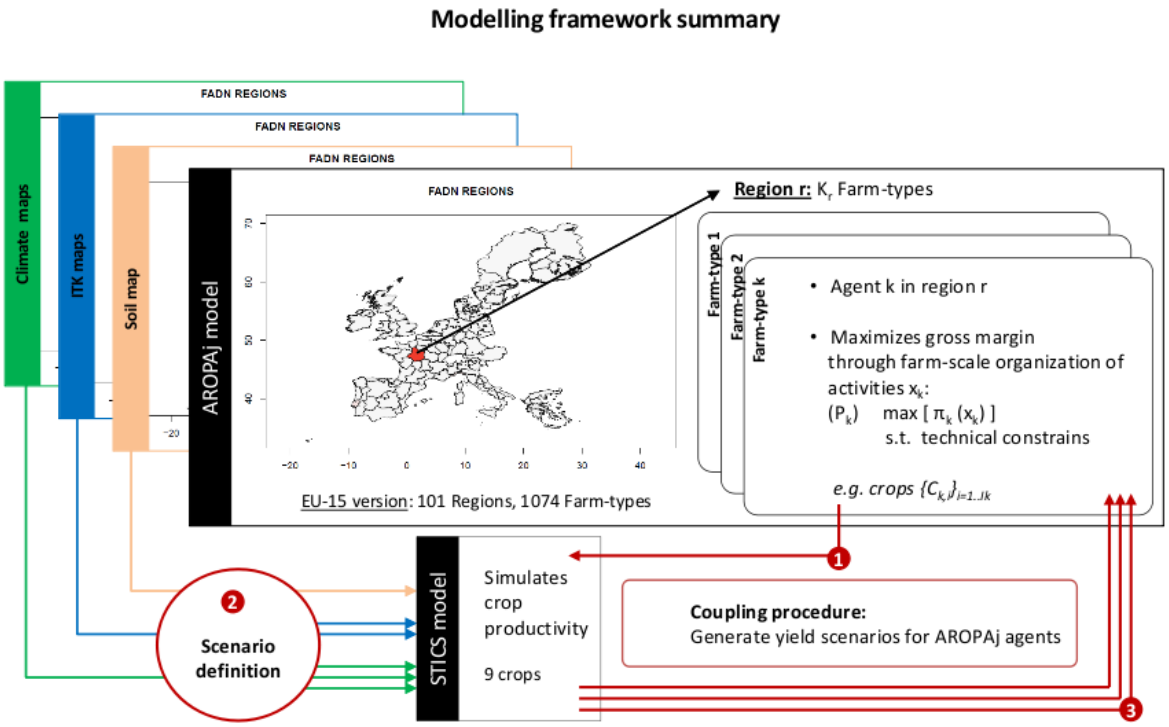


Figure 4.1 - Schematic view of the modelling framework. The coupling procedure consists in (1) identifying the distribution of European crops as described by AROPAj agricultural supply model, (2) providing them with different scenarios of the physical and technical determinants of their yields (soil, climate, management practices), (3) to feed AROPAj back with yield responses to this environment, as simulated by STICS generic crop model. Within each FADN region *r*, AROPAj considers a distribution of K_r farm-types (1074 in total, over 101 regions). Each farm-type k is considered as a price-taker economical agent, whose behavior is modeled by a mathematical program (P_k). The agent behavior consists in organizing production activities (x_k) to maximize gross margin (π_k). Major European crops (bread wheat, durum wheat, rapeseed, barley, maize, sunflower, soybean, potato, and sugarbeet) of each agent delineate crop-agent couples, for which we simulate yield response to nitrogen input with STICS crop model.

In order to be able to account for changes in crop yields due to changes in either climate or crop management practices, we extended to EU-15 the methodology developed by (Godard et al., 2008) and replaced observed FADN crop yields and nitrogen inputs by simulated ones (Leclère et al., n.d.). As shown on figure 4.1, we simulate for each AROPAj agent the yield of nine European major crops[8] with the STICS generic crop model (Brisson et al., 2003, 2008) using spatialized inputs for soil, weather and management practices. STICS is a detailed generic crop model, working at daily time-step and simulating the interaction of the soil-plant system, including management practices. In this procedure, we first simulated the response of crop yields to nitrogen input, and then interpolated it as production functions $Y_{C,k}$ for each crop C of each economical agent k considered in AROPAj (hereafter referred to as a "crop-agent" couple), as formulated in equation [2]:

[8] namely bread wheat, durum wheat, barley, maize, rapeseed, sunflower, soybean, potato and sugarbeet.

$$Y_{C,k} : \mathbb{R}^+ \to \mathbb{R}^+ \quad [6]$$
$$N \mapsto B_{C,k} - \left(B_{C,k} - A_{C,k}\right) \cdot e^{-\tau_{C,k} \cdot N}$$

with the crop C and farm group *k* dependant parameters $A_{C,k}$ (no fertilisation yield), $B_{C,k}$ (N non limited yield) and $\tau_{C,k}$ (yield sensitivity to N input).

Finally, the fertilization rate is determined by maximizing per hectare crop gross margin, using additional information from AROPAj concerning fertilization costs (including on-farm manure availability and commercial fertilizer price), and market price for the crop specific agricultural good.

4.2.2. Scenario description

Three different climate data sets have been derived from two continuous runs for the time period 1950-2100 used for the fourth assessment report of the IPCC (ECHAM5 global circulation model), under respectively the A2 and B1 SRES scenarios (Nakicenovic et al., 2000). (Kjellström et al., 2011) downscaled these runs at the 0.5 ° longitude-latitude resolution with the RCA3 regional climate model (Samuelsson et al., 2011). We extracted from these downscaled simulations the time period 1976-2005 (from the A2 run) as the *present climate baseline*, and the time period 2071-2100 for both A2 and B1 scenarios as *two future climate scenarios*. We considered a time horizon by the end of the 21st century for future climate to get an upper range of climate change, while having more contrast between the two SRES scenarios. A further extraction of three consecutive years for each scenario was done, using an Expectation-maximization algorithm (McLachlan and Peel, 2000) to select the 3 consecutive years that best represent the climatology of each scenario. These 3 years data sets of present climate baseline and two climate change scenarios are hereafter referred to as respectively CTL, A2 and B1 climate scenarios. The future [CO_2] levels used were 724 ppm and 533 ppm for respectively A2 and B1 scenarios.

In CTL baseline, the soil and management practices inputs are designed to be as close as possible to the observed data while being consistent with the weather data (Leclère et al., n.d.). All together, these inputs have been used to simulate a unique set of production functions for the CTL baseline (figure 4.1) with the STICS crop model, for each “crop-agent” couple.

The two climate change scenarios have been considered through the simulation of additional production functions with STICS being imposed new weather (while keeping CTL inputs for soil), from A2 and B1 climate data sets. However, we considered different scenarios with various degrees of adaptation.

To account for the adaptations of *crop management practices*, two different sets of production functions were derived for each future climate scenario, using respectively the same management practices as in CTL, and a new set of management practices. These new management practices were generated for each “crop-agent” couple by simulating all the combinations encompassing a change in: the choice of the preceding crop (spring leguminous or winter wheat), the management of crop cycle

length or timing[9], and the availability of water resource for irrigation. The adapted management practice is defined as the one maximizing the crop specific per hectare gross margin among all these possibilities. While the distribution of irrigated crops is defined by the FADN data in CTL scenario, we considered that due to changes in water resources, irrigation could become both available (for cases not irrigated in CTL) or unavailable (for cases already irrigated in CTL), based on a simple per hectare water resource balance[10].

We also accounted for the possibility of *re-allocating agricultural land at farm-scale*, e.g. to switch between crops, but also to extend (or reduce) cropland over pasture. This second level of adaptation has been implemented by allowing or not the land allocation to change in the AROPAj model, with respect to its state in CTL scenario. It should be noted that the possibilities of land reallocation are however restricted by the typology bindings of AROPAj agents, limiting the relative shares among different land uses given the production orientation of each agent.

Finally, we considered a set of 7 scenarios, encompassing one present day climate baseline with observed management practices (CTL scenario), and two future climate scenarios (A2 and B1) along with three adaptation scenarios (see table 4.1): (i) adaptation of neither crop management practices nor land allocation (DUMB scenario); (ii) adaptation of crop management practices only (AGRO); and (iii) combined adaptation of crop management practices and land use (SMART scenario).

ADAPTATION SCENARIO			CLIMATE SCENARIO	
Name	*Crop management*	*Land allocation*	*A2*	*B1*
DUMB	-	-	$A2_{DUMB}$	$B1_{DUMB}$
AGRO	x	-	$A2_{AGRO}$	$B1_{AGRO}$
SMART	x	x	$A2_{SMART}$	$B1_{SMART}$

Table 4.1 – Future climate and adaptation scenarios. In addition to CTL baseline, we considered two climate change scenarios (A2 and B1), at the horizon 2071-2100 under respectively *A2* and *B1* SRES scenarios. For each climate change scenario, 3 levels of adaptation are considered: *SMART* (adaptation of both crop management practices and land allocation), *AGRO* (adaptation of management practices solely), and *DUMB* (no adaptation, i.e. land allocation and management practices identical to CTL baseline).

[9] According to the crop concerned, we considered either the use of an alternative cultivar among 3 possibilities (thus altering crop cycle length), or a shift in the sowing date by ± 3 weeks (thus altering crop cycle timing)

[10] We considered that due to water use competition and resource preservation, the flux of blue water ([B], the amount of precipitations [P] not directly evaporated by the soil-plant system [ETR] nor irrigated [I]) transferred to river flows must be maintained superior to a critical flow ($[Q_{min}]$). Thus irrigation was not allowed if $[B < Q_{min}]$ i.e. if $[(P - ETR)_{irrigated} - I < Q_{min}]$ over 3 years. Q_{min} was interpreted as an ecological flow and its value taken equal to 95 $mm.year^{-1}$ (as evaluated by (Gustard and Gross, 1989)).

4.3. RESULTS

We first present in section 4.3.1 the changes in climate, the subsequent changes in simulated crop yield, and the simulated adjustments in both crop management practices and in farm-level organization of agricultural supply. We then derive in section 4.3.2 the consequences for European agricultural supply in terms of agricultural production, agricultural gross margin and environmental impacts. Finally, we analyze in section 4.3.3 the spatial patterns of these changes across EU-15 regions.

4.3.1. Changes in climate, simulated crop yields, and resulting farm-scale adjustments

4.3.1.1. Changes in climate

Climate change scenarios are in line with expected impacts over the European continent (Alcamo et al., 2007), with temperatures increased everywhere in any season by at least 1° C to 2°C (respectively in B1 and A2 scenarios) and a higher increase in Northern (resp. Southern) Europe in winter (resp. summer), up to more than 4°C and 6 °C respectively in B1 and A2 scenarios.

In terms of cumulated precipitations, there is a clear North East to South West gradient with greater (resp. smaller) cumulated precipitations in North-Eastern (resp. South-Eastern) Europe. However, trends in precipitations are much more seasonally marked in the A2 scenario, with the increase in precipitations in North-Eastern regions being larger in winter and spring (up to +50%), while the reductions in South-Western Europe are larger in summer and autumn (up to -50%). In the B1 scenario, the seasonality is less marked and cumulated precipitation can even increase in some Mediterranean coastal areas, especially areas under Atlantic influence (e.g. Portugal and Western Spain) all year long, and under Mediterranean influence for summer.

Finally, although the spatial trends are comparable in the two climate change scenario, B1 scenario is essentially differentiated from A2 scenario by less intense annual trend and seasonality in the projected changes for both mean temperature and cumulated precipitations. A further differentiation is the much lower increase in atmospheric concentrations in the B1 scenario (533 ppm) compared to A2 scenario (724 ppm).

4.3.1.2. Crop response to climate change and management practices adaptations

For each crop whose production function is computed, its yield at the *field level* is determined partly by the crop model inputs (daily weather derived from climate scenarios, soil inputs, and management practices), and partly by the price scenarios, which further determines the fertilisation rate. At the *farm-level*, land allocation also needs to be accounted for to explain the changes in yield

once aggregated by crop groups (through changes of the respective area share of different crops in a crop group). At the *regional level*, mean regional yield values of specific crops or crop groups are also determined by the relative area share dedicated by each agent located in the region to each crop or crop group. Figure 4.2 illustrates the regional distribution of changes in averaged regional yield for different crops and crop groups, relative to their median across FADN regions under CTL climate scenario.

The regional yield changes exhibit highly variable and asymmetric distributions across regions, and are hereafter described by their median (*med*), first and third quartiles (*Q1* and *Q3*), and their inter-quartile range values (*DQ*). The European aggregated values (*EU*) are the mean of regional changes weighted by their regional area share in the European total area dedicated to each crop or crop group, and are thus different from median regional change. These figures for all crops and crop groups are gathered in appendix.

Without adaptation of management practices (DUMB scenario), the distribution across regions of yield changes aggregated at the crop group level are highly variable for most crop groups, but their aggregated values at the European level are relatively small (changes in EU values for B1 and A2 are respectively: +1% and +1% for cereals, -13% and -1% for root and tuber crops, and +15% and +15% for oilseed crops). When further disaggregating crop groups into individual crops, the distributions of yield changes are generally more differentiated in terms of both median and inter-quartile values. The crop group aggregates thus hides a significant heterogeneity among crops (e.g. for B1 scenario, *EU* changes are respectively +17%, -31% and +4% for wheats, maize, and barley). When adaptation is accounted for (SMART scenario), a huge gain is obtained: almost all regions experience a positive climate change impact on yield, while median and EU aggregated values are highly increased (around +40% in median value relative to CTL scenario, and around +50% in European aggregated value, see appendix). However, the variability in yield difference to CTL scenario is also enhanced, especially for oilseed crops, and root and tuber crops (their inter-quartile ranges are roughly multiplied respectively by a factor 4 and 2), meaning that the gains from adaptation are unevenly distributed across regions while enhancing the spatial variability in climate change impacts.

After decomposing the adapted scenario in management practices adaptation on one side (AGRO scenario), and further adaptation from land reallocation on the other side (SMART scenario), we found that adaptation gains in crop yield are provided essentially by adopting new management practices (figure 4.2). These adaptations are briefly described in appendix, but an in-depth analysis of these changes is beyond the scope of this article, and will be analyzed in future work. However, it is important to note that irrigation use becomes impossible for about 10% of cases (due to lack of water resources) for both scenarios, but is adopted in other cases (especially in B1 scenario), leading to an overall higher fraction of irrigated crops (from 27% in CTL to 32% in A2 and 42% in B1). Additionally, all cases see an increase in the irrigation intensity, even up to +50% relative to the median intensity in CTL for 25% (A2) to 36% (B1) cases. Changes in the irrigation strategies are thus more differentiated across climate change scenarios concerning irrigation: although the trend in irrigation abandonment is of the same magnitude, irrigation adoption and intensity are more intense for B1 scenario. Both results are not straightforward since precipitations are more reduced in A2 scenario than in B1 scenario.

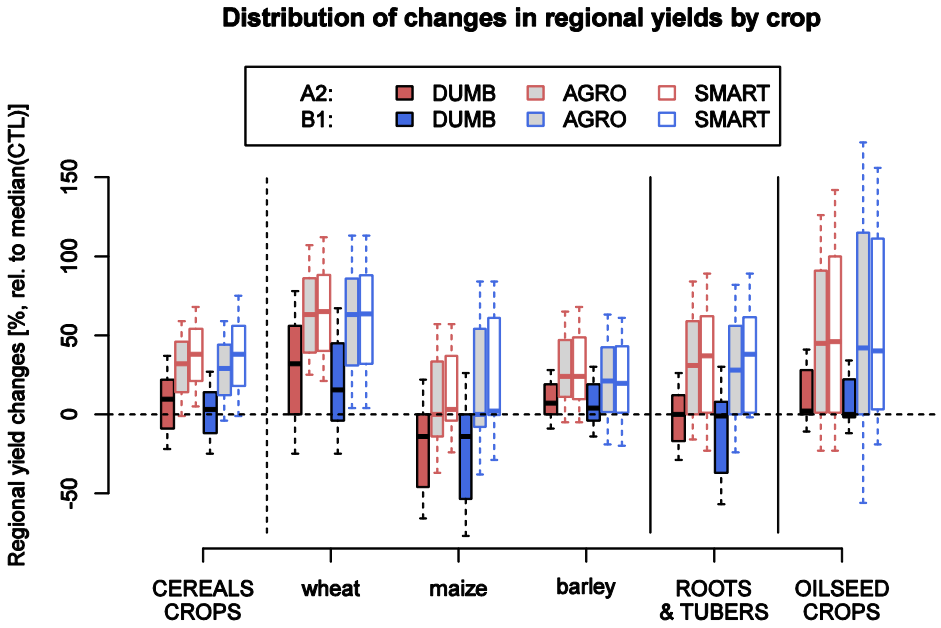


Figure 4.2 - Simulated changes in regional yield values. For each crop group (and each crop for cereals) under DUMB, AGRO and SMART scenarios for both climate change scenarios, the distribution of regional yield changes across EU-15 regions are presented using box and whisker plots. The relative changes are given in percentages of the median regional yield value across EU-15 regions in CTL. The central value, the upper and lower bounds of boxes respectively denotes median, 1st and 3rd quartile values of the regional distribution of relative changes. Lower (resp. upper) whisker shows last points that are within 3rd (resp. 1st) quartiles plus (resp. minus) half the inter-quartile range.

4.3.1.3. Adjustments at the farm level simulated by AROPAj

In response to these heterogeneous yield changes across crops and regions, the agents in the AROPAj model play on three main adjustments: *(i)* changes in the *fertilisation rate* of each crop (as a response to a change in crop valorization of N input, i.e. production function curvature), *(ii)* changes in *animal feeding mix* to satisfy their animal feed needs (between on-farm use of cereal productions, fodder crops, grazing, and purchase of feed concentrates), and *(iii)* changes in their *land resource allocation* to various land uses (mainly among crops, unmanaged land, and pasture) [11]. The first two options are active in all scenarios (DUMB, AGRO and SMART), while the adjustment of land allocation was only activated in the SMART scenario. Table 4.2 presents the statistical estimates of the regional distributions of the previous three adjustments across the 101 FADN regions (see first 2nd paragraph of section 4.3.1.2 for an explanation of *EU*, *Q1*, *med*, *Q3* and *DQ* values).

[11] A last adjustment is the changes in the share of different fertilizer sources (purchasing commercial fertilizer and using on farm manure from animal capital dejections) in the total fertilizer application. This adjustment is active in all scenarios, but won't be analyzed here since it does not significantly play a role. AROPAj can also simulate adjustments in animal herds, but we considered this option to be more of a long term reaction nature, and deactivated it.

Climate scenario / *Adaptation scenario*		B1					A2				
(a) Fertilization rate		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
Fertilization rate	*DUMB*	-4	-12	-2	2	13	3	-3	1	7	10
	Add. AGRO	12	1	8	19	18	10	2	8	13	11
	Add. SMART	8	0	5	13	13	9	0	4	12	12
	SMART	16	0	14	29	29	22	1	16	32	31
(b) Land use		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
Pasture *	*SMART*	-6	-9	-3	0	9	-6	-8	-3	0	8
Cropland *	*SMART*	4	0	2	5	5	4	0	2	5	5
Cereals	*SMART*	*5*	*0*	*4*	*11*	*11*	*5*	*0*	*4*	*9*	*9*
Wheats	*SMART*	*25*	*3*	*12*	*43*	*40*	*24*	*2*	*10*	*37*	*35*
Barleys	*SMART*	*-10*	*-11*	*0*	*6*	*17*	*-5*	*-6*	*0*	*8*	*14*
Maize	*SMART*	*-5*	*-6*	*1*	*18*	*24*	*-12*	*-3*	*1*	*14*	*17*
Root and tuber crops	*SMART*	*7*	*0*	*1*	*14*	*14*	*6*	*0*	*1*	*16*	*16*
Oilseed crops	*SMART*	*5*	*0*	*1*	*13*	*13*	*5*	*0*	*2*	*10*	*10*
Fodder crops	*SMART*	*0*	*-1*	*0*	*1*	*2*	*0*	*-1*	*0*	*1*	*2*
Other *	*SMART*	2	0	1	4	4	2	0	1	3	3
* *= absolute change in % regional UAA*											
(c) Animal feed sources		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
On-farm cereal consumption	*DUMB*	2	-2	0	4	6	5	-2	0	5	7
	Add. AGRO	10	0	3	17	17	8	0	3	19	19
	Add. SMART	29	0	11	48	48	28	0	13	41	41
	SMART	41	5	30	70	65	42	4	26	59	55
Purchased feed concentrates	*DUMB*	-1	-2	0	1	3	-2	-2	0	0	2
	Add. AGRO	-4	-7	-1	0	7	-3	-7	-1	0	7
	Add. SMART	2	-1	0	4	5	2	-1	0	3	4
	SMART	-3	-8	-1	1	9	-3	-7	-1	0	7
Pasture	*SMART*	-23	-39	-12	0	39	-24	-33	-10	0	33

Table 4.2 - Adjustments at farm-level to climate change. For the various scenarios considered, the table presents the statistical properties of the regional distributions across EU-15 regions of relative changes in regional (a) fertilization rate per hectare of agricultural land, (b) land allocation between pasture and cropland, further detailed in crop groups (and further detailed in crops for cereals), and (c) sources of animal feed mix between on-farm cereal consumption, purchased feed concentrates, and grazed pasture. EU, Q1, med and Q3 respectively to changes in the EU aggregated value, the first and third quartiles, and the median of the regional distribution. Except otherwise stated, all figures are expressed as the percentage of change in the regional per hecatre of agricultural land value, relative to the median regional per hectare of agricultural land value in CTL scenario. In section (b), the changes in broad land-use categories (pasture, cropland, and other - regrouping unmanaged or forested land), anoted with a *, are expressed as absolute changes in the share of each land-use category in the regional UAA. In all sections, 'Add. AGRO' and 'Add. SMART' denote the additional changes respectively between AGRO and DUMB, and SMART and AGRO, relative to the median regional per hectare of agricultural land value in CTL scenario.

Fertilization rate. Without adaptation of management practices (DUMB scenario), the changes in fertilizer rate are slightly variable, but the median and aggregated European values are small and opposite in the two climate change scenarios considered. When full adaptation is considered (SMART scenario), the overall fertilization rate is clearly increased (e.g. +16% and +14% in median value respectively in B1 and A2 scenarios). This increase is common in almost all regions (positive values of first quartile), however with an uneven intensity. It is due mainly to a rise in crop valorization of nitrogen input after the adaptation of management practices (add. AGRO), and to a lower extent to further land re-allocation, which promotes fertilizer intensive land-uses (add. SMART).

Land use. The main signal is a *loss of land devoted to pasture* in some regions, leading to an overall loss of more than 20% in the total European pasture area (equivalent to 6% of total agricultural land), converted for approximately two third to arable crops. In very few regions, it is converted to unmanaged land. This signal is equivalent for the two climate change scenarios, and is explained by the fact that the rise in crop yield from management practices adaptation decreases the economic land valorization of grazed pastures relative to arable crops and fodder. This underpinning farm-scale optimization logic is also related to *animal feeding mix optimization* (see next paragraph). Another interesting aspect of land use reallocations is the switch among crops: despite the share of land use is increased for all crop groups, it is not equally distributed among all crops within each crop group. For example, cereals area gain about 5% at the European aggregated level, but while the area dedicated to wheat is increased by roughly 25%, the area dedicated to maize (-5% in A2, -12% in B1) and barley (-10% in A2, -5% in B1) are declining. This highlights the role of *substitutions between crops*, captured by the AROPAj model through land allocation constrains reflecting both the agronomic rotation possibilities and the typology bindings: hence crop substitutions are allowed within crop groups (but limited by agronomic possibilities) and among crop groups (within typology bindings). This phenomenon is responsible for significant yield increase at the crop group level (up to 25% of the fully adapted gain, for cereals, see appendix).

Animal feeding mix. In case no adaptation occurs (DUMB scenario), on farm consumption of cereal production follows roughly the changes in cereal yields: the regional distribution of its change is variable but neutral across Europe (where yields increase, on-farm cereal consumption do so but in lower proportions). Expenditures of feed concentrates are thus varying across regions, but the overall effect is a small reduction at the European aggregated level. For agents having herds, the changes in cereal production imply a change in on-farm used vs. marketed shares of production. Where production decreases, the feed equivalent from on farm cereal consumption is replaced by purchasing concentrates, and vice versa. Once agronomic adaptations are accounted for (AGRO scenario), cereal production is clearly increased (by 30% at the European level). The major part of that rise in production is sold on the market, but the share of on-farm cereal consumption in the feeding mix clearly increases and feeding expenditures are finally reduced (-4% at the European level). The picture is getting more complex when land reallocation is allowed (SMART scenario): for agents having herds, allocating land to crops or fodder becomes more profitable than allocating land to pasture, even if it means that the feed equivalent needs to be replaced by alternative sources. It is illustrated by the rise in both the share of on-farm consumption of the cereal production gain (+28% / +29% at the European level, compared to +15% for marketed production), and in feed concentrates expenditures (+2% at the European level).

4.3.2. Economic and environmental consequences for European agricultural supply

4.3.2.1. Agricultural productions and gross margins

In our modelling framework, only vegetal activities are directly affected by climate change. Although the economic value of animal activities is also affected by climate change and adaptations through changes in sources and costs of animal feed, their production levels are identical to present climate. We will thus only detail changes in production levels of vegetal activities.

Table 4.3 presents the changes in production levels (per hectare of agricultural land). Without adaptation (DUMB scenario), the changes in production for each crop group follow yield changes and are thus variable across FADN regions while relatively modest from the aggregated point of view. Adaptations allow the changes in regional production levels to be positive almost everywhere (SMART scenario). At the European level, production levels are thus increased by roughly 50% to 80% for all crop groups, with a higher increase for roots, tuber and oilseed crops. This increase is not equally distributed across FADN regions, and the inter-quartile range of production changes is highly increased. This gain in production levels is provided by the adaptation of management practices solely for two third, and by further land reallocations for one third (not shown here).

These significant changes in productions and in the underlying farm-scale re-organization of production systems lead to changes in the productive value of agricultural land. Table 4.3 also presents the change in gross margin per hectare at the aggregated European level and its regional distribution for the various climate change and adaptation scenarios. If not accounting for adaptation (DUMB scenario), climate change induces a change in land productive value rather neutral at the aggregated scale (0% for median regional changes in both climate change scenarios) but variable: 50% of the regions see a change between -11% to +5% (for B1 scenario) or -6% to +4% (for A2 scenario), and 95% of the regions see a change within -36% to +43% (B1) and -32% to +30% (A2). After full adaptation (SMART scenario), there is general gain in land productive value (95% of the regions are between -6% to + 100% for B1 and -6% to +114% for A2). At the European aggregated level, this is roughly equivalent to a +20% increase for both scenarios. In particular, autonomous farm-scale adaptations allow to reduce the number of regions experiencing a negative impact from 35 (A2) or 41 (B1) to only 4 regions. Land reallocations contribute solely to about one tenth to the adaptation gain at the aggregated level (not shown here).

Climate scenario / *Adaptation scenario*		B1					A2				
(a) Production levels		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
Cereals *	*DUMB*	4	-8	1	15	23	13	-5	5	19	24
	SMART	53	10	42	79	69	55	13	43	76	63
** marketed part of production only*											
Roots & tuber crops	*DUMB*	-13	-34	0	6	40	4	-13	0	14	27
	SMART	51	0	17	116	116	55	0	37	116	116
Oilseed crops	*DUMB*	14	0	0	14	14	10	0	0	23	23
	SMART	75	0	13	178	178	77	0	19	197	197
(b) Gross margin per hectare		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
Gross margin/ha	*DUMB*	-2	-11	0	5	16	3	-6	0	4	10
	SMART	18	4	15	27	23	19	6	16	29	23
(c) Impacts on GHG emissions & water resource use		*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*	*EU*	*Q1*	*med*	*Q3*	*DQ*
Total non-CO_2 GHG emissions	*DUMB*	0	-4	-1	1	5	1	-1	0	3	4
	SMART	6	0	4	9	9	7	0	5	10	10
Vegetal based activities	*DUMB*	-4	-12	-2	2	14	3	-3	1	7	10
	SMART	16	0	14	29	29	22	1	16	32	31
Animal based activities	*DUMB*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SMART	-2	-3	0	0	3	-2	-3	0	0	3
Irrigation volume #	*DUMB*	12	-1	0	1	2	-19	-5	0	0	5
	SMART	318	2	15	75	73	95	0	3	21	21
# relative to the 95th quantile of CTL regional values											

Table 4.3 - Consequences for European agricultural supply. Statistical estimates of the distributions of regional changes in the various scenarios are presented for (a) production levels for the different crop groups, (b) gross margin per hectare, and (c) the environmental & resource use impacts, respectively in terms of non-CO_2 GHG emissions (further differentiated in emissions from animal and vegetal based activities), and in terms of irrigation volume. All figures are expressed in percentages of changes relative to the median regional value in CTL scenario, except for the irrigation volume (for which changes are relative to the maximum CTL irrigation rate, 95th quantile of regional values in CTL scenario).

4.3.2.2. Environmental and water resource impacts

In this section, we analyze the consequences of previously detailed changes in the European agricultural supply, in terms of non-CO_2 GHG emissions and water resource use. The changes in non-CO_2 GHG emissions per hectare of agricultural land (further differentiated into emissions related to vegetal and animal based activities), and the changes in irrigated volume are presented in Table 4.3.

Non-CO_2 GHG emissions. The emissions from vegetal activities are mainly driven by fertilization, which experiences small and almost neutral changes at the European level without adaptation. Despite small changes in animal feeding mix, the emissions from animal activities are stable without adaptation, and total non-CO_2 GHG emissions are thus weakly affected by climate change solely. When full adaptation is considered (SMART scenario), a moderate increase occurs at the European level (+6% to +7%). This increase mainly results from an increase in the emissions from vegetal activities (+16% to +22% at the European level), partially moderated by a decrease in those from animal activities (-2% at the European level). The former increases due to higher fertilization rates: as detailed in section 4.3.1.2, the adaptation of management practices triggers higher fertilization rates, and fertilizer intensive land uses are increased once land is reallocated. In this context, a more significant change of the animal feed mix occurs (as detailed in section 4.3.1.2), and the emissions from both enteric fermentation and manure management are decreased in the regions where the feed equivalent from lost grazed pastures are substituted by on farm cereal consumption and purchased feed concentrates.

Irrigation. As shown on table 4.3, the volume of water consumption used for irrigation purposes significantly changes when climate change is considered solely (DUMB scenario), but in an opposite direction for the two climate change scenarios. It increases by 12% at the European aggregated level in B1, while it decreases by 19% in A2. However, once we account for autonomous adaptations (SMART scenario), the changes in water consumption are more dramatic: in both climate scenarios, almost all regions use more water than in the present climate. In B1 and A2 scenario, median increases are respectively +15% to +3% of the maximum regional irrigation rate in CTL[12]. As seen in section 4.3.1.2, 15% to 5% additional "crop-agent" cases (respectively for B1 and A2 scenarios) use irrigation compared to CTL scenario. At the European level, the total irrigation volume is thus roughly doubling (A2 scenario) to quadrupling (B1 scenario).

These results are quite striking, firstly because water consumption increases dramatically when adaptation is accounted for, and secondly because the need for irrigation is systematically higher in B1 than A2 (with or without adaptation), although both the reduction in precipitation and the increase in temperature that occur in Mediterranean regions are less intense in B1 than in A2. Indeed, the differentiated changes in the ambient atmospheric CO_2 concentration (underlying climate change scenarios, respectively 533 and 724 ppm for B1 and A2 scenarios) need to be considered for a consistent explanation. Both the dramatic increase of irrigation needs and its differentiation between the two climate scenarios cannot be explained without confronting the changes in yields to the simulated changes in crops' *water-use efficiency*, defined as the quantity of plant biomass produced per unit of water transpired, which is expected to increase with atmospheric CO_2 concentration (Easterling et al., 2007). To integrate the changes of this quantity at the regional level, we derived a water-use efficiency

[12] defined as the 95th percentile of regional irrigated volume per hectare of agricultural land in CTL scenario, i.e. 61 mm.y^{-1} per hectare of agricultural land.

index per hectare of agricultural land[13]. Figure 4.3 presents the regional distribution of its change due to climate change solely (DUMB scenario), then the additional changes due to adaptations (AGRO and SMART additional changes), and finally the change including climate change and full adaptation (SMART scenario). With the underlying changes in the ambient atmospheric CO2 concentrations, the water-use efficiency of crops increases more in A2 than in B1 (respectively +45% and +19% for median changes across FADN regions). This explains the differentiation between A2 and B1 scenarios without adaptation concerning changes in the irrigation volume. But unlike crop yields, water use efficiency does not change with adaptation. Since yields are heavily increased with adaptation, the underlying additional amount of water resource needed is related to water-use efficiency: the lower the water use efficiency is, the higher water consumption increases. As water use efficiency increases less in B1 scenario, much more farm types adopt irrigation under this scenario, and the irrigation intensity is enhanced.

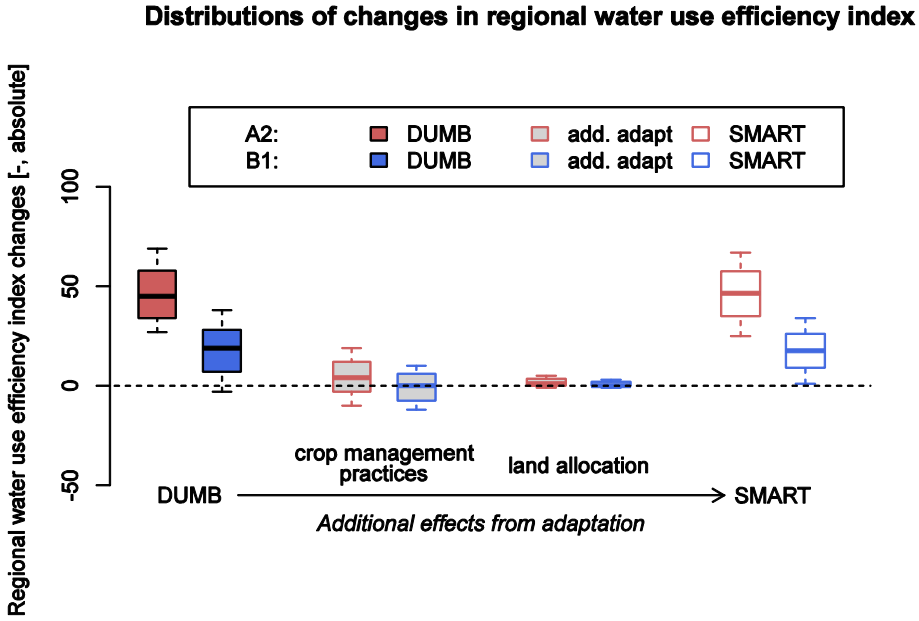


Figure 4.3 - Regional distributions of changes in the water use efficiency index per hectare of agricultural land. Box and whisker plots display the statistical estimates of the regional distribution of relative changes under each climate change (see legend of figure 4.2). *DUMB* (resp. *SMART*) refers to absolute changes in the index between climate change without (resp. with) adaptation scenarios differences, and CTL scenario. The gains from adaptation (*add. adapt*) are decomposed in additional changes to the DUMB scenario due to the adaptation of respectively management practices (difference between AGRO and DUMB scenarios) and then further land reallocation (difference between SMART and AGRO scenarios).

[13] This index is constructed as follows: first the crop differences are homogenized by normalizing the water-use efficiency (in tons of fresh matter per mm of transpiration) of each crop by its 9th decile value under CTL scenario. Then, an average farm-level value is constructed by computing a value per hectare of irrigated area, summing the crop specific water-use efficiencies of irrigated crops weighted by their area share. Finally, the regional level index is computed by the same way (as the sum of farm level water-use efficiencies weighted by the irrigated area of each farm-type).

4.3.3. Main spatial patterns

Figure 4.4 maps the regional changes in cereal yields for B1 climate change scenario, (a) without and (b) with accounting for autonomous adaptations, as well as the evolution of pasture due to land reallocations (c). Without adaptation, the geographical pattern of yield changes fit into the common picture of a latitudinal gradient in climate change impact: negative impacts are obtained mainly in the Mediterranean countries (Greece, Italy, Spain, Southern France) while the positive impacts are located in Northern and Central Europe (North-East France, UK, Austria, the Netherlands, Denmark, Germany, South Sweden and Finland). North-West France is departing from this picture by experiencing a negative impact, mainly due to a reduction in almost all yields from hydric stress and low nitrogen absorption. In the case of A2 scenario, the patterns are similar despite few minor differences: Central and southern Spain experience a more neutral impact, while Austria, the UK and central France experience a positive gain. The difference between climate change scenarios are less pronounced once autonomous adaptations are accounted for (figure 4.4b): while the Mediterranean countries are experiencing a more contrasted neutral to positive gain (except in very few regions), the latitude bandwidth from Northern Italy to South Sweden is experiencing a highly positive gain (almost superior to +33% everywhere). The geographical distribution of the other crop groups presents roughly the same spatial patterns (not shown here), however with some marked differences in the spatial patterns. The high reductions of pasture area are obtained mainly in the same bandwidth experiencing generalized high gains in cereal yields, encompassing regions from Northern Italy to Southern Sweden.

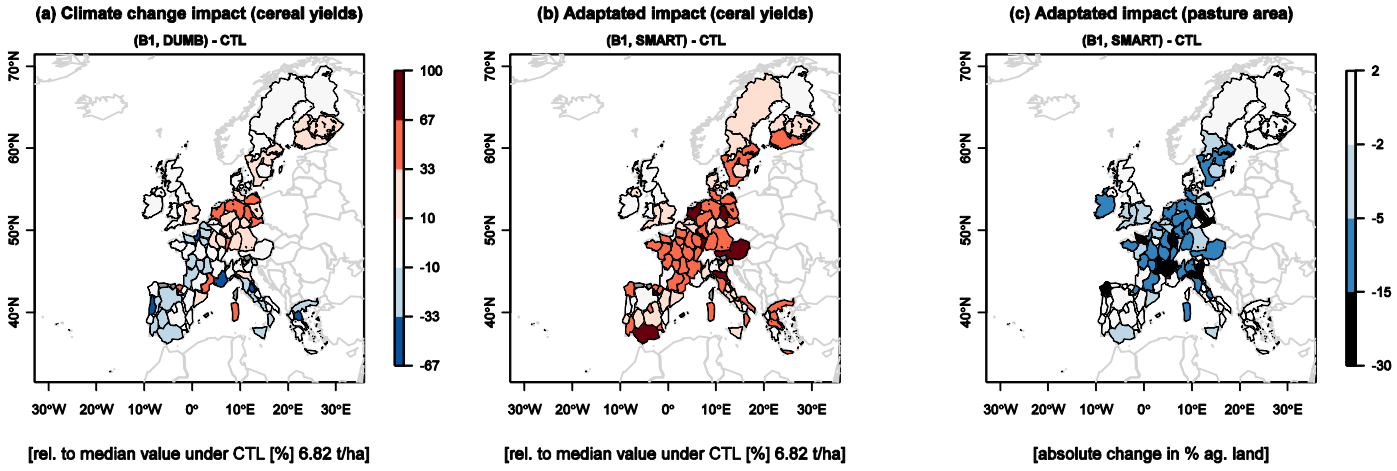


Figure 4.4 - Maps of climate change and adaptation impacts on cereal yields and pasture area. The changes in cereal yields (a) without adaptation (DUMB scenario) and (b) with adaptation (SMART scenario) are relative to the median regional yield value under CTL (6,82 t/ha). The changes in pasture area share (c) are absolute changes expressed in percentages of the regional total agricultural area.

The changes in regional per hectare gross margin values are mapped in figure 4.5 (b), under the B1 scenario (with or without adaptation, respectively left and middle panels, and the impact of adaptation in right panel). The changes are normalized by the median regional per hectare gross margin

value under CTL scenario (1.23 k€/ha) to identify the hotspots of absolute changes across EU-15 regions. Without adaptation, the changes in the productive value of land follow the picture of a latitudinal gradient in climate change impacts over EU-15, with a generalized negative impact in Mediterranean countries (Spain, Portugal, Italy, Greece) and Austria, and neutral to positive impacts northwards. While in B1, Belgium and Northern France experience a severe negative impact, these regions as well as the Iberian Peninsula experience a more neutral impact in A2 scenario (not shown). Autonomous adaptations allow almost all regions to experience a neutral to positive impact, with a much higher gain from climate change in the central EU-15 latitude bandwidth.

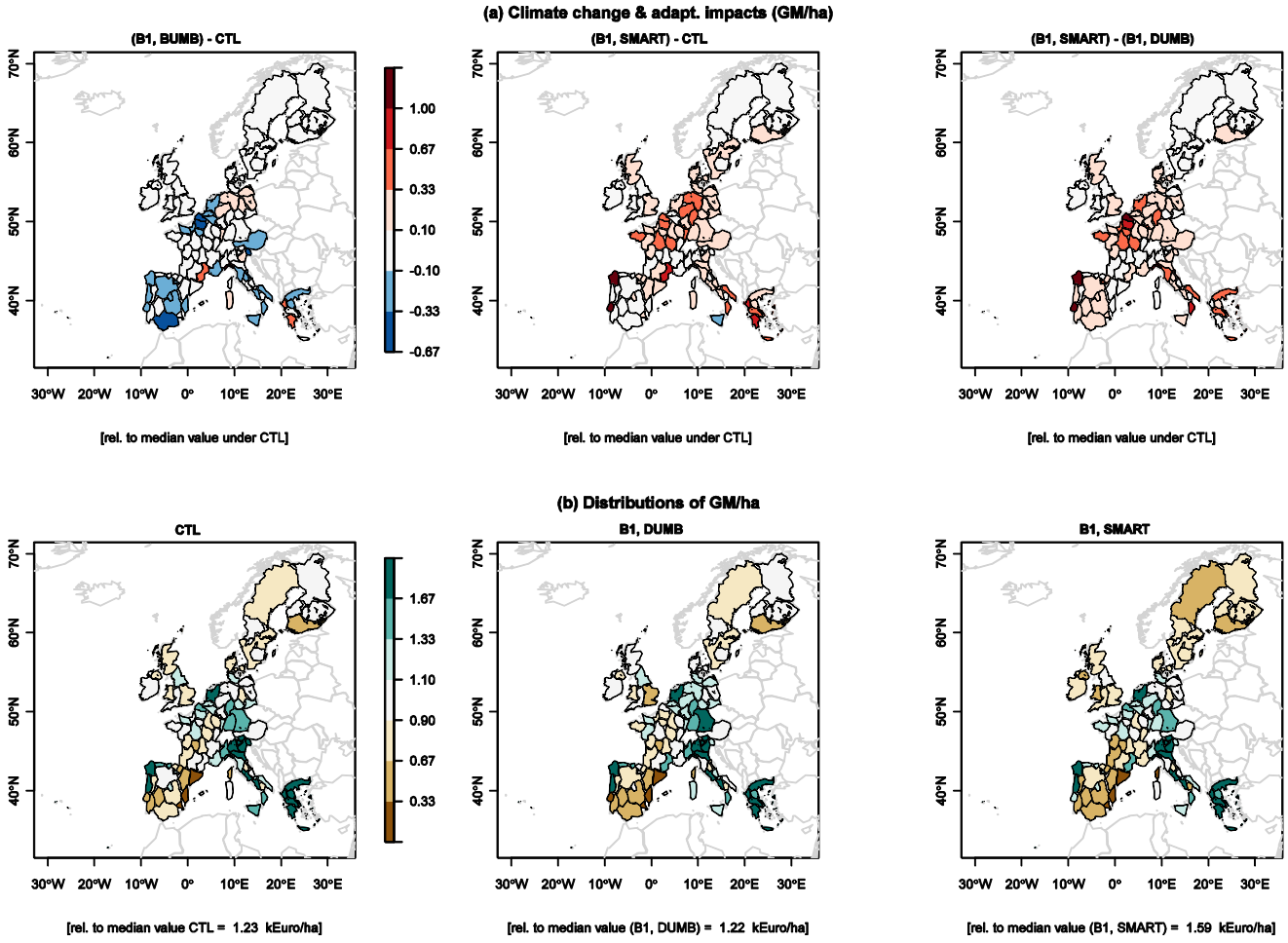


Figure 4.5 - Maps of gross margins/ha. (a) Changes due to climate change and adaptation in regional values of gross margin per hectare of agricultural land (relative the median value in CTL). Maps display first the effect of climate change without adaptation ((B1, DUMB) - CTL, left panel), then with full adaptation ((B1, SMART) - CTL, middle panel), and finally the role of adaptation (B1, SMART - DUMB, right panel). (b) Distributions of gross margins per hectare of agricultural land regional values relative to their median value in each scenario are mapped for CTL (left panel) and for SMART and DUMB scenario under B1 climate change (respectively middle and right panel).

To test if these changes could significantly alter the current geographical gradients in regional land productive value, we also present in figure 4.5 (a) the distributions of regional per hectare gross margin values in present climate and in the case of B1 climate change without or with accounting for

autonomous adaptations (left, middle and right panels, for respectively CTL, DUMB, and SMART scenarios). The regional values of per hectare gross margins are normalized by the median value across FADN regions for each scenario. Without accounting for autonomous adaptations, climate change weakly enhances the already high geographical disparities in land productive value across EU-15 regions. Once adaptations are accounted for, the gradient between low value regions (Spain, Nordic countries) and the central Europe latitude bandwidth is further enhanced. However, the major effect of adaptation is to enhance the median regional per hectare gross margin value (from 1.23 k€/ha in CTL to 1.59 k€/ha in SMART scenario), while climate change solely has no effect (1.22 k€/ha in DUMB scenario).

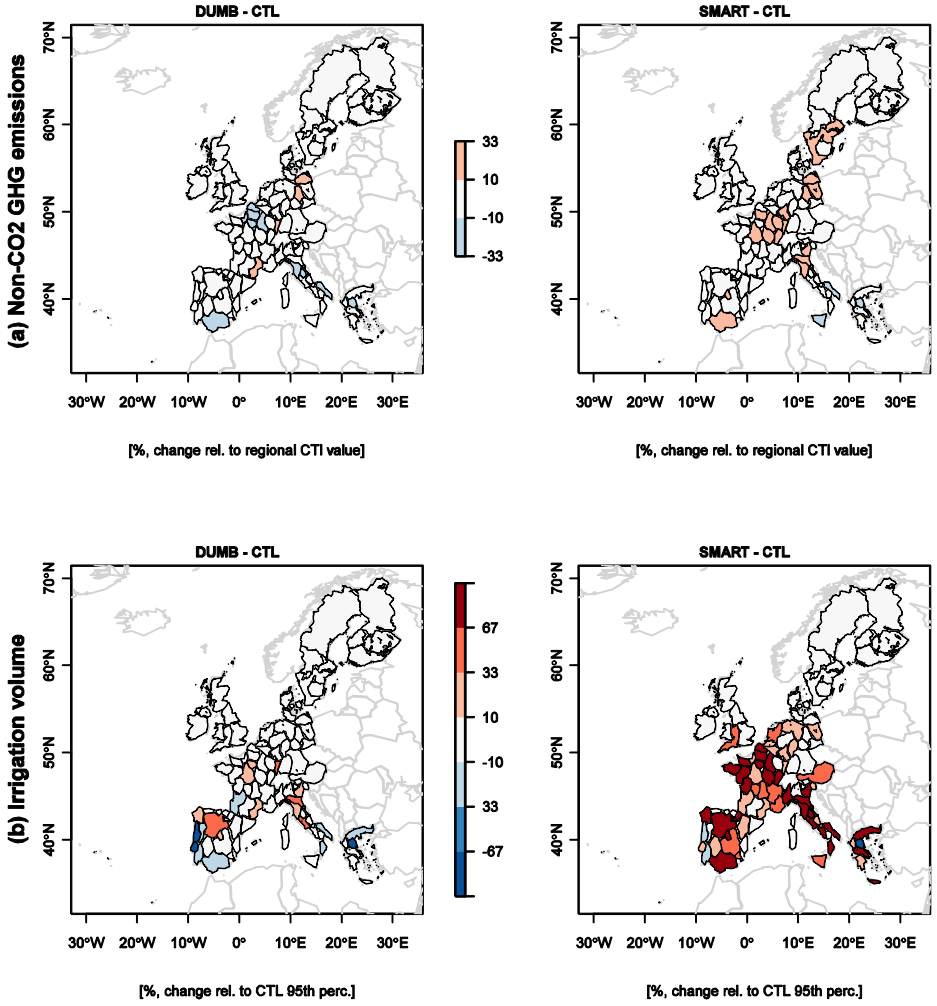


Figure 4.6 - Map of changes in regional values of (a) non-CO_2 GHG emissions and (b) irrigation volume. Upper panels display the map of regional changes in non-CO_2 GHG emissions under B1 scenario relative to CTL regional values. Lower panels map these changes for the irrigation volume, but relative to the 95th percentile of CTL regional values (61 mm/ha). For each variable, left and right panels give the effect of climate change respectively without (DUMB) and with adaptation (SMART).

Figure 4.6 presents the regional changes in non-CO_2 GHG emissions (upper panels) and in the irrigated flux (lower panels) per hectare of agricultural land for the B1 climate scenario, without or with adaptation (respectively left and right panels). We normalized the regional changes in each scenario by a

reference in CTL scenario in order to identify hotspots of absolute changes[14]. Without adaptation, the emissions of non-CO_2 GHG increase (respectively decrease) in the regions where crop yield increases (resp. decreases), while the irrigated volume changes in few regions. When accounting for autonomous adaptations, the increase in non-CO_2 GHG emissions is more general, following patterns of crop yield increases. The increase in the irrigation volume follows the spatial patterns of the increases in crop yield only up to the latitude of Northern France. While relatively similar for non-CO_2 GHG emissions, the patterns of changes in the irrigation volume are significantly different for A2 climate change scenario: the irrigation volume is generally stable or sometimes decreases in regions already irrigated under current climate (without adaptation). When accounting for adaptation, the irrigation intensity increases only in Mediterranean countries (Spain, Italy, Greece), while remains stable northwards.

[14] However, while we use the median value of regional non-CO_2 GHG emissions across EU-15 as a reference, the 95th percentile of regional irrigated volumes per agricultural hectare in CTL scenario was preferred to the median value, as the regional distribution of the irrigation fluxes is much more contrasted in CTL than for non-CO_2 GHG emissions. All changes in the irrigation volume per hectare of agricultural land are thus relative to the maximum value in CTL.

4.4. DISCUSSION

In this section, we discuss the consistency of our results with respect to existing literature (section 4.4.1) and their implications for both the future of European agricultural supply, and for climate change impact assessments (section 4.4.2).

4.4.1. Consistency of the modelling framework results

Simulated agricultural supply under current climate. Preliminarily to this assessment, we assessed the performances of our modelling framework at representing EU-15 agricultural supply under the CTL scenario, and evaluated them as satisfactory (Leclère et al., n.d.). However, it has to be noticed that CTL scenario is characterized by slightly overestimated crop yields compared to FADN values, explained by the fact that yield reducing factors, such as biotic stress (pests, diseases, weeds) and damage from exposure to high ozone concentrations are not included. It leads to a slightly overestimated share of land allocated to crops, and finally slightly overestimated production levels. But this bias should affect all scenarios in the same way, and is not expected to hamper the consistency of our results.

Simulated climate change impact and adaptation at field scale. Our results rely heavily on the changes in crop yields simulated by STICS crop model, under highly heterogeneous inputs with respect to climate, soil, and management practices. Although the net effects of the various processes involved in climate change impact on the soil-plant system are highly uncertain (see e.g. (Challinor et al., 2009; DaMatta et al., 2010)), we have reasons to believe that our modelling framework do perform reasonably well with respect to existing methods. The STICS crop model itself is a well evaluated generic crop model, and has furthermore been compared to alternative crop models of various complexity levels for climate impact assessment at French level under CLIMATOR national research[15]. We therefore believe that we capture significant sources of spatial heterogeneity, and that the high simulated sensitivity to management practices makes sense. The considered adaptation options in management practices (cycle length or timing management, preceding crop, irrigation adoption) are rather commonly implemented throughout Europe (e.g. (Olesen et al., 2011)) but mostly studied separately. Here we assume that the best combination is employed among all the possibilities offered, and we finally expect the effect of agronomic adaptation to be high, while possibly overestimated because we didn't consider any specific change in associated costs. Finally, the order of magnitude of both climate change and agronomic adaptation effects on crop yield are in line with reported estimations (e.g. (Ewert et al., 2005; Fischer et al., 2005), (Alcamo et al., 2007) section 4.7, (Easterling et al., 2007), figure 5.2).

Simulated changes in water-use efficiency, and irrigation availability and intensity. In our results, the increase in atmospheric CO_2 concentration (underlying changes in climate) heavily increases the role of water resource in agricultural production by significantly altering the amount of water needed to support an increment of biomass. The simulated gains in water-use efficiency associated with the two climate change scenarios considered are important and contrasted between scenarios. These results rely on relatively well understood processes of plant physiology reaction to changes in the atmospheric

[15] freely available at http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=76705&p1=02&p2=04&ref=17597

carbon dioxide concentration[16], and we think that the processes underpinning the changes in water-use efficiency are robust. We constrain irrigation availability per crop with respect to resource availability (see section 4.2.2), thus limiting roughly 10% of irrigation adoption cases (mainly in Mediterranean countries) in the context of climate change. However, there is no restriction concerning the widespread adoption of irrigation for several crops at farm level if the water resource constrain is satisfied at the plot level for each crop. Our experiment may thus allow possibly unrealistic development of irrigation, but future water resource availability and use is still poorly addressed in the literature, and very few studies are available for comparisons. For example (Fader et al., 2010) estimated that changes in virtual water content (i.e. the inverse of crop water efficiency) of maize and wheat would be significantly decreased (i.e. the water-use efficiency would be increased) by climate change (including changes in atmospheric CO_2) over Europe under the A2 SRES scenario. But their future area of irrigation availability is identical to the one in present climate, the simulated changes in irrigation intensity are not detailed for Europe, and a contrasted SRES scenario has not been included. This issue has however been identified as a key issue under future climate change, since water resource availability should be seriously altered by climate change (Falcon & Betts, 2011).

Simulated climate change impact and adaptation at farm scale. Recent in-depth analyses of FADN data suggest that alongside environmental and management factors, producer socio-economic properties (e.g. production orientation and economic size) are also important determinants through farm-scale organization (Reidsma et al., 2007, 2010). To this respect, the design of our modelling framework, accounting for farm-scale organization and considering a representative typology of producers at regional level, strengthens our confidence in its realism. The simulated role of crop switching at farm-level as an adaptation tool to changes in various crop yields under climate change is noteworthy, and has been previously explored with econometric models for South America (Seo and Mendelsohn, 2008), Africa (Kurukulasuriya and Mendelsohn, 2008) or US region (Antle et al., 2004). The substitutions among sources of animal feed are less explored in the literature, and we do not consider changes in either grassland or fodder crop productivities. However, these sources of animal feed should also see their yields altered by climate change. For example, (Hermans et al., 2010) simulated a small increase in grassland productivity by 2050 (median relative change over regions of about 10% from climate change and CO_2 solely), mainly on Northern EU due to water stress constrains in Southern Europe. Our simulated substitutions among animal feed sources and the reduction in pasture area may thus be slightly biased. However, the simulated gains in crop productivity (after adaptation) are very high compared to the increase in grassland productivity found by (Hermans et al., 2010), and our simulated reduction in pasture may remain consistent. Furthermore, the simulated effects of adaptation rely much more on the use of alternative management practices than in land reallocation, and the overall conclusions on changes in production levels, gross margins, non-CO_2 GHG emissions and water use should thus be weakly affected.

[16] When [CO_2] rises, at the stomata level the carbon assimilation per unit of energy available for photosynthesis is increased while plant transpiration is reduced. This process has long been identified, and have more recently been confirmed to be true at the canopy level from Free-Air CO_2 Enrichment experiments (Leakey et al., 2009). This process is implemented in the STICS model combining two well established formulations (Idso, 1991; Stockle et al., 1992)

4.4.2. Constrains on future European agricultural supply and on climate change impact assessments

This study provides the first evaluation of the role of farm-scale autonomous adaptations to climate change at the European scale. However, in the scope of diagnosing the evolution of future European agricultural supply, it has limitations. We did not appraise important effects such as changes in agricultural products demand or input supply, or technology. We also did not consider changes in the structure of the agricultural supply (e.g. evolution of agricultural area, number and typology of producing agents, production costs, and producer resources). It implies that since the structure of the European agricultural supply will be different by the end of the century, our estimate remains to be transposed in this future context. Nonetheless, we believe our findings to be relatively robust, because they rely heavily on well established and already widely diffused adaptation options (Olesen et al., 2011). Another missing but crucial information is a complete uncertainty assessment, quantifying and hierarchizing the main sources of uncertainty. However, such a diagnosis would require a huge effort, beyond the scope of this paper.

The role of such farm-scale autonomous adaptation has been missing in the climate change component of the previously cited projection studies. These studies generally acknowledge climate change to be an overall small driver of change for European agricultural supply compared to technological progress and the evolution of international demand for agricultural good (e.g. (Ewert et al., 2005)), international trade flows and domestic policies affecting the agricultural sector (van Meijl et al., 2006; Hermans et al., 2010). After adaptation, climate change may trigger changes in production levels more important than diagnosed in those studies, and more comparable to their estimated change due to technological progress, and finally possibly triggering important market feedbacks.*

Regarding climate change impact and vulnerability assessment literature, this study provides interesting insights. First, from an historical perspective, the potential of autonomous adaptations to alleviate negative impacts or enhance benefits from climate change has been thought to be high (e.g. (Easterling et al., 2007)), but has not been evaluated at the European scale. Secondly, it highlights some dependencies across scales: for example while the computation of agronomically adapted crop yields requires a high spatial resolution to capture its heterogeneity, we found that emerging properties at continental scale (e.g. production levels) are also dependant on land optimization made by land owners specialized in terms of production orientation. Thus any change in both land use and production levels diagnosed while ignoring the specialization of land owners will provide different results.

It could be argued that our approach is limited in the sense that linear mathematical programming profit maximization models based on perfect information inaccurately reflect the decisions of real-world farmers. It is of particular importance, since many barriers to effective adaptation have been identified, and the scientific literature on climate change impact, adaptation and vulnerability has put the breaking of these barriers to adaptation adoption on top of the agenda (Füssel and Klein, 2006; Howden et al., 2007). However, the huge gap between the different processes needed to fully evaluate the impact of climate change (e.g. from farm-gate to international trade flow regimes) and promote sustainable pathways for planned adaptation calls for a variety in approaches in which our study finds its place. It specifically supports the incorporation of such farm-level optimization models (i.e. the so-called ‘smart-farmer’ approach) as a common ground between in-situ participatory approaches and top-down larger-scale assessments (Füssel and Klein, 2006; Kenny, 2011). For example, another important issue

identified by the scientific literature on adaptation is the idea of 'mainstreaming', highlighting the need to frame adaptation studies in the context of existing policies governing the agricultural sector. To this respect, our model has a relatively fine representation of CAP implication for farmers, and we found no significant differences in the role of autonomous adaptations under the previous CAP implementation (Agenda 2000, not shown here), because they rely mainly on the adaptation of management practices. However, future reforms of European policies targeting either management practices or environmental impacts of agricultural production (e.g. through wider eco-conditionality to CAP premiums, or stronger constrains on water resource and pollution through the EU Water Framework Directive) could constrain adaptation possibilities.

4.5. CONCLUSION

To our knowledge, this paper provides a first estimate of the role of farm-scale autonomous adaptation to climate change, consistent at the European scale while detailed across European regions. It relies on a modelling framework designed to capture the effect of high spatial heterogeneity in both the environmental and socio-economic structural determinants of European agricultural systems.

The overall dominant picture of the simulated climate change impact on EU-15 agricultural supply follows a latitudinal gradient, with Southern regions being more negatively impacted or less favored (accounting or not for adaptation) than central and northern European latitudes. Although the response is variable among major European crops, autonomous adaptation makes climate change much more beneficial to crop yield, especially in central Europe (i.e. roughly from Northern Italy to South Sweden) where reductions in pasture could occur in favor of cropland. It significantly increases production levels and finally allows a general shift in the impacts of climate change from a situation in which the European aggregated impact on gross margin is small (with winners and loosers) to a situation in which almost all regions gain from climate change with a high aggregated gain. To a lower extent, it also further enhances the small increase induced by climate change in the current geographical disparities in per hectare gross margins across European regions.

However, this high benefit from autonomous adaptation may be at the expense of a moderate increase in non-CO_2 GHG emissions, and much larger increase in water consumption. Indeed, water-use efficiency increases due to climate change only, but in lower proportion than the final gains in crop yield after adaptation (especially for low increases in atmospheric carbon dioxide concentration).

In light of our results, we believe that the previous literature has underestimated the impact of climate change by only partially accounting for farm-scale autonomous adaptations. Firstly, the yield of various crops can be significantly enhanced under climate change through the adaption of their management practices. Secondly farm-scale reorganizations allow farmers to fully benefit from the new possibilities offered by climate change, building upon the various crop responses to climate change while keeping their specialization in terms of production orientation. Due to both the resulting high increase in production levels at the aggregated level and their dependency to the regional distribution of agricultural systems, the inclusion of such adaptations in larger-scale models should change both market equilibriums and land-use changes between agriculture and the other sectors.

Finally, our approach can provide a common ground between: (i) the larger-scale climate change impact, adaptation and vulnerability assessment tools needed to consistently project the impacts of

global changes on the agricultural sector over long time scales, and (ii) smaller-scale participatory approaches identified as crucial to trigger effective adaptation to climate change, and to design appropriate policies aiming at enhancing the adaptive capacity of agricultural systems. We believe that a significant research effort is needed to develop and implement such bridges among the existing approaches in order to provide useful information for policy design.

APPENDIX - Detail of changes in regional yield values by crop, and management

Crop	Climate scenario / Adaptation scen.	B1 EU	B1 Q1	B1 med	B1 Q3	B1 DQ	A2 EU	A2 Q1	A2 med	A2 Q3	A2 DQ
CEREALS	*DUMB*	1	-12	3	14	26	1	-8	10	22	30
	add. AGRO	31	9	24	39	30	28	9	21	38	29
	add. SMART	9	0	4	11	11	10	0	3	10	10
	SMART	42	18	38	56	38	39	21	38	54	33
wheat	*DUMB*	11	-4	17	45	49	17	0	32	55	55
	add. AGRO	44	14	34	59	45	37	12	32	50	38
	add. SMART	4	0	0	1	1	5	0	0	1	1
	SMART	59	34	63	87	53	59	40	64	87	47
maize	*DUMB*	-24	-54	-14	0	54	-31	-46	-14	0	46
	add. AGRO	31	0	16	63	63	21	0	15	47	47
	add. SMART	13	0	0	4	4	18	0	0	3	3
	SMART	20	-1	2	62	63	7	-4	4	36	40
barley	*DUMB*	8	-4	4	19	23	4	0	7	19	19
	add. AGRO	18	1	9	24	23	27	2	12	29	27
	add. SMART	-1	0	0	1	1	-3	0	0	0	0
	SMART	25	1	20	43	42	27	10	24	48	38
ROOTS & TUBERS	*DUMB*	-13	-33	0	8	41	-1	-18	0	12	30
	add. AGRO	47	2	21	59	57	39	6	24	59	53
	add. SMART	9	0	0	4	4	4	0	0	2	2
	SMART	43	1	37	61	60	42	1	36	62	61
potato	*DUMB*	-5	-45	0	6	51	-1	-18	0	10	28
	add. AGRO	44	0	13	72	72	51	0	30	86	86
	add. SMART	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0
	SMART	44	0	20	89	89	53	0	30	94	94
sugarbeet	*DUMB*	-20	-45	0	14	59	-1	-26	4	20	46
	add. AGRO	49	8	19	88	80	29	6	15	42	36
	add. SMART	2	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
OILSEED CROPS	*DUMB*	15	-2	0	23	25	15	0	3	30	30
	add. AGRO	42	0	32	80	80	47	1	30	72	71
	add. SMART	5	0	0	2	2	3	0	0	1	1
	SMART	61	3	47	112	109	65	2	48	99	97
rapeseed	*DUMB*	22	-4	10	40	44	21	-2	20	50	52
	add. AGRO	56	22	52	92	70	59	21	49	78	57
	add. SMART	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	SMART	81	46	92	116	70	83	42	75	118	76
sunflower	*DUMB*	2	0	2	18	18	4	-2	2	20	22
	add. AGRO	22	0	23	58	58	36	0	20	65	65
	add. SMART	5	0	0	2	2	4	0	0	1	1
	SMART	29	0	34	77	77	43	1	40	68	67
soybean	*DUMB*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	add. AGRO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	add. SMART	2	0	0	0	0	0	-2	0	0	2
	SMART	2	0	0	0	0	0	-2	0	0	2

Table 4.A1 - Distribution of changes in regional yields for major crops, in different scenarios. The table displays the European aggregated value (*EU*), and the 1st quartile, median, 3rd quartile and interquartile range (resp. *Q1*, *med*, *Q3* and *DQ*) values of the distributions across regions of changes in regional yields, by crop and crop groups. The figures are in percentages of changes for each scenario difference, relative to the median regional yield in CTL scenario for each crop or crop group. *DUMB* and *SMART* describe changes between future and CTL climate, respectively without and with full adaptation for A2 and B1 scenarios. *add. AGRO* denotes the difference between AGRO and DUMB (effect of management practices adaptation, additional to climate change effect), and add. SMART denotes the difference between SMART and AGRO (effect of land reallocations, in addition to climate change and adaptation of management practices).

	Area share	PrecCrop [%]		IrriUse	IrriVol [mm/ha]		% failed		Δ PrecCrop [%]			Δ CycChange [%]					Δ IrriUse [%]			Δ IrriVol [%]			
	% cropland	*bl*	*lg*	*%*	*Median*	*95th perc.*	*DUMB*	*SMART*	*lg.to.bl*	*N.C.*	*bl.to.lg*	*ear.sd*	*lat.sd*	*N.C.*	*shor.cyc.*	*long.cyc.*	*aband*	*N.C.*	*adopt*	*< - 25 %*	*N.C.*	*[25; 50] %*	*> 50 %*
CROP	*CTL*						*B1*																
bd	7	74	26	18	60	318	0	0	21	31	48	-	-	76	7	17	12	61	27	0	67	0	33
bl	21	57	43	9	152	223	0	0	20	37	43	-	-	37	38	25	0	56	44	0	48	4	48
oh	15	64	36	20	19	20	3	0	17	40	43	6	41	53	-	-	19	81	0	0	99	0	1
op	6	68	32	9	20	20	0	0	19	35	46	47	26	27	-	-	8	87	5	0	94	0	6
ma	14	60	40	68	168	520	11	13	12	35	40	-	-	56	5	26	17	51	19	0	29	5	53
pt	8	69	31	44	195	450	9	7	13	33	47	56	26	11	-	-	2	46	45	0	12	7	73
bt	11	73	27	35	270	570	2	0	23	23	54	91	3	6	-	-	9	72	19	0	55	2	43
cz	10	61	39	1	97	280	1	0	2	48	50	31	22	46	-	-	1	89	10	0	93	0	7
tr	5	61	39	25	220	468	0	6	11	38	45	-	-	71	1	21	0	57	37	0	38	2	54
sj	1	83	17	83	120	261	4	2	15	37	46	39	43	15	-	-	13	78	7	0	24	0	74
ALL	100	64	36	27	146	502	3	3	16	36	46	22	13	41	9	12	8	66	23	0	59	3	36
sd	52	67	33	24	120	550	3	1	15	36	48	43	25	31	-	-	9	76	14	0	72	2	25
cu	48	61	39	30	168	470	3	5	17	35	43	-	-	52	19	24	7	55	33	0	44	3	48
wi	54	62	38	12	20	268	1	0	16	39	45	7	15	49	16	12	7	70	23	0	73	2	25
sp	46	66	34	44	170	550	6	6	16	32	46	39	10	33	2	11	9	67	24	0	42	4	49
							A2																
ALL	100	64	36	27	146	502	3	3	14	32	51	22	15	41	11	9	10	72	15	0	69	3	25
sd	52	67	33	24	120	550	3	1	13	30	56	42	28	29	-	-	9	79	11	0	77	3	19
cu	48	61	39	30	168	470	3	5	16	33	45	-	-	53	23	19	7	67	21	0	60	3	32
wi	54	62	38	12	20	268	1	0	14	34	52	6	16	51	19	9	7	81	12	0	85	0	15
sp	46	66	34	44	170	550	5	6	15	29	49	40	13	29	2	10	9	66	19	0	50	6	37

Table 4.A2 - Management practices. Simulated management practices under CTL scenario, and their changes due to adaptation under B1 and A2 for climate change scenarios (under SMART adaptation scenario). The changes in management practices are detailed for all crops for B1 scenario, and for all crop groups (defined in this legend) for A2 and B1 scenarios. Management practices encompasse the choice of the preceding crop (*PrecCrop*, i.e. a spring leguminous *lg* or winter wheat *bl*), the use and the intensity of irrigation (respectively *IrriUse*, and *IrriVol* in [mm/ha]), and the choice of crop cycle length

(through cultivar) or starting date (through sowing date *sd*). Crops are: durum wheat (*bd*), bread wheat (*bl*), winter barley (*oh*), spring barley (*oh*), maize (*ma*), potato (*pt*), sugarbeet (*bt*), rapeseed (*cz*), sunflower (*tr*), and soybean (*sj*). ALL denotes all crops, further divided between crops whose sowing date or cultivar can be adapted (resp. *sd* and *cu*), and between winter and spring crops (resp. *wi* and *sp*). Each crop share in the total number of simulated "crop-agent" cases is detailed in the first column (in percentage), as well as their failure rate under SMART and DUMB scenarios. Details of CTL and changes in management practices are expressed in percentages of the number of CTL "crop-agent" cases for each crop, except for the median and 95th percentile values of the irrigation volume per crop under CTL. For changes in preceding crop, crop cycle length or starting time, and irrigation use, *N.C.* means no change. Changes in preceding crop are detailed in both directions (from *lg to bl* and *bl to lg*). Changes in crop cycle management are detailed in 2 possible directions by crop (either an earlier or a later sowing date, or the use of shorter or a longer cycle cultivar). Changes in irrigation use are detailed between abandonment for cases irrigated in CTL, and adoption for cases not irrigated in CTL. For irrigation volume, the changes in the irrigated volume are relative to the median irrigation flux for each crop in CTL, and detailed between 4 classes according to the change in irrigation volume (< -25%; "N.C."=[-25%:25%], [25%;50%], and > 50%).

Table 4.A2 provides the typology of crop management practices adaptations, and reveals the diversity of field-level optimization of management practices. Adaptation options are rather homogeneous across crops and climate change scenarios concerning the choice of the preceding crop (around 30% of adapted production functions have the same preceding crop, while around 50% are shifting from winter wheat to spring leguminous). This may be due to a higher preservation of soil nitrogen content in the case of a leguminous preceding crop (through its atmospheric nitrogen fixation), however some cases also shift from spring leguminous to winter wheat. On the contrary, the changes in the management of crop cycle length or timing are more differentiated by crops. In particular, the adaptation changes in crop cycle length or timing are opposite for winter and spring crops. Spring (respectively winter) crops whose crop cycle timing can be adapted are sown earlier (resp. later) than in present climate, while spring (resp. winter) crops whose crop cycle length can be adapted generally use cultivars with longer (resp. shorter) cycle. These changes can respond to different strategies (e.g. for spring crops, changing the cultivar to a shorter cycle cultivar may allow to avoid summer water stress, but changing to a longer cycle cultivar may allow to enlarge the grain filling period if temperature increase critically shortens it) and it is difficult to get a clear picture at the European scale. For example, the contrast in seasonal changes in temperature between the two climate change scenarios do not really reflect in the respective changes concerning crop cycle length and starting date, except for a reverse trend in the choice of alternative cultivars for winter crops.

Chapitre 5

Analyse du comportement des principales cultures Européennes sous changement climatique

On estime que l'évolution du climat et de la composition chimique de l'atmosphère aura un impact fort sur le fonctionnement des espèces cultivées (Easterling et al., 2007). En particulier, la température, le contenu en eau du sol, et la concentration atmosphérique en CO_2 et en ozone affectent différents mécanismes des bilans biophysiques et biogéochimiques des espèces cultivées (Olesen and Bindi, 2002; Fuhrer, 2003; Hatfield et al., 2011), ainsi que leur développement physiologique. Les interactions entre ces mécanismes sont encore mal comprises, et l'effet net d'un niveau donné de perturbation pour une espèce donnée est largement dépendant de l'environnement physique (itinéraire technique) et physique (sol).

On projette un impact net du changement climatique sur la productivité relativement faible au niveau agrégé Européen, mais avec une démarcation claire entre le Nord de l'Europe (conditions favorables et hausse de la productivité) et le Sud de l'Europe (conditions de stress hydrique et thermique, et baisse de la productivité). Cependant, ces résultats reposent sur une compilation d'études (Alcamo et al., 2007), qui sont dédiées à des régions et des espèces particulières, et utilisent des outils de modélisation différents, ce qui amplifie l'incertitude.

Les simulations réalisées dans le cadre de cette thèse fournissent une opportunité relativement unique pour explorer les mécanismes en jeu et leurs résultantes, puisqu'elles concernent une dizaine d'espèces différentes sur toute l'Europe. De plus, elles intègrent avec une résolution assez fine l'hétérogénéité de l'environnement physique, technique et socio-économique des systèmes de production Européens. Dans le chapitre 4, nous avons vu que les évolutions du rendement et de l'efficience de l'utilisation d'eau sont contrastées entre régions, cultures, et scénarios de changement climatique. Si le rendement est fortement affecté par l'adaptation de l'itinéraire technique, ce n'est pas le cas de l'efficience d'utilisation d'eau. Enfin, l'adaptation des itinéraires techniques qui est présentée repose sur une optimisation économique, et n'intègre pas d'analyse agronomique.

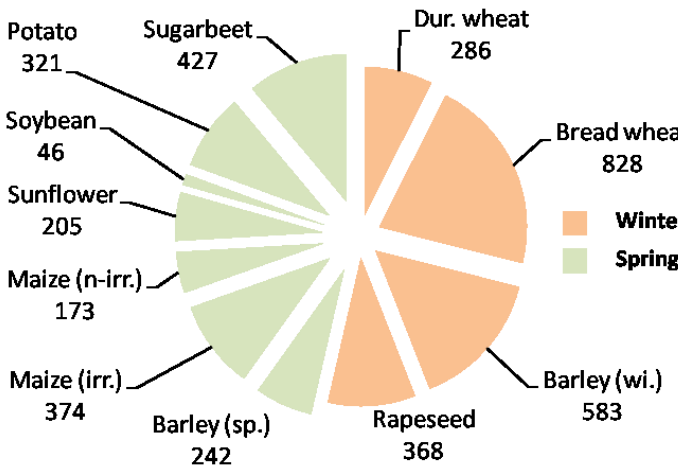
A travers une étude plus approfondie du comportement des principales cultures européennes en réponse au changement climatique, les objectifs de ce chapitre sont: (i) de cerner les principaux traits d'évolution des cultures à l'échelle de la parcelle, et (ii) de développer des méthodes de traitement statistique appropriées pour quantifier leur évolution à l'échelle Européenne. Le travail présenté dans ce chapitre a été en partie réalisé sous la forme de stages de niveau Master 2, dont j'ai défini le sujet et co-encadré la réalisation, avec Nathalie de Noblet (LSCE, UMR CEA/CNRS/UVSQ). Nadine Brisson (INRA, UMR Agroclim INRA), et Thierry Doré (AgroParisTech, UMR Agronomie INRA/AgroParisTech) ont par ailleurs été activement impliqués dans ce travail. Il est donc le fruit d'interactions entre cette équipe d'encadrement et deux stagiaires: Hajer Najlaoui (2010), et Marie Combe (2011). Dans une première partie on caractérise l'évolution du comportement des principales cultures à l'échelle Européenne sous changement climatique. Dans une deuxième partie, on présente les outils d'analyse statistique développés pour traiter de la variabilité de ce comportement, et leurs résultats.

5.1. L'évolution des cultures: du rendement au comportement

Dans cette section, j'identifie les principaux traits du comportement des cultures sous changement climatique. Nous nous appuyons pour cela sur les simulations de fonctions de production présentées dans le chapitre 4 (CTL, A2 et B1), dans le cas de pratiques agricoles *identiques* en climats présent et futurs. Les individus de notre analyse sont constitués uniquement des couples culture-agent qui sont couplés dans le scénario CTL (soit 85% des couples culture-agent, et 3853 individus). Dans les scénarios de climat futur, la simulation du cycle complet de développement d'un certain nombre de couples culture-agent ne peut aboutir. Ainsi, des 3853 individus correctement simulés en climat présent, 3584 (93%) et 3499 (91%) le sont sous les climats respectivement A2 et B1, le restant étant considéré comme des cas d'infaisabilité en climat futur.

Afin de s'affranchir des degrés de liberté du modèle AROPAj en termes d'allocation de surface et de niveau de fertilisation d'un scénario à l'autre, d'une part on attribue à chaque couple culture-agent le même poids (pas de pondération des individus par leur part de surface régionale de chaque culture), et d'autre part on réalise l'analyse pour un niveau de fertilisation identique pour chaque scénario (CTL, A2 et B1) et chaque culture (160 kgN.ha^{-1}). Cela signifie qu'à une échelle régionale (ou plus agrégée), les résultats d'analyse ne seront pas exactement représentatifs en part de surface des changements simulés. La figure 5.1 (a) présente la répartition des cas par culture à l'échelle Européenne, en climat présent (scénario CTL). Les figures étant en anglais dans ce manuscrit, l'équivalent français du nom des espèces est donné dans la figure 5.1 (b).

(a) Share of species in "crop-agent" couples



(b) Species names

Winter crops	*Cultures d'hiver*
Durum wheat	Blé dur
Bread wheat	Blé tendre
Winter barley	Orge d'hiver
Rapeseed	Colza
Spring crops	*Cultures de printemps*
Spring barley	Orge de printemps
Maize	Maïs
Sunflower	Tournesol
Soybean	Soja
Potato	Pomme de terre
Sugarbeet	Betterave sucrière

Figure 5.1 - Détail des espèces de l'échantillon. (a) Répartition des individus par espèce à l'échelle Européenne. La population considérée contient 50 % de céréales à paille (blé et orge), 14 % de maïs, 16 % d'oléo-protéagineux et protéagineux (tournesol, colza, soja) et 19 % de pomme de terre et de betterave. *Figure adaptée du rapport de stage de Marie Combe* (Combe, 2011). (b) Nom anglais et français des espèces.

5.1.1. Evolution des rendements à l'échelle Européenne

La figure 5.2 présente les distributions de rendement simulées par culture, en climats présent (CTL) et futurs (A2, B1). Afin de rappeler le réalisme des simulations (traitée dans le chapitre 3), la figure 5.2 contient aussi les rendements RICA. On retrouve une surestimation des rendements pour le blé dur, l'orge (printemps et hiver), la pomme de terre et la betterave sucrière. A l'inverse, le rendement du maïs (séparé ici entre cas irrigué et non irrigué) est sous-estimé.

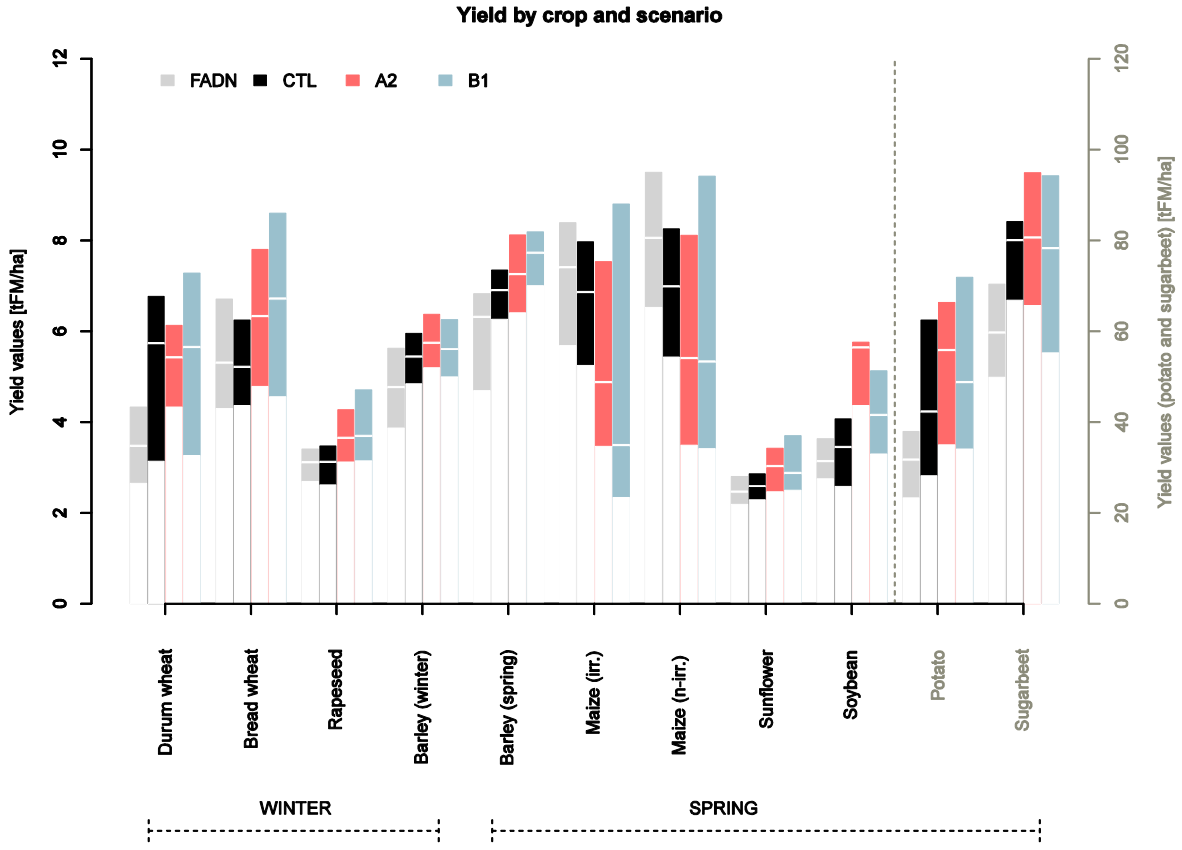


Figure 5.2 - Distribution des rendements par culture. Distributions de rendements simulées, respectivement dans les scénarios CTL (noir), A2 (rouge) et B1 (bleu), et observées par le RICA en 2002 (FADN, gris). Les distributions sont représentées par un rectangle délimité par les 1er et 3ème quartiles. La médiane est indiquée par une barre blanche dans le rectangle. Les valeurs de rendement sont exprimées en tonnes de matière fraiche par hectare [$t_{FM}.ha^{-1}$].

La plupart des cultures voient leur rendement augmenter en climat futur, quelque soit le scénario climatique, à l'exception du maïs, du blé dur et de la betterave. Le signe d'évolution est le même pour le scénario A2 et le scénario B1 et ce pour toutes les cultures. Toutefois, ces hausses ou baisses de rendement moyen sont plus importantes sous le climat B1 pour beaucoup de cultures, à l'exception de l'orge d'hiver, du maïs non irrigué, du tournesol, du soja et de la pomme de terre. Sans analyse complémentaire, il n'y a pas de différence marquée de

comportement entre cultures d'hiver et de printemps, ni entre les cultures dont le mécanisme de photosynthèse est en C4 (maïs) ou C3 (reste des cultures).

La variabilité spatiale des rendements simulés (voir l'espace interquartile, figure 5.2), augmente du scénario présent, au scénario A2 puis au scénario B1, excepté pour le blé dur (la variabilité au climat présent est supérieure à la variabilité sous climat A2) et l'orge d'hiver (la variabilité change faiblement).

La figure 5.3 présente l'évolution des rendements du blé tendre en moyenne régionale. En particulier, une différentiation Nord/Sud des impacts semble très réductrice, et ce pour la majorité des cultures considérées (non montré ici). De plus, il peut exister localement des forts contrastes entre scénarios climatiques, par exemple en Espagne pour le cas du blé tendre, où le signe est opposé entre les scénarios A2 et B1.

(a) Change in regional yield (A2) **(b) Change in regional yield (B1)**

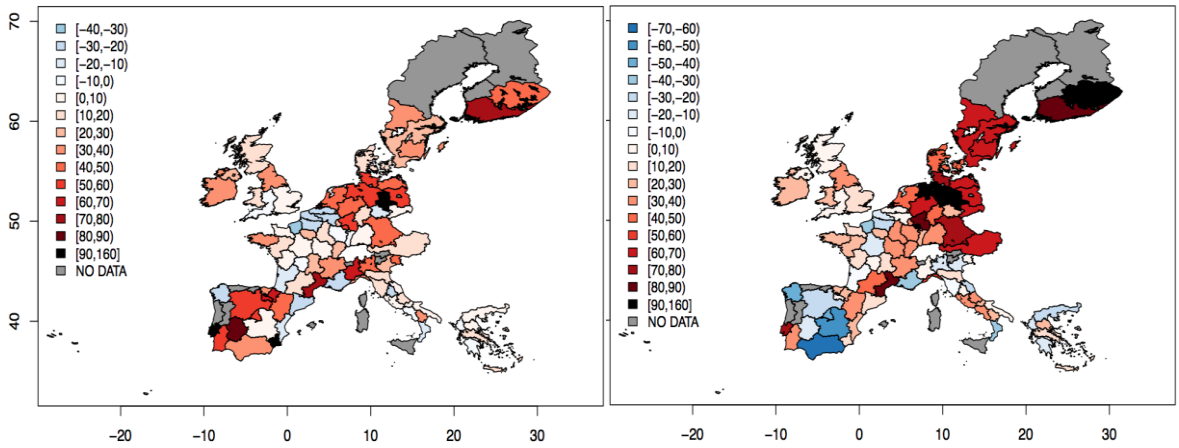


Figure 5.3 - Carte des évolutions relatives du rendement régional moyen (blé tendre) en climat futur (a) A2, et (b) B1. Les variations relatives (par rapport au scénario CTL) du rendement sont exprimées en pourcentage du rendement en climat présent (CTL). *Figure extraite de* (Combe, 2011).

5.1.2. Traits comportementaux: le blé tendre en Castille-León (Espagne)

Ce cas particulier du blé tendre en Espagne permet d'illustrer les traits d'évolution simulée du comportement des cultures sous changement climatique. Je m'intéresse ici plus particulièrement au cas de la *région RICA de Castille-León* (voir figure 5.4), et je m'appuie sur l'analyse de l'*élaboration du rendement*, en séparant la densité de grain d'une part, du poids moyen des grains d'autre part. Il s'agit d'une dichotomie classique dans l'élaboration du rendement (Combe and Picard, 1994). Cette méthode permet d'expliquer des différences de rendement, et de cibler les différences de comportement durant différentes phases du cycle de croissance: les deux composantes de rendement dépendent de mécanismes différents qui sont séparés dans le temps, et sensibles à différents facteurs techniques et physiques.

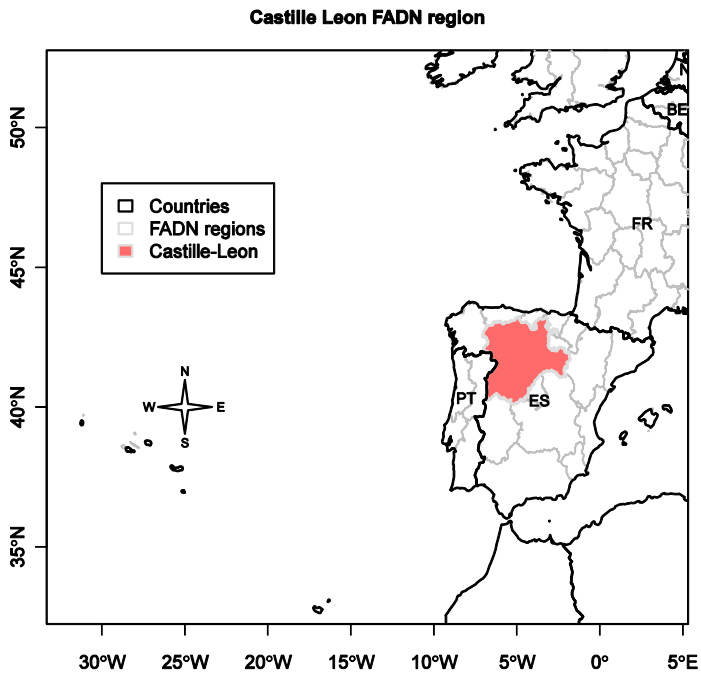


Figure 5.4 - Domaine d'étude particulier, la région de Castille-Lèon. J'ai choisi cette région car elle présente des évolutions de rendement de signe opposé entre climat présent et climat futur pour le blé tendre. Cette région correspond à la région RICA n°545, et comporte dans le modèle AROPAj 21 agents qui cultivent du blé tendre dans le scénario CTL, ainsi que dans les scénarios futurs (A2 et B1, i.e. pas d'infaisabilité de la culture). L'itinéraire technique est le suivant : pas d'irrigation, une légumineuse de printemps pour précédent, une variété précoce est utilisée pour 60% à 80% des fermes-types, et le semis a lieu dans la première quinzaine d'Octobre. La profondeur du sol varie entre 80 et 110 cm en fonction du groupe type.

Dans STICS, pour les cultures déterminées (et donc pour le blé tendre), le *nombre de grains par mètre carré* est déterminé pendant la phase végétative de la croissance, comme une fonction affine de la vitesse moyenne d'accumulation de la biomasse sur une courte période précédent le remplissage des grains. Durant cette période spécifique, la vitesse moyenne d'accumulation de biomasse est dépendante de la densité foliaire, des variables météorologiques, de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone ($[CO_2]$), et de stress hydrique, azoté et thermique. Cependant, la densité foliaire à cette période dépend du développement de la plante sur l'ensemble de la phase végétative, et est donc intégratrice des variables précitées sur l'ensemble de la phase végétative. Le *poids moyen d'un grain* dépend de la biomasse sèche accumulée sur l'ensemble du cycle, et de l'indice de récolte carboné. Ce dernier est déterminé comme est une fonction linéaire de la durée de remplissage des grains, qui est elle-même dépendante de la température de culture pilotant le développement physiologique. Par conséquent, le poids moyen d'un grain est donc aussi intégrateur de deux périodes temporelles: il dépend d'une part de l'influence des températures sur une durée courte (la phase de remplissage), et d'autre part du développement de la culture sur l'ensemble du cycle, via la biomasse totale accumulée (Brisson et al., 2008).

A l'horizon de la fin du 21ème siècle, le rendement du blé tendre augmente de 54% sous le climat A2 et diminue de 26% sous le climat B1 (cf. tableau 5.1). L'augmentation simulée du rendement sous le climat A2 résulte d'une forte augmentation du nombre de grains (+63%), tandis que sous le climat B1, c'est la baisse du poids moyen d'un grain (-25%) qui est responsable de la chute du rendement (malgré une petite augmentation du nombre de grains). Si l'on s'intéresse à présent aux causes de la variation des composantes de rendement, on voit dans les deux cas qu'il ne s'agit pas d'un stress hydrique: la valeur de l'indice de nutrition hydrique (le rapport de l'évapotranspiration réelle sur l'évapotranspiration potentielle) stagne

aux alentours de 1. Sous le climat A2, la valeur de l'indice de nutrition azotée de la phase végétative augmente légèrement, ce qui peut laisser penser que la condition de nutrition azotée y est plus un peu plus favorable. Quant au blé tendre sous climat B1, sa phase reproductrice est nettement raccourcie, et un nombre (limité) de jours échaudants apparaît. Le stress thermique, et surtout le raccourcissement de la phase reproductrice, font diminuer le poids moyen des grains.

De façon plus générale, la durée du cycle est raccourcie en climat futur, sous l'influence de la hausse des températures. Sous le climat B1, le raccourcissement du cycle, déjà très conséquent (un mois contre 10 jours en climat A2), ne suffit pas pour éviter le stress thermique, dont les conséquences apparaissent alors sur le rendement. Ce résultat est relativement contre-intuitif, car l'augmentation des températures estivales dans la péninsule Ibérique est plus marquée pour le climat du scénario A2. Après analyse, pour cette culture d'hiver et dans la région considérée, la température au début de la période de remplissage des grains (fin du printemps) est en fait plus grande en B1 qu'en A2 (+ 5 à +7°C) pendant un mois et demi, avant que les anomalies en A2 dépassent celles de B1 pendant l'été. C'est donc surtout B1 qui subit un stress thermique en phase reproductrice.

Enfin, les évolutions de [CO_2] sont très importantes (+51% en B1, et +106% en A2), et permettent une plus grande accumulation de biomasse (effet de *fertilisation*), de manière plus marquée en A2 qu'en B1. De plus, comme nous l'avons vu au chapitre 4, l'*efficience d'utilisation de l'eau* augmente, mais de manière contrastée en réponse aux changements de [CO_2]: +6% en B1, et +47% en A2. Le modèle STICS permet de simuler ces deux effets (Brisson et al., 2008), ce qui explique dans les deux scénarios le bon maintien du statut hydrique des plantes, et ce surtout en A2, où la production de biomasse est fortement augmentée. La différence d'évolution du rendement dans les scénarios B1 et A2 repose donc à priori sur 2 phénomènes principaux: d'une part, la plus grande augmentation de [CO_2] dans le climat A2 permet une plus grande accumulation de biomasse sur l'ensemble du cycle, et d'autre part dans le climat B1, la phase reproductrice est très raccourcie et soumise à un stress thermique plus important.

Cependant, nous n'avons pas encore pu déterminer de manière complète l'ensemble des liens de cause à effet en jeu, tels que simulés par le modèle STICS. Au vu du nombre de simulations effectuées dans nos scénarios, stocker les sorties journalières du modèle n'est pas envisageable à l'échelle Européenne. L'identification de variables clés du comportement des cultures à récupérer est donc une difficulté importante. A cet égard, il nous manque quelques variables clés, notamment la densité foliaire à différents stades physiologiques, qui permettrait de mieux séparer la temporalité des processus spécifiques aux deux composantes de rendement.

Néanmoins, cette analyse a permis de mesurer la complexité des évolutions de comportement des cultures. Les variations de durée de cycle, ainsi que d'efficience d'utilisation de l'eau, semblent constituer une composante essentielle du comportement des cultures en climat futur, notamment en termes de rendement.

Variable (mean over region)	CTL	A2	B1
(a) Yield & its components			
Yield [t_{FM}.ha-1]	5.05	7.76	3.73
Grain number [.m-2]	11787	19241	12307
Mean grain weight [g_{DM}]	0.04	0.04	0.03
(b) Length of physiological stages			
Emergence to physiological maturity [d]	263	248	231
Emergence to grain filling onset [d]	222	206	201
Grain filling onset to physiological maturity [d]	41	43	31
Physiological maturity to harvest (dehydration) [d]	19	16	16
(c) Heat stress & nitrogen and hydric nutrition			
HEAT Days under heat stress for grain filling [d]	0	0	3
WATER Real ET / potential ET [full cycle, -] *	0.98	0.98	0.99
NITROGEN Nutrition index [vegetative phase, -] *	0.79	0.86	0.79
*(*) 1 = no stress; 0 = full stress*			
(d) weather indexes			
Accumulated from emergence to harvest			
Temperature [Degree-day units]	2803	3169	2816
Precipitation [mm]	721	789	690
Incoming solar shortwave radiation [MJoules]	4184	3559	3554
Atmospheric CO_2 concentration	352	724	533

Changes relative to CTL, for A2 and B1 scenarios [%]

≤ -20 | -20 < ≤ -5 | -5 < ≤ +5 | +5 < ≤ +20 | > +20

Tableau 5.1 - Analyse de l'élaboration du rendement du rendement pour le blé tendre en Castille-León entre le climat présent (CTL) et les climats futurs (A2 et B1). Le tableau est divisé en 3 parties. (a) Le rendement et ses composantes: le rendement est en tonnes de matière fraîche par hectare, le nombre de grain par m^2, et le poids moyen d'un grain en gramme de matière sèche. (b) Les indices agronomiques: le stress thermique pendant la période de remplissage (nombre de jours où les températures empêchent le remplissage), les indices de nutrition hydrique pendant tout le cycle (rapport évapotranspiration réelle sur potentielle) et azotée pendant la période végétative (indices entre 1 - pas de stress - et 0 - stress maximal -). (c) Les indices météorologiques: le cumul d'énergie thermique de la levée à la récolte (en degré-jours), le cumul de précipitation de la levée à la récolte (en mm), le cumul d'énergie solaire incidente en onde courte (en MJoules), et la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Pour le climat futur, des codes de couleurs indiquent l'ampleur des variations relative par rapport à CTL. *Adapté d'après* (Combe, 2011).

5.2. Classification et typologie d'évolution du comportement des cultures

Afin de pouvoir explorer, sur l'ensemble de nos simulations, la différence de comportement entre cultures, régions, et scénarios de changement climatique, nous avons mis au point une méthode de classification. Il s'agit de déterminer s'il y a des directions et typologies privilégiées (par culture, région ou scénario climatique) dans les grands traits d'évolution des cultures, identifiés précédemment (rendement, durée du cycle et efficience d'utilisation de l'eau). Dans cette classification, l'objectif est fondamentalement de décrire et qualifier les évolutions du comportement des cultures, sur la base d'un choix a priori des variables importantes. Il s'agit de savoir si des typologies peuvent êtres statistiquement identifiées ou non. Nous avons pour cela utilisé une méthode de *classification automatique ascendante hiérarchique*. Nous allons détailler la classification et ses résultats dans les sections suivantes.

5.2.1. Méthode de classification hiérarchique

Nous nous sommes restreints aux cultures dites *déterminées*, c'est-à-dire pour lesquelles les phases végétative et reproductrice sont bien séparées, et pour lesquelles il n'y a pas de compétition entre les feuilles et les organes récoltés dans l'allocation de la biomasse accumulée journalièrement. Le fonctionnement de la betterave est dit indéterminé, et l'élaboration de ses composantes de rendement repose sur des mécanismes différents de ceux détaillés dans la section 5.1.2. Nous avons donc *exclu la betterave* de notre jeu de données, et l'échantillon se compose de 2743 points en climat A2, et 2649 points en climat B1.

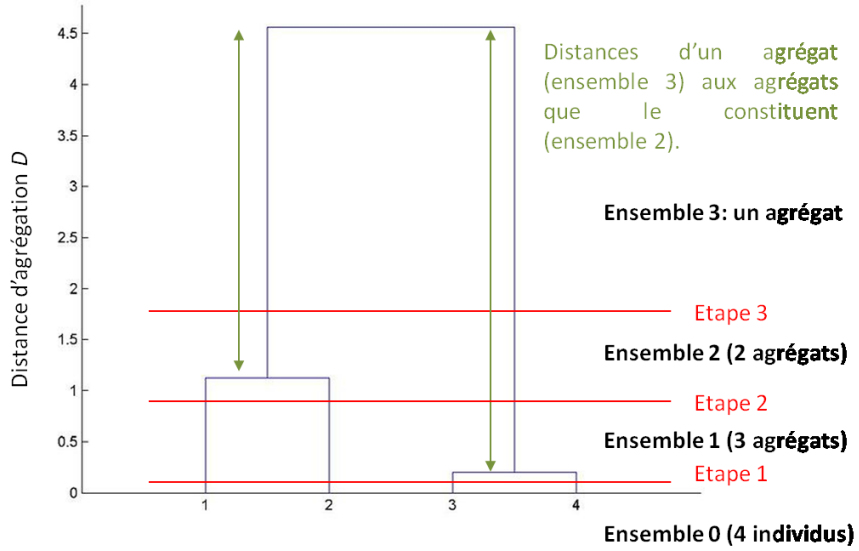
Nous avons retenu *3 dimensions* pour décrire de manière globale l'évolution du comportement des cultures sous changement climatique : la productivité, la durée du cycle, et l'efficience d'utilisation de l'eau. Pour représenter ces 3 dimensions, nous avons retenu les grandeurs suivantes: le *rendement* (rdt, en tonnes de matière sèche par hectare), la *durée entre les stades de levée et de maturité physiologique* (durcycle, en jours), et le *rapport de la biomasse aérienne totale à la récolte sur la transpiration cumulée du semis à la récolte* (wue, en kg de matière sèche par m^3 d'eau).

Le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau ont cependant des valeurs caractéristiques assez différenciées par culture. Nous avons donc harmonisé les valeurs de rendement et d'efficience d'utilisation de l'eau entre cultures, en normalisant les valeurs par la meilleure performance (par culture) dans le scénario CTL. Cette meilleure performance est définie (par culture) comme le rendement maximum atteint au niveau Européen pour le rendement, et comme le 9ème décile au niveau Européen pour l'efficience d'utilisation de l'eau (la valeur maximum étant très supérieure à la moyenne par culture, et donc non représentative). Ces nouvelles variables harmonisées seront notées Rrdt et Rwue. Nous avons aussi exclu les points en climat futur qui ont une valeur supérieure à 200% de gain en efficience d'utilisation de l'eau, car certains de ces points avaient des valeurs extrêmes qui perturbaient la classification.

L'évolution *diff_V* de chacune de ces 3 variables *V* est ensuite calculée comme la différence entre les scénarios de climat futur et présent, pour chaque scénario de changement climatique *f* (A2 ou B1) :

$$diff_V(f) = V(f) - V(CTL)$$

Pour chaque scénario de changement climatique, chaque individu de notre échantillon est donc défini par 3 coordonnées (*diff_Rrdt*, *diff_durcycle*, et *diff_Rwue*), qui définissent un espace à 3 dimensions. La classification ascendante hiérarchique (CAH) consiste à regrouper de manière successive tous les individus (puis groupes d'individus) en groupes d'individus sur un critère de minimalisation de la distance entre individus (ou groupes d'individus). A la fin de la procédure, tous les points sont agrégés en un seul groupe. On dispose alors d'une liste d'ensembles successifs d'agrégats de plus en plus gros d'individus (un ensemble par étape de l'algorithme). Pour chacun des ensembles d'agrégats de cette liste, on caractérise les distances moyennes chaque agrégat aux deux agrégats plus petits qui les constituent. Ces informations peuvent êtres résumées sous forme graphique dans un dendrogramme (voir exemple pour 4 individus, dans la figure 5.5).



Adapté de http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Dendro.jpg

Figure 5.5 - Dendrogramme simple pour une population de 4 individus. La CAH agrège par étapes l'ensemble des individus (Ensemble 0) en un ensemble d'agrégats (Etape 1, regroupe 4 individus de l'ensemble en 3 agrégats, i.e. Ensemble 1), et ce itérativement jusqu'à n'obtenir qu'un seul agrégat. La distance entre agrégats de niveaux hiérarchiques différents est représentée en ordonnée (flèches vertes).

On peut ensuite décider de découper nos échantillons en plusieurs classes, comme les agrégats obtenus à une étape particulière de l'algorithme. Il n'y a cependant pas de critères absolus pour décider du niveau d'agrégation le plus approprié, et celui-ci résulte du choix de l'utilisateur. Les critères généralement admis pour une bonne classification portent sur le niveau qui permet d'avoir suffisamment de classes bien séparées, c'est-à-dire dont les distances aux agrégats du niveau suivant d'agrégation sont assez grandes, et similaires entre classes.

Cette méthode peut donner des résultats assez variables en fonction du choix de certains paramètres. Il existe en effet plusieurs métriques de distance entres agrégats, et

plusieurs méthodes de calcul de la distance séparant deux groupes d'individus: nous avons retenu une distance Euclidienne, et une méthode de Ward (la distance est mesurée entre les barycentres de chaque agrégat). Les distributions des variables *diff_Rrdt*, *diff_durcycle* et *diff_Rwue* sont au préalable centrées et normées.

Enfin, cette méthode de classification est d'autant plus efficace que les variables descriptives sont indépendantes les unes des autres. Si les variables descriptives sont corrélées, on peut réaliser une analyse en composante principale (ACP) avant la CAH. L'ACP a pour objectif de construire de nouvelles variables descriptives non corrélées, comme combinaisons linéaires des variables descriptives fournies en entrée. Cette méthode repose sur une analyse de variance de jeu de données, et les nouveaux axes sont construits successivement par ordre décroissant de variance expliquée. On considère alors qu'il faut garder un nombre d'axes qui permettent d'expliquer au moins 90% de la variance totale du jeu de donnée. Le désavantage de procéder à l'ACP au préalable, est que les classes retenues sont moins faciles à interpréter, puisque définies par des variables qui sont des combinaisons linéaires des variables explicatives initiales.

5.2.2. Résultats de la classification

Nous avons réalisé une CAH sur notre jeu de données toutes cultures confondues, pour les climats A2 et B1, sans ACP préalable. La figure 5.6 présente les dendrogrammes obtenus pour ces deux scénarios: pour A2, la classification retenue comporte 4 classes bien séparées, et d'effectifs équivalents. Pour B1, on retient aussi une classification en 4 classes: 3 classes sont bien distinguées avec des effectifs équivalents, mais faibles comparativement à la dernière classe, qui par ailleurs semble regrouper des individus au comportement moins marqué (ce qui se traduit dans le dendrogramme par des distances faibles aux agrégats des ensembles de hiérarchie supérieure ou inférieure). Ce problème ne se résout pas par la réalisation d'une ACP au préalable, et le choix d'une classification finale est plus évident dans le scénario A2 qu'en B1.

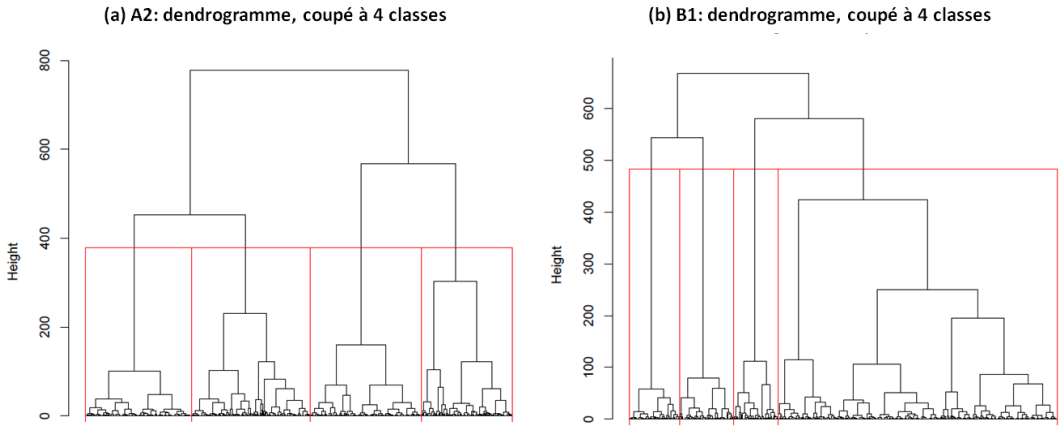


Figure 5.6 - Dendrogrammes des classifications en climat futur (a) A2 et (b) B1. Les deux dendrogrammes sont coupés à 4 classes (rectangles rouges), et sont réalisés avec les variables *diff_Rrdt*, *diff_durcycle* et *diff_Rwue*, dont les distributions des variables sont au préalable centrées et normées. Les distances sont euclidiennes, et on utilise la méthode de Ward pour calculer la distance entre agrégats.

Cependant, les 4 classes séparées par les classifications retenues montrent une typologie de d'évolution du comportement des cultures qui est très proche pour les deux scénarios de changement climatique. Le tableau 5.2 présente les valeurs médianes et l'écart interquartile des 3 variables descriptives pour chacune des 4 classes retenues dans chacun des scénarios. On peut clairement donner la même signification aux classes obtenues dans les deux scénarios de changement climatique :

- Classe 1 « Durée de cycle en forte baisse, rendement en baisse modérée ». Pour cette classe, dans les 2 scénarios, la durée du cycle est très réduite (valeur médiane de -30 jours en A2, -51 jours en B1), le rendement diminue (-17% en A2, -8 % en B1), tandis que l'efficience d'utilisation de l'eau augmente modérément (+30% pour A2, +9% en B1).
- Classe 2 « Forte hausse d'efficience d'utilisation de l'eau ». Pour ce scénario, le gain d'efficience d'utilisation de l'eau est très marqué (+60 ± 11 % en A2, +67 ± 14 % en B1), tandis que le rendement stagne et la durée du cycle diminue légèrement.
- Classe 3 « Faible évolution du comportement ». Pour cette classe, l'évolution est modérée pour chacune des variables que l'on considère (par rapport aux autres classes) : la durée de cycle est stable voir diminue légèrement, les gains en efficience d'utilisation de l'eau sont modérés, et le rendement varie peu.
- Classe 4 « Gain de productivité et d'efficience d'utilisation de l'eau ». Cette classe est la plus favorisée par le changement climatique : bien que la durée du cycle diminue modérément, le rendement augmente fortement, ainsi que l'efficience d'utilisation de l'eau.

Si l'on regarde la répartition de nos individus par classe (tableau 5.2, (b)), on retrouve le déséquilibre entre classes dans le scénario B1: en particulier, la classe 3, qui correspond à une évolution modérée du comportement des cultures, contient 65% des individus. Cependant, certains traits d'évolution sont plus marqués dans ce scénario : pour la classe 1 (forte réduction de la durée de cycle et légère baisse du rendement), la réduction du cycle est plus forte qu'en A2, alors que l'évolution du rendement est plus variable. Pour la classe 4 (hausse conjointe du rendement et de la productivité), le gain en rendement est plus fort en B1 qu'en A2, alors que pour l'efficience d'utilisation de l'eau c'est l'inverse. De manière générale, la hausse d'efficience d'utilisation de l'eau est moins marquée en B1, à part pour la classe 2 (hausse de l'efficience d'utilisation de l'eau). Ces résultats sont cohérents avec les différences d'évolution de [CO_2] entre les scénarios climatiques.

Variable	Unit	Climate scenario	Class 1		Class 2		Class 3		Class 4	
			m	*dQ*	*m*	*dQ*	*m*	*dQ*	*m*	*dQ*
(a) changes in crop behavior										
diff_durcycle	*[days], absolute change to CTL*	A2	-30	33	-10	10	-1	13	-14	12
		B1	-51	20	-11	12	-10	15	-17	9
diff_Rrdt	*[%], change relative to the maximum yield in*	A2	-17	26	1	9	6	14	31	19
		B1	-8	37	-4	13	3	24	58	20
diff_Rwue	*[%], change relative to the 9th decile in CTL (per*	A2	30	23	59	16	22	24	53	35
		B1	9	21	65	13	15	25	35	21
(b) share of population in each class										
Share in population	*[%], share in total cases per climate scenario*	A2	21		25		26		28	
		B1	10		12		65		13	

Tableau 5.2 - Classes d'évolution du comportement des cultures en climat futur. (a) Valeurs caractéristiques de différentes variables de description du comportement (médiane *m* et écart interquartile *dQ*), et (b) effectifs des 4 classes obtenues par CAH, pour les climats A2 et B1.

La figure 5.7 présente la répartition de chaque culture dans les différentes classes, pour les scénarios A2 et B1. En climat A2, où les comportements sont plus diversifiés, les cultures d'hiver semblent de manière générale beaucoup avoir des durées de cycle moins raccourcies (classe 1) que les cultures de printemps. Cependant, l'orge de printemps ne semble pas non plus en souffrir, tandis qu'environ 30% des cas de blé dur appartiennent à cette classe. A l'inverse, la classe 2 (gain en efficience d'utilisation de l'eau non accompagné de gain en rendement) est beaucoup plus représentative des cultures d'hiver que de printemps.

De manière générale, cette différence entre cultures d'hiver et de printemps est aussi visible pour le scénario B1, bien que la classe 3 (évolution modérée du comportement des cultures) soit beaucoup plus importante (65%, au lieu de 26% en A2). Enfin, quelque soit le scénario, le maïs et le tournesol souffrent le plus du changement climatique, qu'il soit irrigué ou non. Le maïs est par ailleurs la seule culture à mécanisme de photosynthèse en C4, qui est censée bénéficier le moins de l'augmentation de [CO_2].

Enfin, les cultures les plus favorisées par le changement climatique (i.e. celles qui appartiennent en plus grand nombre à la classe 4) sont le blé tendre, le colza, et le soja. C'est cohérent avec la vision à l'échelle Européenne (figure 5.2). En revanche, la pomme de terre semble peu affectée par le changement climatique (et ce quelque soit le scénario de changement de climat), ce qui ne semble pas entièrement cohérent avec la figure 5.2 (où le rendement varie de manière conséquente). On atteint ici la limite de traitement harmonisé toutes cultures confondues de la classification telle qu'elle a été réalisée, c'est-à-dire en normalisant l'évolution du rendement de chaque cas par le rendement maximum obtenu en CTL par culture. Cette normalisation pourrait éventuellement être revue, par exemple en prenant le

soin d'écarter certains points aberrants (comme cela a été fait pour l'efficience d'utilisation de l'eau).

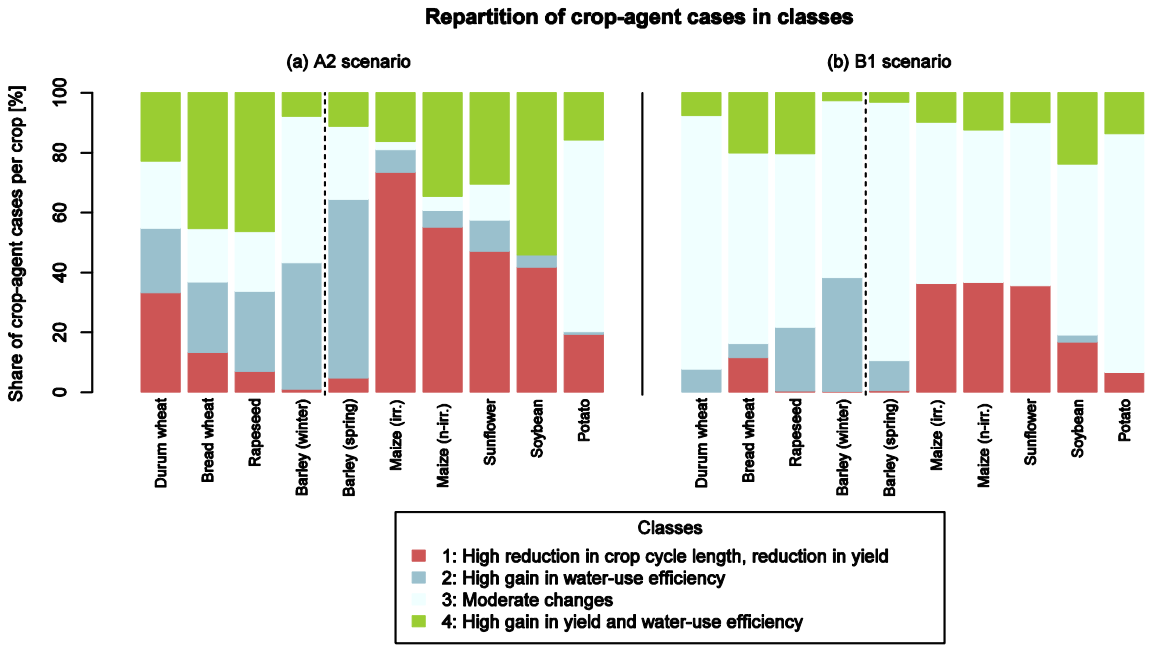


Figure 5.7 - Répartition des cultures dans les différentes classes, pour les scénarios (a) A2, et (b) B1. Pour chaque scénario de changement climatique, un trait pointillé sépare les cultures d'hiver des cultures de printemps.

La figure 5.8 présente la distribution des classes prépondérantes (panneaux du haut) ou représentant plus de 50% des cas (panneaux du bas) par région, toutes cultures confondues, pour les scénarios A2 (a) et B1 (b). On retrouve la même différentiation entre les climats futurs A2 et B1, avec un comportement beaucoup plus marqué dans le climat A2 que dans le climat B1. Dans ce dernier, d'une part la classe majoritaire est la classe 3 dans beaucoup de régions, et d'autre part il y a beaucoup plus de régions qu'en A2 où la classe majoritaire représente plus de 50% des cas, toutes cultures confondues.

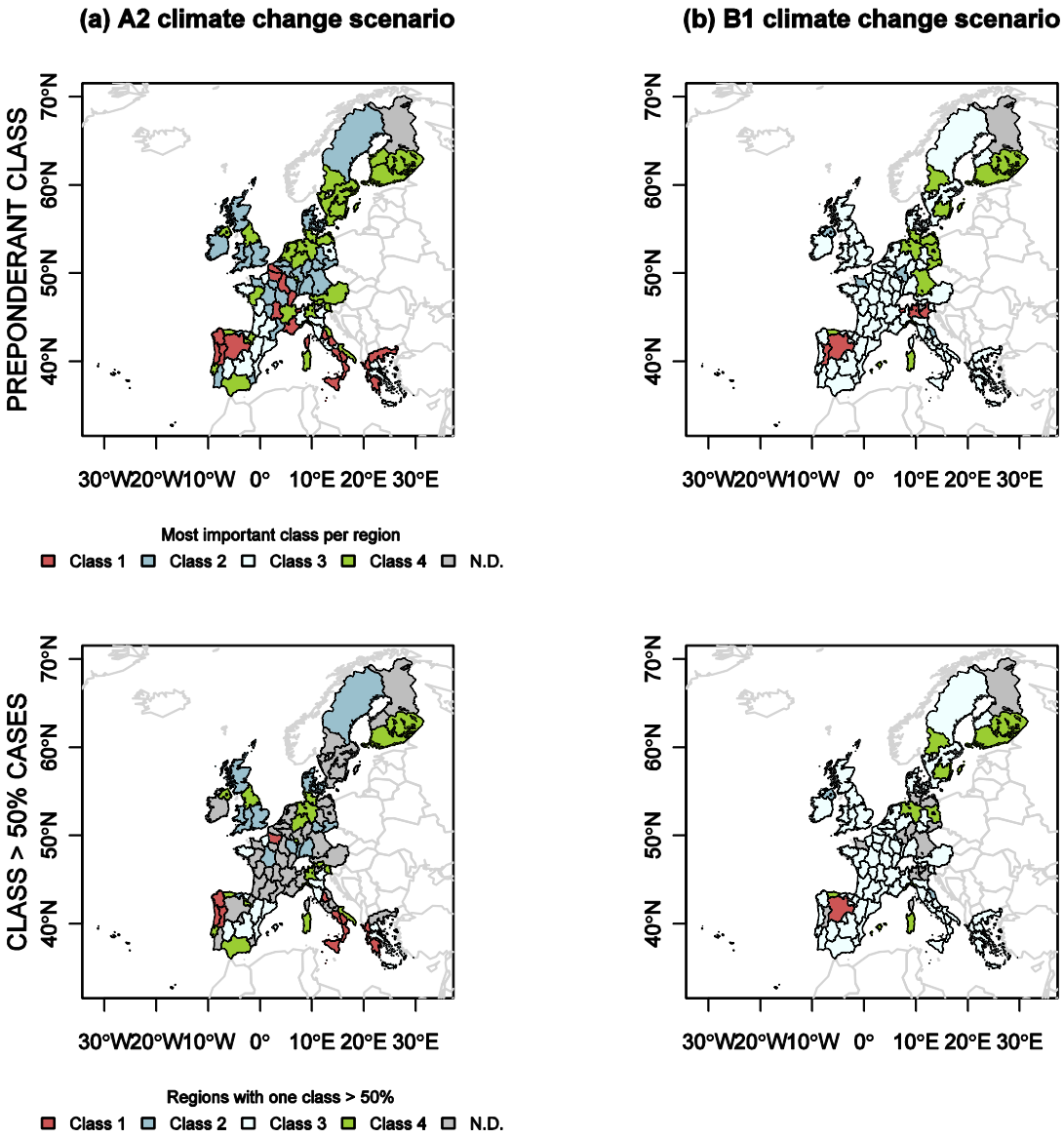


Figure 5.8 - Distribution spatiale des classes par région pour les scénarios (a) A2, et (b) B1. Les panneaux du haut donnent une information sur le comportement dominant par région (classe prépondérante), tandis que les panneaux du bas permettent de vérifier si cette tendance est majoritaire à l'échelle de la région (régions pour lesquelles la classe prépondérante représente plus de 50% des cas).

En séparant les cultures précédemment identifiées comme étant les plus affectées par la réduction de la durée de cycle et la baisse de rendement (maïs irrigué et non irrigué, tournesol et soja), on analyse plus clairement les différences de comportement entre cultures et régions (figure 5.9). On voit clairement que pour le premier groupe de cultures, la tendance émergente (sur l'ensemble des régions où ces cultures sont présentes) est une baisse de la durée du cycle, accompagnée d'une réduction du rendement, mais le signal est moins marqué en climat B1 qu'en climat A2. Seules quelques régions semblent gagner en rendement (et en efficience d'utilisation de l'eau, classe 4), aux Pays-Bas, au Danemark et au Nord de l'Allemagne. Pour les autres cultures, il semble que les gains (classe 4) soient localisés dans la même région (Nord de

l'Allemagne, Danemark, Sud de la Suède et de la Finlande), ainsi qu'en Espagne dans le climat A2. La classe 1 reste présente dans l'Est de la région Méditerranéenne, dans le climat A2 seulement.

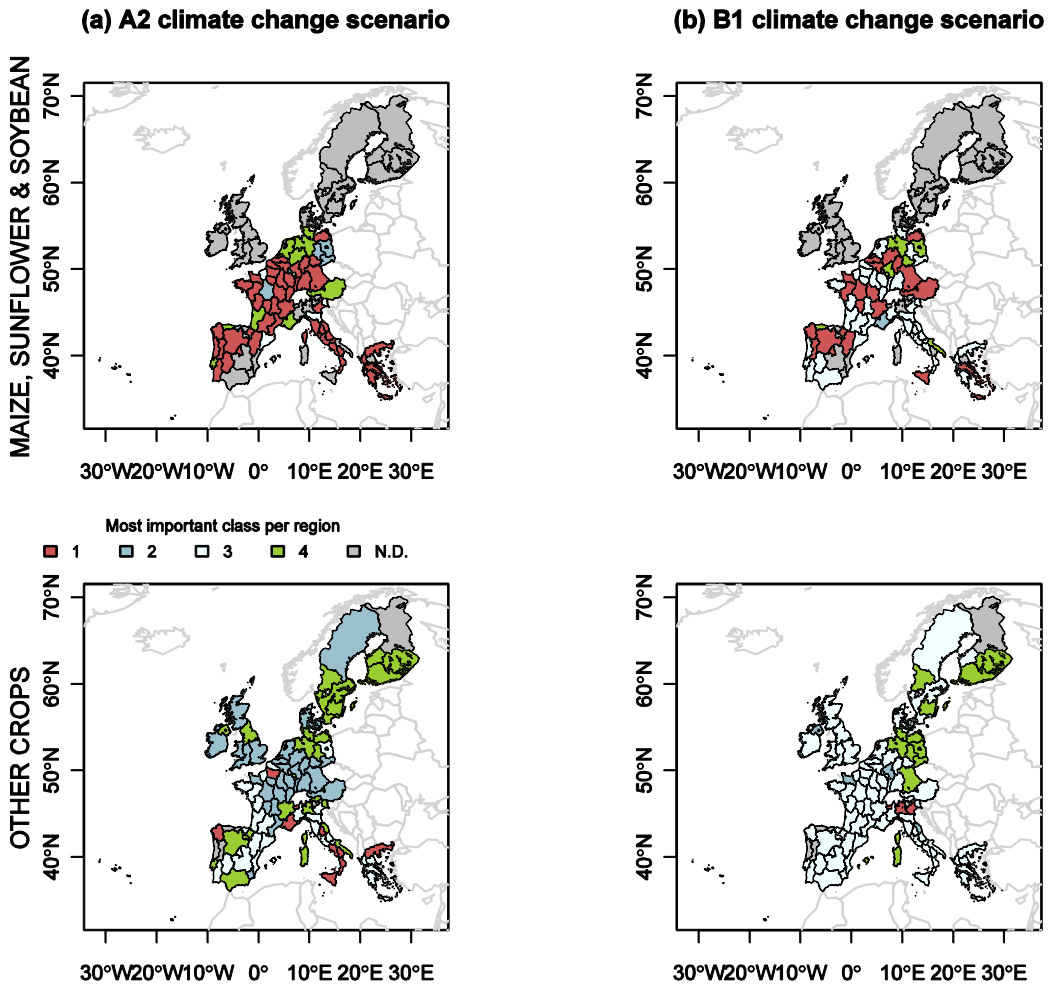


Figure 5.9 - Distributions spatiales des classes par région et par groupe de cultures, pour les climats futurs (a) A2 et (b) B1. Les cartes donnent les classes prépondérantes par région, pour les cultures dont la part de la classe 1 est importante (maïs irrigué et non-irrigué, soja, tournesol, panneau du haut), et pour les autres cultures (blé tendre, blé dur, colza, orges d'hiver et de printemps, pomme de terre).

L'autre différence notoire entre les deux scénarios climatiques (pour le deuxième groupe de cultures) est qu'en climat A2, une grande partie de l'Europe semble gagner en efficience d'utilisation de l'eau, de l'Espagne à quasiment toutes les régions au Nord de l'Italie (classe 2 et 4). A l'inverse, en climat B1, seules les régions appartenant à la classe 4 (autour de la Mer du Nord et de la Mer Baltique) semblent gagner en efficience d'utilisation de l'eau, la classe 2 n'étant prépondérantes que dans un nombre très limité de régions. Ce résultat recoupe les

évolutions de volumes d'irrigation diagnostiquées dans le chapitre 4, et permet d'isoler les cultures qui seront vulnérables à la disponibilité des ressources en eau dans le climat futur.

Enfin, les tendances régionales ainsi détaillées par groupe de cultures sont le plus souvent majoritaires à l'échelle régionale (i.e. la classe majoritaire représente plus de 50% des cas, non montré). On peut donc en conclure, à l'inverse des tendances régionales obtenues toutes cultures confondues, que les différentes évolutions du comportement des cultures sont bien différenciées régionalement, une fois séparées en sous-groupes de cultures.

5.3. Perspectives

A l'aide de l'analyse de l'élaboration du rendement, nous avons mis en évidence les variables importantes qui caractérisent l'évolution du comportement des cultures européennes sous changement climatique, telle que simulée dans le cadre de cette thèse. Nous avons développé un outil de classification statistique, permettant de traiter à l'échelle Européenne la variabilité de cette évolution entre cultures, régions, et scénarios de changement climatique.

On a pu isoler différents comportements (4 classes) communs aux deux scénarios climatiques, permettant de qualifier l'évolution de l'ensemble des cultures considérées à l'échelle Européenne. En séparant les cultures en 2 sous-groupes (maïs, tournesol et soja d'une part, et les autres cultures d'autre part), nous avons pu isoler différents ensembles de régions, dans lesquelles les comportements semblent majoritaires par groupe de cultures, et contrastés entre groupes de culture. Le premier groupe semble majoritairement subir des fortes réductions de cycle, accompagné d'une baisse du rendement (plus marqué pour A2, et à l'exclusion du Nord du l'Allemagne, et des Pays-Bas et du Danemark en A2). Pour le deuxième groupe, la région du Nord de l'Allemagne, des Pays-Bas, du Danemark, et du Sud de la Suède et de le Finlande, est caractérisée par une évolution modérée de la durée de cycle, et une forte hausse conjointe du rendement et de l'efficience d'utilisation de l'eau. Tandis qu'en B1, le reste de l'Europe semble assez peu sensible au changement climatique pour ce deuxième groupe de culture, en A2 la moitié Nord de l'Europe (i.e. au Nord de l'Italie) semble au moins gagner en efficience d'utilisation de l'eau, tandis que certaines régions semblent soit souffrir d'une réduction de cycle (similaire au comportement majoritaire du premier groupe de culture), ou gagner en rendement.

Les scénarios de changement climatique se distinguent par des poids relatifs différents entre classes d'un scénario à l'autre, le scénario B1 étant caractérisé par une plus faible diversité de comportement. Ce résultat est complémentaire de l'impact légèrement moins bénéfique sur la marge brute à l'échelle agrégée, en B1 en qu'en A2 (chapitre 4). De plus, ce résultat s'explique en partie par une hausse plus modérée de la concentration atmosphérique en CO_2, et donc une moins grande hausse des effets sur l'accumulation de biomasse et l'efficience d'utilisation de l'eau. A la lumière de l'impact de l'adaptation des itinéraires techniques diagnostiqués dans le chapitre 4, ces tendances devraient largement différer une fois les itinéraires techniques adaptés. Il serait donc intéressant d'intégrer ces simulations, et ainsi diagnostiquer les différences de comportement dues à une adaptation de l'itinéraire

technique telle que simulée dans le chapitre 4, c'est-à-dire une adaptation de l'itinéraire technique optimale, reposant sur la connaissance à priori de la meilleure adaptation possible.

De manière plus globale, la méthode développée paraît prometteuse, et il serait intéressant de mieux articuler les outils de classification et l'analyse de l'élaboration du rendement pour obtenir une description plus exhaustive des processus importants qui sont à l'origine des évolutions de comportement des cultures à l'échelle Européenne. L'objectif de long terme est de mettre en relation ces mécanismes avec les différentes composantes de l'itinéraire technique, afin d'en proposer une adaptation. On pourrait ainsi proposer des typologies d'adaptation des itinéraires techniques par espèces, régions, et scénario climatiques. Il serait de plus intéressant de comparer cette nouvelle forme d'adaptation (résultant d'une analyse agronomique) aux adaptations optimales, telles que simulées dans le chapitre 4.

Enfin, des études récentes sur l'adaptation des pratiques agricoles au changement climatique ont montré que si des leviers existaient, leur adoption et leur diffusion sont sujettes à plusieurs limites (Kenny, 2011). En particulier, dans l'objectif d'une adaptation effective, l'implication des acteurs concernés (exploitants agricoles, instituts techniques, élus locaux, etc.) dès l'élaboration de l'étude d'impact est un facteur clé, et les outils utilisés doivent être capables de fournir des estimations réalistes d'une large gamme de variables d'intérêt (Rivington et al., 2007; Matthews et al., 2008). Les résultats préliminaires de ce chapitre montrent que notre outil de modélisation pourrait y parvenir, permettant ainsi de faire le lien entre l'échelle continentale et l'échelle locale.

Chapitre 6
Mitigation et changement climatique dans le secteur agricole

Dans les deux chapitres précédents, nous nous sommes attachés à décrire la réponse de l'offre agricole Européenne au changement climatique, en considérant les adaptations autonomes à l'échelle de la ferme.

Cependant, l'Union Européenne s'est fixée pour objectif de réduire ses émissions de GES de 20% en 2020, par rapport à 2005 (EC, 2008). Les objectifs, ainsi que les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre, sont déclinés par secteurs économiques. En particulier, le secteur agricole sera mis à contribution, sans que des moyens et des objectifs précis ne soit définis.

Le choix des outils et des moyens institutionnels à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif global de mitigation, ainsi que leurs interactions de ces interventions avec d'autres problématiques liées de politique publique liées au secteur agricole, sont des enjeux scientifiques importants pour l'échelle régionale dans le cadre de l'interaction entre le climat et l'agriculture. Dans ce chapitre, nous mettrons en valeur la contribution que peut apporter notre outil de modélisation à l'égard de ces enjeux.

Je préciserai d'abord dans une première partie ces enjeux scientifiques. Ensuite, dans une deuxième partie, je présenterai les premiers résultats d'un ensemble de simulation réalisé avec l'outil de modélisation, et apportant des réponses préliminaires aux enjeux identifiés. Dans une troisième partie, enfin, j'évoquerai quelques perspectives de poursuite de ces travaux.

6.1. Mitigation du changement climatique et agriculture Européenne

6.1.1. Emissions et mitigation dans l'agriculture Européenne

En Europe, l'agriculture est un émetteur net d'émissions de gaz à effet de serre: l'agriculture Européenne (UE-27) émettait en 2009 d'environ 476 $MtCO_2eq$ de gaz à effet de serre, soit environ 1% pourcent des émissions globales de GES, 11% des émissions Européennes, et un peu moins de 10% des émissions agricoles mondiales[17]. Ces émissions ont émises sous forme de protoxyde d'azote et de méthane (respectivement 273 et 203 $MtCO_2eq$ en 2009), et l'agriculture est le premier contributeur aux émissions anthropiques Européennes de ces deux composés, respectivement à hauteur de 76% et 49%. Les émissions de protoxyde d'azote sont principalement dues à la fertilisation azotée des sols, et à la gestion des déjections animales. Les émissions de méthane sont principalement dues à la fermentation entérique (digestion anaérobie des aliments par les animaux), et à la gestion des déjections animales.

On peut distinguer pour l'agriculture trois principaux moyens de contribution à l'effort de mitigation des émissions anthropiques de GES:

- Réduire les émissions du secteur agricole (N_20 et CH_4). La gestion des terres agricoles et de l'alimentation animale peut offrir un grand potentiel de réduction des émissions de protoxyde d'azote et de méthane: amélioration de l'efficience de la fertilisation azotée, réduction du labour, gestion des résidus de culture, gestion des prairies et du pâturage, orientation de l'alimentation animale vers des composés moins méthanogènes, gestion des déjections animales, etc.
- Séquestrer du carbone dans les sols (CO_2). De la même manière que la gestion des sols agricoles peut être modifiée en vue d'en réduire les émissions de protoxyde d'azote, on peut orienter les itinéraires techniques vers un bilan net négatif en termes d'échanges de CO_2 avec l'atmosphère. Pour le même objectif, une des options envisagées est la conversion de terres agricoles vers des cultures pérennes, ou de la forêt (afforestation).
- Contribuer à la réduction des émissions hors secteur agricole. L'agriculture peut d'une part fournir des sources d'énergie alternatives à l'énergie fossile à partir de la biomasse (mitigation comptabilisé dans les secteurs du transport et de l'énergie), et d'autre part réduire sa pression sur l'usage des sols via une réduction de son expansion (secteur du changement d'usage des sols).

Il existe de nombreuses estimations du potentiel de mitigation à l'échelle Européenne, qui diffèrent largement: le potentiel moyen est estimé à environ 670 $MtCO_2eq$ par an à l'horizon 2030, avec un intervalle de confiance à 95% qui va d'un potentiel quasi nul à 1340 $MtCO_2eq$/an (Smith et al., 2007). De manière générale, le bilan net des sols Européens en termes d'échanges

[17] Selon les données de la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique), http://unfccc.int/ghg_data/items/3800.php

de N_2O, CH_4 et CO_2 avec l'atmosphère, ainsi que les moyens techniques les plus appropriés pour les réduire ou séquestrer du carbone, sont spatialement très hétérogènes, et sujets à une large incertitude (Freibauer et al., 2004; Schulze et al., 2009). Il existe de sources d'incertitude quand eu niveau effectif de mitigation atteignable, de différentes natures : (i) le degré l'adoption de mesures d'adaptation, (ii) le degré d'efficacité de ces mesures, et (iii) la permanence de leurs effets sous influence de l'évolution des déterminants de l'agriculture (Freibauer et al., 2004; Smith et al., 2007).

En particulier, pour des raisons de contraintes technique ou de coût élevé, certaines options techniques ne seront mises en places que si elles sont soutenues par des politiques règlementaires ou incitatives. Par exemple, on estime qu'à l'échelle globale pour une valorisation de la mitigation à 20, 50 et 100 US$t/$CO_2$eq, la mitigation effective atteindrait respectivement 27, 47 et 74% du potentiel de mitigation (Smith et al., 2007). De telles politiques sont donc indispensables pour une contribution significative à l'effort de mitigation. La conception de telles politiques doit prendre en compte de nombreux critères : permanence des abattements obtenus, efficacité économique, fuite potentielles d'émissions, faisabilité, acceptabilité, etc.

L'Union Européenne a mis en place une stratégie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20% entre 2005 et 2020, avec des outils et des objectifs différenciés entre secteurs (EC, 2008). Les secteurs les plus concentrés et les plus émetteurs (industrie, énergie) sont soumis au système de d'échanges de quotas (Emissions Trading System ETS). Les secteurs hors ETS, dont fait partie l'agriculture, se voient attribuer un objectif de réduction de 10% avec des cibles différenciées par pays, allant pour l'UE-15 de -1% (i.e. une autorisation d'augmentation des émissions de 1%) à +20% (EC, 2009a). De plus, l'Union Européenne a fixé un objectif de 10% d'utilisation de biocarburants à l'horizon 2020, assorti de critères d'éligibilité en termes de contenu en émissions carbonées.

Le secteur agricole Européen doit donc participer à l'effort de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais le niveau de cette participation à la cible hors ETS, ainsi que les moyens d'y arriver, sont à la responsabilité de chaque Etat Membre. La mise en œuvre de cet objectif dans le secteur agricole soulève différentes questions scientifiques importantes, qui relèvent de l'échelle régionale.

6.1.2. Les enjeux de la mise en œuvre d'une politique de mitigation en Europe

Il existe de nombreux outils de régulation permettant de mettre en place une politique de mitigation. On distingue deux grandes familles : les instruments de type quantité (par exemple des quotas d'émission), prix (taxe sur les émissions, ou subventions, système d'échange de droits à polluer), ou normatifs (régulation des techniques de production). Chacun de ces outils possède des caractéristiques différentes, et dont l'analyse sous différents points de vue (économique, éthique, politique) participe au choix de l'instrument. Nous allons détailler les principaux critères de décision dans le cadre de l'Union Européenne, et les enjeux scientifiques associés.

Cout-efficacité. Il s'agit de minimiser le coût social (i.e. pour l'ensemble des agents) permettant d'atteindre la cible souhaitée. Cet objectif est un des 5 principes clés de l'engagement de l'Union Européenne à réduire ses émissions de 20% entre 2005 et 2020 (EC, 2008). Il repose sur la considération des impacts de la mitigation en termes de compétitivité, d'emploi, et de cohésion sociale. Ces considérations sont importantes dans un cadre où l'économie Européenne est de plus soumise à la concurrence internationale. Pour autant, le choix de l'instrument le plus coût-efficace n'est pas forcément aisé (Weitzman, 1974), et il a été montré dans le cadre de l'agriculture Européenne que des outils de type taxe sur les émissions (ou, de manière équivalente, un système d'échange de droits à polluer) serait largement plus coût-efficace qu'un quota uniforme (De Cara et al., 2005)[18]. Ce principe guide aussi en partie le choix de différencier les secteurs en terme d'objectif et d'outil de régulation : les secteurs industriels et de l'énergie concentrent le plus d'émissions, ils ont les objectifs les plus contraignants, et sont soumis au même outil de régulation (ETS, relativement coût-efficace). L'évaluation des *coûts marginaux d'abattement* dans le secteur agricole relativement aux autres secteurs est une question importante en vue de l'extension de ce type d'outil au secteur agricole, qui permettrait de répartir les efforts de manière la plus coût-efficace. Les estimations diffèrent cependant largement entre méthodes (Vermont and De Cara, 2010), et la levée de cette incertitude est un des enjeux scientifiques importants associé aux interactions entre climat et agriculture à l'échelle régionale.

Principes éthiques. Plusieurs principes guident le choix des moyens de la mitigation au niveau Européen. D'une part, les cibles différenciées par Etat Membre sont le résultat d'un principe d'*équité*, qui reconnait des capacités d'investissement différenciées entre Etats Membres (EC, 2008). Cependant, il faut noter que cette répartition ne semble pas coût-efficace pour le secteur agricole Européen (De Cara and Jayet, 2011), et les moyens mis en œuvre pour atteindre répondent donc à des arbitrages entre plusieurs principes (ici, coût-efficacité et équité). De même, le principe « *pollueur-payeur* », préconisant de manière générale que les frais de réduction d'une pollution environnementale doivent incomber en priorité au pollueur, est adopté par l'Union Européenne. Ce principe participe à la différence de cible par secteur, plus forte pour les gros émetteurs. Il jouera sur le partage du coût social entre systèmes de production, consommateurs, et contribuables. Pour autant, une politique qui rendrait trop vulnérable les systèmes de production agricole poserait des problèmes d'acceptabilité. L'estimation des coûts privés et des coûts sociaux (coûts totaux) est donc aussi un enjeu scientifique important à l'échelle Européenne.

Intégration. Une question importante liée à la mise en place d'une politique de mitigation dans le secteur agricole est son intégration avec les autres politiques ciblant l'agriculture. En Europe, l'agriculture fait l'objet d'une forte intervention via la Politique Agricole Commune (PAC), et différents instruments de régulation visant à réduire les autres externalités environnementales liées à l'agriculture (réduction de la biodiversité, pollutions azotées, érosion des sols). Ces politiques ont un impact important sur les émissions de GES : entre 1990 et 2009,

[18] En particulier, les émissions sont partagées entre de nombreux agents, aux coûts marginaux d'abattement très hétérogènes. Pour qu'une politique de type quota soit aussi cout-efficace qu'une taxe, il faudrait imposer des quotas différenciés par agent, en fonction de leurs coûts marginaux d'abattement.

les émissions d'origine agricole dans l'Union Européenne on diminué de 22%, et une part importante de cette évolution est attribuée à l'effet des réformes de la PAC, et à l'introduction de régulations des émissions azotées (EC, 2009b; Galko and Jayet, 2011). A l'inverse, il a été montré qu'une politique de mitigation a des impacts sur les cibles d'autres instruments de régulation environnementale (Konyar, 2001; Cowie et al., 2007; Schneider et al., 2007). Les implications réciproques d'une politique pour les objectifs de l'autre doivent être anticipées, et les instruments d'intervention de ces politiques publiques doivent être coordonnés. Ce type de question se pose aussi vis-à-vis des conséquences des politiques Européennes en dehors de l'Europe (qu'elles soient dédiées à une régulation interne à l'Europe, ou à des questions globales comme la libéralisation des échanges commerciaux), via des mécanismes de large échelle (commerce, équilibre offre-demande au niveau international). Par exemple, (van Meijl et al., 2006) évalue les changements d'usage des sols imputables aux accords du cycle de Doha à l'Organisation Mondiale du Commerce comme faible en Europe, mais très important en Afrique. De même, le bilan carboné net du développement de la filière agro-carburant est très incertain, à cause de possibles changements indirects d'usage des sols (Lotze-Campen et al., 2010; Smith et al., 2010; Havlík et al., 2011). La politique Européenne de soutien à la filière bioénergie fait dans ce cadre l'objet d'un vif débat.

Interaction avec le changement climatique et l'adaptation. En affectant les systèmes de production agricole, le changement climatique peut aussi affecter sa capacité à contribuer à l'effort de mitigation. De même, la mise en place de mesure de mitigation peut affecter la vulnérabilité des systèmes de production au changement climatique (Rosenzweig and Tubiello, 2007). D'une part, à l'échelle de la ferme, on ne sait pas aujourd'hui si le pilotage des systèmes de production pour un objectif de mitigation, ou d'adaptation au changement climatique est compatible, ou à l'inverse nécessite un arbitrage. D'autre part, la même question se pose à l'échelle de la prise de décision des politiques publiques dédiées à l'agriculture, concernant les interactions entres les instruments de la mitigation et de l'adaptation. L'intégration de ces deux champs d'action est défini comme une des priorités par l'Union Européenne dans sa réflexion sur l'adaptation au changement climatique (EC, 2009c, 2009d). Il y a aujourd'hui très peu d'étude sur le sujet, et cette interaction est un enjeu scientifique important (Smit and Wandel, 2006; Kenny, 2011).

Résumé

Les émissions de GES du secteur agricole, ainsi que les mesures techniques à mettre en place en vue d'une contribution du secteur agricole à l'effort de mitigation sont spatialement très hétérogènes. La mise en pace d'outil de politique publique est indispensable pour atteindre un niveau significatif de mitigation, mais pose de nombreuses questions, qui nécessitent de quantifier précisément les coûts privés et sociaux d'un outil de régulation des émissions de GES d'origine agricole. D'autre part, ces instruments doivent être intégrés avec les autres politiques liées au secteur agricole. L'identification des synergies et conflits potentiels est une des priorités de l'Union Européenne, et représente un enjeu scientifique important. En particulier, le potentiel d'interactions entre mitigation et adaptations est très incertain.

6.2. Interactions entre mitigation et adaptation: premiers résultats

Notre outil de modélisation est peu adapté à la prise en compte de mécanismes de large échelle tels que les changements indirects d'usage des sols liés à la mise en place d'une politique de soutien à la filière bioénergie. Il est en revanche approprié pour évaluer les coûts marginaux d'abattement associés à un instrument de mitigation, pour l'ensemble des agents à l'échelle Européenne (coût social), ainsi pour les différents systèmes de production (coût privé). En particulier, nous pouvons évaluer les impacts du changement climatique, et de l'adaptation de l'offre agricole à celui-ci, sur les problématiques liées au choix d'un instrument de mitigation. Dans cette section, nous proposons une première analyse de ces questions.

6.2.1. Méthodologie

Avec notre outil de modélisation, nous avons réalisé une série de simulations, permettant de comparer les impacts respectifs du changement climatique, de l'adaptation autonome, et de la mise en place d'une politique de mitigation des émissions agricoles de GES (hors CO_2) sur l'offre agricole Européenne, et leur interaction. Cette série de simulations (résumée dans le tableau 6.1) a trois objectifs:

(a) Comparer les impacts respectifs du changement climatique, et d'une politique de mitigation en climat présent. Avant d'étudier les interactions entre mitigation et adaptation, nous allons comparer les impacts du changement climatique tels que présentés dans le chapitre 4, aux impacts d'une mise en place d'une politique de mitigation, afin d'identifier les principaux processus en jeu dans le modèle. Nous utilisons les jeux de fonctions de production CTL, A2, et B1 (sans adaptation des pratiques agricoles pour les climats futurs) présentés dans le chapitre 4. Pour chaque jeu de fonctions de production, le scénario socio-économique pris en compte est le scénario CAP du chapitre 3 (prix basés sur l'année 2002, et mise en œuvre de la PAC tenant compte des changements opérés entre 2002 et 2008). La prise en compte d'une politique de mitigation est simulée par deux scénarios additionnels en CTL, dans lesquels une taxe sur les émissions agricoles hors CO_2 est appliquée à chaque agent du modèle AROPAj, respectivement à 40 et 80 €/tCO_2eq. Ces scénarios seront dénommés CTL-T40 et CTL-T80. La politique de mitigation retenue repose donc sur un instrument de type prix relativement classique et réputé coût-efficace. Enfin, il faut noter que l'on pourra différencier le *coût privé des producteurs* (baisse de marge brute de chaque agent), du *coût social à l'échelle Européenne* (baisse de marge brute au niveau agrégé, corrigé du montant de taxe prélevé, qui ne représente qu'un transfert monétaire et non une perte au niveau Européen).

(b) Evaluer l'impact du changement climatique sur une politique de mitigation. L'objectif étant de diagnostiquer des interactions entre adaptation et mitigation, il importe d'isoler la contribution propre au changement climatique dans la réaction de l'offre agricole Européenne à la mise en place d'une politique de mitigation. Pour cela, nous appliquons les deux scénarios de taxe pour chaque scénario de fonctions de production du climat futur. Ces scénarios seront dénommés A2-T40, A2-T80, B1-T40 et B1-T80.

(c) Evaluer les interactions potentielles entre adaptation au changement climatique et politique de mitigation. Une fois dégagés les principaux traits des impacts d'une politique de mitigation tout en différentiant les climats présent et futur, nous cherchons à identifier les interactions entre mitigation et adaptation. Pour chaque scénario de changement climatique intégrant les adaptations de pratique agricole (A2-ADAPT et B1-ADAPT), nous imposons des scénarios de mitigation : A2-ADAPT-T40, A2-ADAPT-T80, B1-ADAPT-T40 et B1-ADAPT-T80.

SCENARIO	Production functions	Socio-economic context
(a) Compare mitigation, climate change, and adaptation impacts		
CTL	CTL	CAP
CTL-T40		CAP + Tax on non-CO2 GHG emissions (at 40 and 80 €/tCO2eq)
CTL-T80		
A2 A2-ADAPT	A2 A2-ADAPT	CAP
B1 B1-ADAPT	B1 B1-ADAPT	
(b) Evaluate climate change impact on mitigation's effects		
A2-T40	A2	CAP + Tax on non-CO2 GHG emissions (at 40 and 80 €/tCO2eq)
A2-T80		
B1-T40	B1	
B1-T80		
(c) Evaluate adaptation and mitigation interactions		
A2-T40	A2	CAP + Tax on non-CO2 GHG emissions (at 40 and 80 €/tCO2eq)
A2-T80		
B1-T40	B1	
B1-T80		
A2-ADAPT-T40	A2 ADAPT	
A2-ADAPT-T80		
A2-ADAPT-T40	B1 ADAPT	
A2-ADAPT-T80		

Tableau 6.1 - Liste et configuration des simulations réalisées pour (a) comparer les effets du changement climatique et de la mise en place d'une politique de mitigation, (b) évaluer l'impact du changement climatique sur l'effet d'une politique de mitigation, et (c) évaluer les interactions entre mitigation et adaptation au changement climatique. Pour chaque scénario simulé, les jeux de fonctions de production employés et le contexte socio-économique implémenté sont détaillés. CAP fait référence à une mise en œuvre proche de la politique agricole actuelle, avec des prix de 2002 (voir chapitre 3 pour plus de détail).

Le scénario de politique de mitigation que nous avons mis en œuvre est une politique généralement évaluée comme coût-efficace, puisque la taxe permet d'égaliser les coûts marginaux d'abattement des émissions entre exploitants agricoles. Le principal point que nous allons traiter est l'évolution des coûts d'abattements (c'est-à-dire les coûts d'une réduction des émissions) sous changement climatique puis adaptation. On s'intéressera en particulier aux coûts sociaux (à l'échelle Européenne agrégée), et privés (à l'échelle Européenne et son hétérogénéité régionale). Il faut rappeler enfin que nous ne nous intéressons ici qu'à la réaction de court terme de l'offre agricole toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire sans prendre en

compte les évolutions possibles de la demande en produits agricoles, de l'offre d'intrants agricoles, ni de la structure de l'offre agricole ou de la technologie.

6.2.2. Résultats

6.2.2.1. Changement climatique et mitigation en climat présent

La figure 6.1 compare les impacts respectifs des scénarios de changement climatique, avec ou sans adaptation (A2 et B1, en bleu et rouge respectivement, et rouge pâle et bleu pâle pour A2-Adapt et B1-Adapt), et du scénario de mitigation en climat présent (pour 2 valeurs de la taxe : 40 et 80 €/tCO_2eq, couleurs respectives ocre et marron). La figure présente à la fois l'évolution relative à l'échelle Européenne (points) et une mesure de la dispersion de la distribution des évolutions relatives régionales.

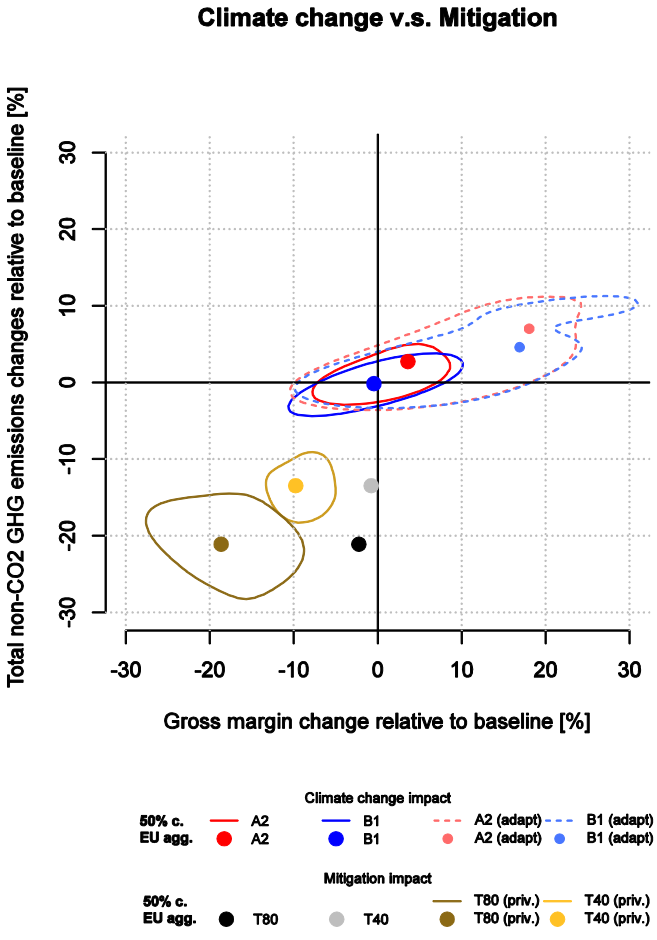


Figure 6.1 - Impacts comparés du changement climatique et d'une taxe sur les émissions de GES (hors CO_2) sur la marge brute par hectare, et sur les émissions de GES (hors CO_2) par hectare. Les points représentent les changements relatifs à l'échelle Européenne, tandis que les contours délimitent la zone à 50% de la densité bivariée estimée de la distribution des évolutions régionales*. L'impact des scénarios de mitigation est donné pour une taxe à 40€/tCO_2eq et 80€/tCO_2eq sans restitution de la taxe (coût privé, couleurs ocre et marron) et avec (coût social, gris et noir), tandis que les couleurs rouges et bleu décrivent l'impact des scénarios de changement climatique B1 et A2, avec (tirets et petits points) ou sans adaptation (traits pleins et gros points).

** Cette zone est la plus petite zone possible qui contienne 50% des régions, et s'interprète comme l'espace interquartile pour des données univariées.*

.

A l'échelle Européenne ainsi qu'en termes d'hétérogénéité spatiale, on retrouve les résultats du chapitre 4: sans adaptation, le changement climatique a un impact sur la marge brute et les émissions de GES relativement neutre à l'échelle Européenne (pour les deux grandeurs: +3% pour A2, +0% pour B1), mais variable à l'échelle régionale. En considérant l'adaptation, la marge brute augmente au niveau agrégé (respectivement +18% et +17% en A2 et B1), et sa variabilité régionale augmente fortement. Les émissions de GES et leur variabilité régionale sont elles aussi augmentées mais dans une moindre mesure (+7% et +5%).

La mise en place d'une politique de mitigation entraîne logiquement une baisse des émissions et de la marge brute à l'hectare des producteurs (coûts privés). La figure permet d'estimer les taux d'abattement pour une taxe de 40 et 80 €/t$C0_2$eq, qui sont respectivement de 13% et 21%. Ces taux d'abattement correspondent à ce que nous attendons avec notre outil de modélisation, pour lequel la possibilité prêtée aux agents de choisir le taux de fertilisation a tendance à produire des estimations dans la fourchette basse de la littérature (Vermont and De Cara, 2010).

Le coût social à l'échelle Européenne est faible (points gris et noir), de l'ordre de 1 et 3% de la marge brute agricole Européenne, pour des niveaux de taxe de 40 et 80 €/tCO_2eq. La différence entre coût social et coût privé d'abattement permet aussi de comparer les impacts du changement climatique aux enjeux relatifs à l'implémentation d'une taxe. En effet, cet écart de variation de marge brute entre les scénarios n'intégrant pas la taxe (par exemple -19% pour une taxe à 80 €/tCO_2eq, couleur marron) et ceux considérant un reversement de la recette de la taxe à l'agriculteur (-2%, couleur noire) montre le poids de la question redistributive pour l'agriculteur. La différence d'impact sur sa marge brute entre ces deux scénarios redistributifs extrêmes est quasiment du même ordre de grandeur que le bénéfice potentiel de marge brute en cas de changement climatique, mais il est beaucoup moins variable spatialement. Donc si la mise en place d'une politique de mitigation coût-efficace de type taxe apparait faible pour la société, pour l'agriculteur certaines questions relatives à son implémentation sont du même ordre de grandeur en terme de marge brute que l'effet du changement climatique, au signe près.

6.2.2.2. Mitigation en climat futur

Etant donné que nous considérons une réponse de court terme de l'offre agricole aux scénarios considérés, les interactions entre changement climatique et adaptation ne peuvent être analysées que dans le cadre de l'existence conjointe du changement climatique et de la politique de mitigation. L'impact du changement climatique lui-même sur les coûts d'abattement des émissions doit donc être au préalable isolé. La figure 6.2 compare les effets de la mise en place d'une politique de mitigation de type taxe dans le contexte du climat présent, et du climat futur, sans adaptation. Se sont les scénarios A2-T40, A2-T80, B1-T40 et B1-T80, qui sont différenciés dans la figure 6.2 entre scénarios de climat par des couleurs (CTL, A2 et B1, avec des couleurs respectivement noire, rouge et bleue).

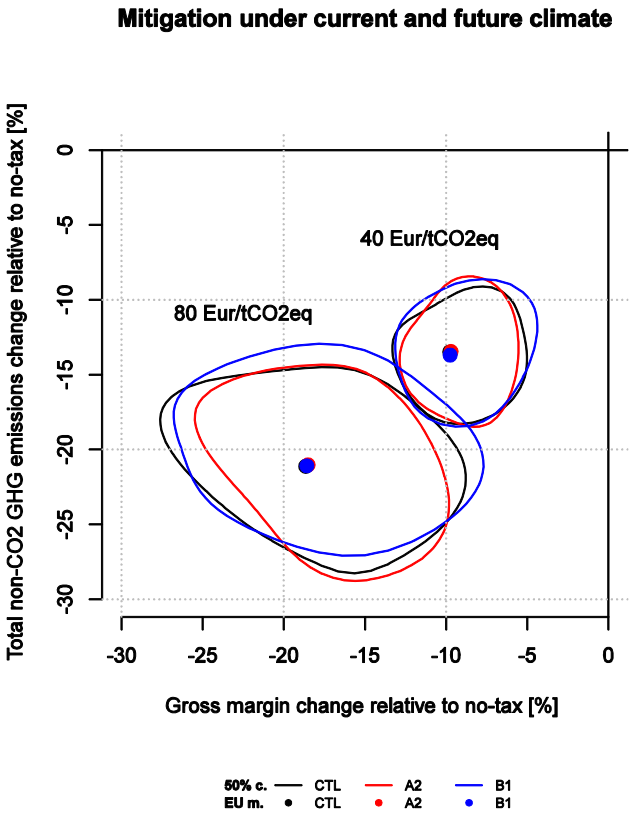


Figure 6.2 - Coûts d'abattement privés comparés entre le climat présent et les climats futurs A2 et B1, pour deux niveaux de taxe (40 et 80 €/tCO_2eq). Comme dans la figure 6.1, la figure présente les évolutions relatives de marge brute (sans restitution de la taxe, i.e. coût privé) et d'émissions de GES (hors CO_2) agrégés à l'échelle Européenne (points), ainsi que leur dispersion à l'échelle régionale. Les couleurs noire, rouge, et bleu indiquent respectivement les climats CTL, A2 et B1.

En termes de coûts d'abattement, les résultats montrent que la réponse de l'offre agricole Européenne à une politique de mitigation semble peu affectée par le changement climatique (sans adaptation), ni au niveau agrégé ni dans sa variabilité interrégionale. Ces résultats s'expliquent par le fait que les mécanismes de réduction des émissions reposent essentiellement sur la réduction des intrants azotés, la réallocation des terres dédiées aux cultures annuelles au profit des espèces ayant le moins de pertes azotées, et l'adaptation de l'alimentation animale au profit des aliments les moins méthanogènes. En effet, le changement climatique n'entrave pas fondamentalement ces degrés de liberté. Nous n'avons cependant pas étudié la distribution géographique des coûts d'abattement, qui peut être affectée.

6.2.2.3. Interactions entre mitigation et adaptation

Nous nous sommes intéressés à deux questions particulières relatives aux interactions entre adaptation et mitigation, que nous avons traitées au niveau agrégé Européen et en termes de variabilité interrégionale :

- L'adaptation au changement climatique modifie-t-elle les coûts d'abattement ?
- La mise en place d'une politique de mitigation peut-elle modifier les gains de l'adaptation au changement climatique ?

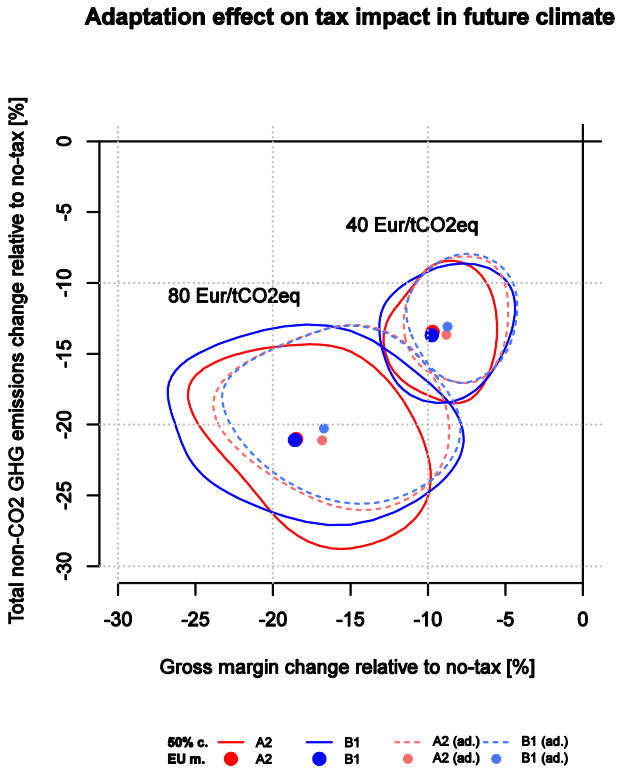


Figure 6.3 - Interactions entre mitigation et adaptation. (a) Impact de l'adaptation sur les coûts d'abattement des émissions : la figure présente les coûts d'abattement à l'échelle agrégée (points) et leur variabilité interrégionale (contours), pour les climats futur A2 et B1 (couleurs rouge et bleu), sans (contours pleins, et petits points) ou avec adaptation (contours en tirets et gros points).

Comme le montre la figure 6.3, la prise en compte de *l'adaptation diminue légèrement les coûts privés d'abattement* au niveau agrégé, et ceci d'autant plus que le niveau de taxe est élevé: pour un niveau d'abattement quasiment égal, les coûts d'abattements sont réduit de respectivement 1 et 2 pourcents pour des taxes de 40 et 80€/tCO_2eq. En termes de variabilité interrégionale, il semble aussi que celle-ci diminue légèrement. En revanche, le coût social agrégé à l'échelle Européenne n'est pas affecté par la prise en compte de l'adaptation. Il semble donc que l'adaptation autonome de l'offre agricole Européenne ne modifie pas fondamentalement le coût social agrégé d'une politique de mitigation, et en diminue légèrement les coûts privés. De même, le *gain de l'adaptation* au changement climatique est aussi *légèrement augmenté* à l'échelle agrégée *par la mise en place au préalable d'une politique de réduction des émissions de GES* (non montré). Le gain en marge brute du à l'adaptation est de 3 point supérieur (on passe de +14% à +17% en A2, et de +17% à +20% en B1). Il semble donc que la mise en place d'une politique de mitigation favorise légèrement les gains de l'adaptation autonome au changement climatique à l'échelle de la ferme.

Il semble donc que l'adaptation au changement climatique et la mise en place de mitigation soient mutuellement légèrement bénéfiques l'une à l'autre. Cependant, plusieurs limites caractérisent ces résultats préliminaires: d'une part les résultats obtenus sont d'une amplitude relativement faible, et d'autre part nous n'avons pas analysé que deux variables. De plus, il serait important de sortir du point de vue agrégé de l'analyse pour préciser quels sont les régions ou systèmes de production pour lesquels il y a synergie ou conflit entre adaptation et mitigation. Enfin, il faut rappeler la limite conceptuelle d'une statique comparative (avec une modélisation limitée à la réaction de court terme) pour l'étude des interactions entre mitigation et adaptation au changement climatique. En effet ces deux évènements peuvent avoir des temporalités très différentes, et leur interaction s'exprimer sur des évolutions de long terme.

6.3. Perspectives

Une première analyse m'a permis de comparer les impacts sur l'offre agricole Européenne d'une part du changement climatique et d'autre part d'une politique de mitigation. J'ai pu mettre en valeur le faible coût social d'une politique de mitigation des émissions de GES hors CO_2 dans le secteur agricole. En revanche pour l'offre agricole, en comparaison de l'impact du changement climatique, l'impact en termes de coûts privés d'une telle politique est fort s'il n'y a pas de redistribution de la taxe, et est du même ordre de grandeur (et de signe opposé) que l'impact du changement climatique. En termes de coût d'abattement, le changement climatique ne semble pas avoir d'impact si l'on ne prend pas en compte l'adaptation. En revanche, les premiers résultats montrent qu'il y a complémentarité entre adaptation au changement climatique et mitigation, dans le sens où l'un améliore l'efficacité ou les gains en termes de marge brute de l'autre.

Bien que ces résultats soient à approfondir, ils permettent de répondre à une partie des questions qui se posent au décideur public quant aux possibles interactions entre adaptation et mitigation. Par ailleurs, notre outil de modélisation peut permettre de soulever deux autres questions importantes pour le régulateur:

- En premier lieu, si la modalité de l'instrument de politique publique envisagée est jugée coût-efficace, elle ne taxe pas directement les émissions, car celles-ci sont très hétérogènes, et donc très coûteuses à contrôler. La comptabilité des émissions sujettes à taxe est basée sur une mesure des niveaux de production (plus facilement contrôlable), auxquels on applique des facteurs d'émission, homogènes sur l'Europe. Ces derniers ne prennent pas en compte les sources d'hétérogénéité spatiale des émissions, et sont supposés identiques en climat futur. La différence entre les réductions réellement obtenues et les réductions estimées par le régulateur public peut être un critère de rejet pour ce type de politique. Il est donc important de *quantifier l'évolution de cette différence* entre climat présent et futur, en prenant en compte l'adaptation des itinéraires techniques, les émissions elles-mêmes étant affectées par ces deux facteurs.

- Deuxièmement, l'agriculture a d'autres impacts environnementaux, notamment des pollutions azotées (sous forme d'ammoniac volatile, et sous forme de nitrate infiltré vers les nappes), et une pression forte sur les ressources en eau à des fins d'irrigation. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4, les besoins en eau sont fortement modifiés par le changement climatique d'une part, et par l'adaptation des pratiques d'autre part. Il est donc important de *quantifier l'évolution de ces impacts environnementaux* sous l'effet d'une politique de mitigation, du climat futur, et de l'adaptation, en vue d'une meilleure intégration de l'ensemble des politiques associées au secteur agricole.

Chapitre 7
Conclusions et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans le cadre général des interactions entre climat et agriculture, dont nous avons exploré certains des enjeux scientifiques, à l'échelle régionale Européenne. La définition que j'ai retenue de l'échelle régionale est essentiellement basée sur deux critères :

- D'une part c'est une échelle spatiale qui est d'*un ordre de grandeur plus large* que celle de la plus petite unité décisionnelle du secteur agricole (les exploitations), et qui se caractérise donc par une large diversité de systèmes de production, de leur environnement physique, technique, et économique.

- D'autre part, c'est une échelle qui se caractérise par des enjeux décisionnels particuliers dans la problématique du changement climatique : c'est l'échelle où se prennent les décisions centralisées stratégiques relatives aux négociations internationales, mais aussi où se conçoivent d'une part les politiques publiques centralisées liées à l'agriculture (soutien à la production, gestion des ressources naturelles), et la mise en place de politiques de mitigation d'autre part. Ces décisions peuvent par ailleurs moduler fortement l'impact du changement climatique sur l'agriculture, et les capacités d'adaptation.

J'ai voulu contribuer à une réflexion sur la modélisation intégrée, en explorant le rôle de mécanismes de court terme, caractéristiques de l'échelle du système de production, dans la formulation d'enjeux décisionnels de l'échelle régionale. Quel est le rôle des mécanismes typiques de l'échelle de l'exploitation agricole dans la réponse de l'offre agricole au changement climatique et à la mise en place d'une politique de mitigation ? Peuvent-ils générer des conflits potentiels entre ces objectifs de politique publique, ou bien à l'inverse des synergies ?

Dans ce chapitre, je résume les principaux résultats obtenus, autant en termes de développement de modélisation que d'applications concrètes. En particulier, j'en préciserai les limites, de natures technique et conceptuelle. Puis je précise les perspectives liées à ce travail.

7.1. Résultats et limites

7.1.1. Principaux résultats

Une revue de littérature a permis de dégager des processus caractéristiques de l'échelle de la parcelle à l'échelle de l'exploitation agricole, qui peuvent jouer un rôle dans la réponse de l'offre agricole à l'échelle régionale Européenne (chapitre 1). Le diagnostic de l'évolution du rendement et des impacts environnementaux à l'échelle de la parcelle nécessite de prendre en compte les mécanismes liés à l'évolution d'un cycle de culture, de l'échelle journalière à celle de la rotation des cultures. Le diagnostic de l'impact économique et environnemental à l'échelle de l'exploitation des changements de l'environnement physique associé au changement climatique nécessite la prise en compte des nombreux mécanismes d'adaptation, liés aux possibilités d'organisation de l'activité de production agricole (substitutions entre cultures, adaptation des itinéraires techniques, allocation des ressources et de la production). Le diagnostic à l'échelle régionale ou supérieure du comportement du système sol-plante et des moyens d'adaptation de court terme de l'offre agricole nécessite la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale de l'environnement physique, technique et socio-économique des systèmes de production. La prise en compte de ces sources de complexité est indispensable pour rendre compte précisément des interactions de court terme entre l'environnement physique (sol et atmosphère), technique (itinéraire technique) et socio-économique (typologie de l'exploitation en termes de d'orientation de production et de taille économique) des systèmes de production agricole à une échelle agrégée.

J'ai poursuivi le développement et évalué un outil de modélisation et des jeux de données associés (chapitre 2, 3) qui permettent la prise en compte de manière intégrée de la majorité de ces mécanismes à l'échelle Européenne. La réalisation d'un ensemble de simulations a permis de quantifier l'impact de ces sources de complexité à l'échelle Européenne.

En particulier, si on les prend en compte, les *impacts* estimés du changement climatique sur l'offre agricole Européenne se différencient assez de ceux publiés jusqu'à présent à l'échelle de l'Europe entière, par plusieurs caractéristiques : (i) l'impact en termes de rendement et de marge brute est plus amplement positif en Europe, et ne correspond pas à la vision actuelle d'une démarcation Nord/Sud en terme de signe, (ii) les conséquences en termes d'émissions de GES sont relativement modérés, tandis que les besoins en irrigation augmentent très fortement, (iii) la hiérarchie de ces effets entre régions et scénarios climatique n'est pas intuitive, et (iv) ces impacts peuvent remonter le climat dans la hiérarchie des déterminants futurs de l'activité agricole tels que précédemment évalués. Ces résultats reposent plus sur l'adaptation des itinéraires techniques que sur les autres marges de manœuvre à l'échelle des systèmes de production.

Une première analyse agronomique de l'évolution du *comportement des cultures* montre d'une part que les effets dominants sont très marqués par l'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 et de la température, et d'autre part très contrastés entre régions, cultures et scénarios de changement climatique. Ces résultats illustrent la complexité

de la réponse des systèmes de production à l'évolution de leur environnement physique sous changement climatique. Comme le montrent de nombreuses études dédiées à certaines régions, espèces végétales, et systèmes de production, de nombreux mécanismes non linéaires interagissent, et l'effet net est très hétérogène spatialement. Le rôle particulier de l'itinéraire technique a été évalué comme le plus important levier pour jouer sur le comportement des systèmes de cultures d'un point de vue de l'optimisation du rendement et de sa réponse à l'intrant azoté, mais son impact évalué sur l'efficience d'utilisation de l'eau est plus faible. Il est difficile de comparer à l'échelle Européenne ces résultats à la littérature, dans la mesure où les études qui couvrent l'ensemble du domaine considéré reposent sur une représentation trop simple des mécanismes, tandis que les études qui représentent correctement ces mécanismes ne couvrent qu'un domaine restreint. Cette difficulté illustre le caractère novateur des résultats.

En revanche, en première analyse, la prise en compte de ces mécanismes ne semble pas montrer de conflits potentiels entre adaptation et mitigation en termes de réaction de court terme de l'offre agricole Européenne. A l'inverse, l'adaptation autonome des systèmes de production agricole au changement climatique et à la mise en place d'une politique de mitigation des émissions de GES semblent se bénéficier mutuellement l'un à l'autre. Cependant, ce diagnostic repose sur un regard à une échelle très agrégée, et mérite d'être approfondi. Par ailleurs, les dernières évolutions de la Politique Agricole Commune (entre 2002 et 2008) ne semblent pas influer fortement sur la réponse simulée de l'offre agricole à ces perturbations. D'un point de vue des enjeux associés à l'intégration des politiques publiques à l'échelle Européenne, l'ensemble de nos résultats montrent qu'en première analyse, le principal conflit potentiel semble être un antagonisme entre l'adaptation au changement climatique et la réduction de la pression des activités agricoles sur la disponibilité des ressources en eau.

7.1.2. Limites techniques

L'approche développée dans cette thèse est cependant limitée par des contraintes techniques. En particulier, les mécanismes en jeu nécessitent une description fine et cohérente de l'hétérogénéité de l'environnement physique, technique et socio-économique des systèmes de production. Les jeux de données existants décrivant l'état du système en climat présent sont limités en détail et en résolution : il existe très peu de jeux de données concernant les itinéraires techniques à l'échelle Européenne, et les jeux de données décrivant la typologie des systèmes de production agricoles ou le climat possèdent une résolution spatiale supérieure à la résolution caractéristique de l'hétérogénéité spatiale des systèmes de production. De plus, à part concernant les données climatiques, il n'existe que très peu de projections de l'environnement technique et socio-économique de l'offre agricole Européenne.

De manière générale, cette limite implique une discrétisation de l'hétérogénéité des systèmes de production et de leur environnement dans notre approche. Dans le cadre de cette thèse, il faut d'une part un travail conséquent de construction de jeux de données en climat présent et futur, et d'autre part une méthodologie pour attribuer un environnement physique et technique à chaque unité discrète de système de production telle que décrite dans l'outil de modélisation.

A cet égard, le principal apport de cette thèse a été d'étendre un outil de modélisation en termes de couverture spatiale (de l'échelle de la région Française à l'EU-15), et de contexte climatique (génération de jeux de données techniques et physiques en climat futur). Les problèmes liés à la faible disponibilité de données et au maintien d'une cohérence entre elles ont fait l'objet de choix méthodologiques (chapitre 2). Ceux-ci sont indispensables, mais sont en revanche une source d'incertitude. Nous avons évalué une partie de cette incertitude (chapitre 3), mais une analyse plus générale de l'incertitude liée au choix méthodologiques est nécessaire.

L'intégration de ce type de processus à l'échelle Européenne permet aussi de fournir des diagnostiques nouveaux quant à l'évolution du comportement des principales cultures Européennes d'un point de vue agronomique. Ce potentiel a été partiellement abordé dans cette thèse (chapitre 5), et porte sur l'analyse des principaux mécanismes à l'origine des évolutions de certaines variables clés comme le rendement, les besoins en eau, et les émissions de polluants azotés. Cet objectif nécessite aujourd'hui le développement de méthodes d'analyse appropriées, et l'ensemble des données générées dans le cadre de cette thèse n'est pas entièrement exploitée. Par exemple, l'évolution des émissions de GES sous changement climatique et adaptation (chapitres 4 et 6) reposent sur la comptabilité IPCC, et non sur les sorties du modèle STICS, bien que nous les ayons calculées.

7.1.3. Limites conceptuelles

Je me suis limité dans cette thèse à la prise en compte d'une partie des mécanismes importants pour l'intégration des processus de l'échelle des systèmes de production à l'échelle Européenne. D'abord, en termes d'impact du changement climatique sur les principales cultures Européennes, un mécanisme important à l'échelle de la parcelle n'a pas pu être pris en compte : l'effet de l'évolution de la concentration atmosphérique en ozone troposphérique sur les plantes. Cet effet est important, car d'une part une exposition prolongée à des forts niveaux d'ozone endommage les tissus végétaux, et d'autre part la concentration en ozone affecte la capacité photosynthétique et l'efficience d'utilisation de l'eau des plantes. Cet effet risque donc d'affecter les effets du CO_2, qui a un poids important dans nos résultats. Cependant, cet effet pourrait être intégré à l'analyse, puisque parallèlement à ma thèse, une méthodologie appropriée a été développée à l'échelle de la France pour l'outil de modélisation que j'ai utilisé.

De plus il est important ici de repréciser que l'échelle temporelle la plus grande que j'ai considérée est de l'ordre de quelques années (définie par la notion de rotation agronomique), dans une perspective de cout terme. Je n'ai donc pas pris en compte des effets très importants pour l'effet de mécanismes caractéristiques de l'échelle des systèmes de production agricole, qui s'établissent à l'échelle de la dizaine d'année. En particulier, on peut citer les effets de la variabilité interanuelle du climat, de la stratégie à l'échelle de l'exploitation concernant cette variabilité, de l'évolution structurelle de l'offre agricole (changement d'orientation de production, évolution de la taille des exploitations, travail partiel, sortie et entrée de nouvelles exploitations, diffusion des innovations techniques, etc.). Ces mécanismes sont importants, notamment en termes d'adaptation au changement climatique. Si certaines questions pourraient être raisonnablement traitées avec notre outil de modélisation (la question de

l'évolution de la variabilité climatique, par exemple), ce sera plus difficile pour les questions qui se rattachent à l'évolution structurelle de l'offre, au vu du caractère statique de modèle d'offre agricole.

Par ailleurs, je n'ai considéré dans cette thèse que l'offre agricole, et je n'ai pas tenu compte d'une part des rétroactions potentielles via l'équilibre offre-demande, et d'autre part de l'état futur de la structure de l'offre agricole. L'outil de modélisation utilisé pourrait permettre de prendre en compte des effets de type rétroaction de marché, via une évolution des prix. En revanche, les évolutions futures des principaux déterminants de l'agriculture modifieront la structure et le contexte technique et socio-économique des systèmes de productions à l'horizon d'occurrence du changement climatique que nous avons considéré (fin de siècle). Cependant, l'effet de l'évolution de cette structure n'est pas traitable avec notre outil de modélisation sans des hypothèses très fortes : le modèle d'offre nécessite que celle-ci soit décrite par un volume conséquent de données, qu'aujourd'hui aucun modèle ne peu projeter à l'échelle Européenne sur cette échelle de temps.

7.2. Perspectives

De nombreuses perspectives sont ouvertes par cette thèse, que je décline en 3 axes scientifiques principaux et interdépendants :

(i) Approfondir les mécanismes caractéristiques de la décision de court terme des systèmes de production agricole.

(ii) Etendre la démarche d'intégration des mécanismes à d'autres échelles spatiales et temporelles relatives au système climat-agriculture.

(iii) Explorer les contraintes qu'implique cette complexité pour la conception de politique publique efficaces

Le premier axe reste dans le même cadre d'échelle spatiale et temporelle que cette thèse, mais s'oriente vers un élargissement thématique et méthodologique. Plus précisément, en termes thématiques il s'agirait d'étendre la description de la réaction des systèmes de production à différentes perturbations : d'une part à un ensemble plus large d'externalités environnementales (ensemble des pollutions azotées, érosion des sols, biodiversité) et d'autre part à un ensemble plus large de métriques permettant de décrire la vulnérabilité des systèmes de production et de leur milieu (par exemple l'évolution de la marge brute relative à des seuils de mise en danger de certain systèmes de production, ou l'évaluation des variations de volume d'eau prélevée pour irrigation relatif à un seuil critique pour les réseaux hydrologiques). En termes méthodologiques, cela nécessite de poursuivre les développements et l'évaluation de l'outil de modélisation, mais aussi d'aller vers des approches plus participatives, qui permettront d'affiner les mécanismes importants de la décision à l'échelle du système de production (variables clés concernant les informations sur lesquelles sont prises les décisions, et les modalités de la décision en terme d'organisation de systèmes de production), et donc permettant l'incorporation de nouveaux formalismes et jeux de données. Cet axe correspond au domaine d'application de l'outil de modélisation développé pour cette thèse, mais par contre nécessite une dimension fortement interdisciplinaire dans la conception de l'approche scientifique à développer. Cet axe nécessite aussi dans un premier temps la considération d'un domaine géographique bien inférieur à l'échelle Européenne, mais pourrait cependant respecter la définition régionale, telle que nous l'avons définie : des politiques publiques peuvent être conçues à une échelle très délocalisée, et l'hétérogénéité des systèmes de production agricole apparait très vite dès que l'on augmente l'étendue spatiale. Par exemple, un cas d'étude portant sur les enjeux liés à l'eau et l'agriculture dans un contexte de climat futur pourrait très bien se traiter à l'échelle d'un bassin versant.

Le deuxième axe s'oriente avant tout à un élargissement des échelles spatiales et temporelles considérées dans cette thèse, et s'oriente vers l'objectif de compléter l'intégration des mécanismes entre échelles. Cet axe nécessite la mobilisation d'autres outils de modélisation, au vu des limites propres à l'outil de modélisation développé dans le cadre de cette thèse : en termes d'échelle temporelle, notre outil de modélisation est limité à l'échelle de quelques années, et en termes d'échelle spatiale, à l'Europe. Cependant, rien n'empêche

l'utilisation conjointe de différents outils de modélisation. Ainsi, l'évolution simulée pour différents scénarios de l'offre agricole Européenne peut être transférée de manière stylisée comme une entrée pour d'autres modèles qui permettront de mesurer leur impact à plus large échelle (spatiale et temporelle). La réponse de l'offre agricole Européenne à différents scénarios, telle que simulée par l'outil de modélisation développé dans cette thèse peut être transférée à des modèles représentant la biosphère continentale dans le système climatique (en termes de couverture des sols agricoles et de pratiques agricoles stylisées). On pourrait ainsi envisager de diagnostiquer l'impact des mécanismes étudiés dans cette thèse sur le système climatique en terme biophysique, ce qui est aujourd'hui très peu réalisé, bien que cela représente une incertitude significative dans l'évaluation de l'impact de l'agriculture sur le système climatique à l'échelle régionale. De même, on peut envisager une méthode de couplage entre le modèle utilisé dans cette thèse et un modèle d'équilibre partiel du secteur agricole, qui permettrait d'évaluer l'impact des mécanismes étudiés dans cette thèse sur l'évolution des prix agricoles mondiaux, et les rétroactions potentielles sur l'offre agricole Européenne.

Enfin, le troisième axe est orienté vers le développement d'un support méthodologique intégrant des connaissances à disposition et à venir sur la problématique de la mise en place de politique publique associées aux interactions entre le climat et l'agriculture, pour le cas particulier de l'Europe. Le modèle utilisé dans le cadre de cette thèse représente de manière explicite la cible d'une partie importante des politiques Européennes dédiées à l'agriculture et l'environnement, ce qui permet d'évaluer certaines problématiques liée à la conception et à la mise en place de certaines de ces politiques. En particulier, il s'agit de traiter les problématiques liées à l'intégration des politiques publiques : soit les interactions entre politiques dédiées à différentes thématiques, soit les interactions entre politiques menées à plusieurs niveaux décisionnels (de l'Union Européenne à la politique d'une région française ou d'un bassin versant). Cet axe intégrerait les progrès des deux précédents, pour se concentrer sur les problématiques liées à la politique publique. Cet axe relève plutôt d'un enjeu de moyen terme stratégique de la recherche publique.

Cette thèse ouvre la voie à de nombreuses pistes, qui sont orientées vers un questionnement interdisciplinaire des enjeux futurs liés à la satisfaction conjointe des besoins humains essentiel, et la préservation du milieu physique sur lequel elle repose. De plus, le positionnement du travail à l'échelle régionale Européenne permet de faire progresser la connaissance utile à la décision publique, qui nécessite une forte intégration interdisciplinaire. Il est donc important de préciser que les fondements de ce travail reposent sur un effort précédent conséquent de travail interdisciplinaire, et appellent à la poursuite de cet effort.

Bibliographie

Abildtrup, J., Audsley, E., Feketefarkas, M., Giupponi, C., Gylling, M., Rosato, P., Rounsevell, M.D.A., 2006. Socio-economic scenario development for the assessment of climate change impacts on agricultural land use: a pairwise comparison approach. Environmental Science & Policy 9, 101-115.

Adams, D.M., Alig, R.J., Callaway, J.M., McCarl, B., Winnett, S.M., 1996. The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): Model structure and policy applications.

Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E., Shvidenko, A., 2007. Europe, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 541-580.

Antle, J.M., Capalbo, S.M., 2010. Adaptation of Agricultural and Food Systems to Climate Change: An Economic and Policy Perspective. Applied Economic Perspectives and Policy 32, 386-416.

Antle, J.M., Capalbo, S.M., Elliott, E.T., Paustian, K.H., 2004. Adaptation, spatial heterogeneity, and the vulnerability of agricultural systems to climate change and CO 2 fertilization: an integrated assessment approach. Climatic Change 64, 289-315.

Audsley, E., Pearn, K., Simota, C., Cojocaru, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M.D.A., Trnka, M., Alexandrov, V., 2006. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? Environmental Science & Policy 9, 148-162.

Barker, T., 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report, Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Batjes, N.H., 2006. 2006 / 02 ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grid (version 1 . 0), World.

Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K., Fuentes, M., Kållberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S., 2009. ERA report series N°1 - The ERA-Interim archive, Weather.

Bindi, M., Olesen, J.E., 2010. The responses of agriculture in Europe to climate change. Regional Environmental Change 11, S151-158.

Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. Global Change Biology 13, 679-706.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussie, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy 18, 309-332.

Brisson, N., Huard, F., Delannoy, D., Ripoche, D., Chambert, D., Flecher, C., Huber, L., Itier, B., Roche, R., Bancal, M.-O., Gagnaire, N., Durand, J.-L., Bernard, F., Soussana, J.-F., Graux, A.-I., Lardy, R., Sierra, J., Martin, M., Allard, D., Pieri, P., Bosc, A., Badeau, V., Bréda, N., Lebon, E., Olioso, A., Gate, P., Gouache, D., Levrault, F., Guilioni, L., Roger-Estrade, J., Terray, L., Pagé, C., Dequé, M., 2010. Climate change, agriculture and forests in France: simulations of the impacts on main species. The Green Book of the CLIMATOR project (2007-2010), ADEME. ed. ADEME, Angers.

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudouin, N., 2008. Conceptual basis , formalizations and parameterization of the STICS crop model. QUAE Editions.

Busch, G., 2006. Future European agricultural landscapes—What can we learn from existing quantitative land use scenario studies? Agriculture, Ecosystems & Environment 114, 121-140.

van Bussel, L.G.J., Müller, C., van Keulen, H., Ewert, F., Leffelaar, P.A., 2011. The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth models' results. Agricultural and Forest Meteorology 151, 607-619.

De Cara, S., Houzé, M., Jayet, P.-A., 2005. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture in the EU: A Spatial Assessment of Sources and Abatement Costs. Environmental & Resource Economics 32, 551-583.

De Cara, S., Jayet, P.-A., 2011. Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement. Ecological Economics 70, 1680-1690.

Challinor, A.J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., Fraser, E., 2009. Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. Journal of experimental botany 60, 2775-89.

Combe, L., Picard, D., 1994. Elaboration du rendement des principales cultures annuelles, INRA Editi. ed. Paris.

Combe, M., 2011. Impact du changement climatique sur les grandes cultures européennes à l ' horizon fin 21 ème siècle : mécanismes et typologie des évolutions. Lyon.

Cowie, A., Schneider, U. a., Montanarella, L., 2007. Potential synergies between existing multilateral environmental agreements in the implementation of land use, land-use change and forestry activities. Environmental Science & Policy 10, 335-352.

DaMatta, F.M., Grandis, A., Arenque, B.C., Buckeridge, M.S., 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. Food Research International 43, 1814-1823.

Dalgaard, T., Hutchings, N.J., Porter, J.R., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. Agriculture, Ecosystems & Environment 100, 39-51.

EC, 2008. 20 20 by 2020 Europe's climate change opportunity COM(2008) 30 final, European Economy.

EC, 2009a. DECISION No 406/2009/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020. Official Journal of the European Union 136-148.

EC, 2009b. The role of European agriculture in climate change mitigation SEC(2009) 1093 final, Communities. Brussels.

EC, 2009c. Adapting to climate change: the challenge for European agriculture and rural areas SEC(2009) 417, Agriculture. Brussels.

EC, 2009d. White Paper - Adapting to climate change: Towards a European framework for action COM(2009) 147 final. Brussels.

Easterling, W.E., Aggarwal, P.K., Batima, P., Brander, K., Erda, L., Howden, S.M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J.-F., Schmidhuber, J., Tubiello, F.N., 2007. Food, fibre and forest products, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 273-313.

Ewert, F., van Ittersum, M.K., Heckelei, T., Therond, O., Bezlepkina, I., Andersen, E., 2011. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. Agriculture, Ecosystems & Environment 142, 6-17.

Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.J., Leemans, R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use: I. Estimating changes in crop productivity. Agriculture, Ecosystems & Environment 107, 101-116.

Fader, M., Rost, S., Müller, C., Bondeau, A., Gerten, D., 2010. Virtual water content of temperate cereals and maize: Present and potential future patterns. Journal of Hydrology 384, 218-231.

Falloon, P., Betts, R.A., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation--the importance of an integrated approach. The Science of the total environment 408, 5667-87.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F.N., van Velthuizen, H., 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 360, 2067-83.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R.A., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., van Dorland, R., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New york, NY, USA, pp. 1-106.

Freibauer, A., Rounsevell, M.D.., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. Geoderma 122, 1-23.

Friis, C., Reenberg, A., 2010. Land grab in Africa: Emerging land system drivers in a teleconnected world. GLP Report n°1, Development. Copenhagen.

Fuhrer, J., 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO2, ozone, and global climate change. Agriculture, Ecosystems & Environment 97, 1-20.

Füssel, H.-M., 2007. Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. Sustainability Science 2, 265-275.

Füssel, H.-M., Klein, R.J.T., 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. Climatic Change 75, 301-329.

Galko, E., 2007. Modélisation de l'offre agricole européenne face à de nouveaux enjeux : réformes politiques, effet de serre et changement climatique.

Galko, E., Jayet, P.-A., 2011. Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. Agricultural Economics 42, 605-618.

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. Agriculture.

Godard, C., Roger-Estrade, J., Jayet, P.-A., 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.

Gustard, A., Gross, R., 1989. Low flow regimes in Northern and Western Europe, in: Roald, L., Nordseth, K., Anker, K.H. (Eds.), FRIENDS in Hydrology. IAHS, pp. 205-212.

Happe, K., Kellermann, K., Balmann, A., 2006. Agent-based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS , its Adaptation and Behavior. Ecology And Society 11.

Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D.R., Thomson, A.M., Wolfe, D., 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. Agronomy Journal 103, 351-370.

Havlík, P., Schneider, U. a., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., Aoki, K., Cara, S.D., Kindermann, G., Kraxner, F., Leduc, S., McCallum, I., Mosnier, A., Sauer, T., Obersteiner, M., 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. Energy Policy 39, 5690-5702.

Hazell, P., Wood, S., 2008. Drivers of change in global agriculture. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 363, 495-515.

Henseler, M., Wirsig, A., Herrmann, S., Krimly, T., Dabbert, S., 2009. Modeling the impact of global change on regional agricultural land use through an activity-based non-linear programming approach. Agricultural Systems 100, 31-42.

Hermans, C.M.L., Geijzendorffer, I.R., Ewert, F., Metzger, M.J., Vereijken, P.H., Woltjer, G.B., Verhagen, A., 2010. Exploring the future of European crop production in a liberalised market, with specific consideration of climate change and the regional competitiveness. Ecological Modelling 221, 2177-2187.

Hertel, T.W. (Ed.), 1997. Global Trade Analysis: Modeling and Applications. Cambridge University Press.

Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M., Meinke, H., 2007. Adapting agriculture to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104.

Hurtt, G.C., Chini, L.P., Frolking, S., Betts, R.A., Feddema, J.J., Fischer, G., Fisk, J.P., Hibbard, K., Houghton, R. a., Janetos, A., Jones, C.D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Klein Goldewijk, K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., Vuuren, D.P., Wang, Y.P., 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600

years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. Climatic Change 117-161.

Idso, S.B., 1991. A general relationship between CO2-induced increases in net photosynthesis and concomitant reductions in stomatal conductance. Environmental and Experimental Botany 31, 381-383.

van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy 18, 201-234.

Jaggard, K.W., Qi, A., Ober, E.S., 2010. Possible changes to arable crop yields by 2050. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 365, 2835-51.

Janssen, S., van Ittersum, M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. Agricultural Systems 94, 622-636.

Jones, C.A., Kiniry, J.R. (Eds.), 1986. Ceres-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A & M University Press.

Kenny, G., 2011. Adaptation in agriculture: lessons for resilience from eastern regions of New Zealand. Climatic Change 106, 441-462.

Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G., Ullerstig, A., 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. Tellus A 63, 24-40.

Klein Goldewijk, K., Beusen, A., Van Drecht, G., De Vos, M., 2011. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. Global Ecology and Biogeography 20, 73-86.

Konyar, K., 2001. Assessing the role of US agriculture in reducing greenhouse gas emissions and generating additional environmental benefits. Ecological Economics 38, 85-103.

Kurukulasuriya, P., Mendelsohn, R., 2008. Crop switching as a strategy for adapting to climate change. African Journal of Agricultural and Resource Economics 2, 105-126.

Köppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate, in: Köppen, W., Geiger, G. (Eds.), Handbuch Der Klimatologie. Berlin, pp. 1-44.

Leakey, A.D.B., Ainsworth, E.A., Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P., Ort, D.R., 2009. Elevated CO2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. Journal of experimental botany 60, 2859-76.

Leclère, D., Jayet, P.-A., De Noblet-Ducoudré, N., n.d. Understanding the farm-scale response of European agriculture to climate change: Evaluation of a coupled economic-crop model. submitted.

Leip, A., Marchi, G., Koeble, R., Kempen, M., Britz, W., Li, C., 2008. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe. Biogeosciences 5, 73-94.

Levis, S., 2010. Modeling vegetation and land use in models of the Earth System. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 1, 840-856.

Lotze-Campen, H., Lucht, W., Müller, C., Bondeau, A., Smith, P.C., 2005. How tight are the limits to land and water use? Combined impacts of food demand and climate change. Advances in Geosciences 4, 28.

Lotze-Campen, H., Popp, A., Beringer, T., Müller, C., Bondeau, A., Rost, S., Lucht, W., 2010. Scenarios of global bioenergy production: The trade-offs between agricultural expansion, intensification and trade. Ecological Modelling 221, 2188-2196.

Matthews, K.B., Rivington, M., Buchan, K., Miller, D., Bellocchi, G., 2008. Characterising the agro-meteorological implications of climate change scenarios for land management stakeholders. Climate Research 37, 59-75.

McLachlan, G.J., Peel, D., 2000. Finite mixture models, Wiley. ed, Technometrics. Wiley-Interscience, New york.

van Meijl, H., van Rheenen, T., Tabeau, A., Eickhout, B., 2006. The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment 114, 21-38.

Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. Global Ecology and Biogeography 549-563.

Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., Leemans, R., Viner, D., 2008. Projected environmental shifts under climate change: European trends and regional impacts. Environmental Conservation 35, 64-75.

Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Metz, B., Marita, T., Pepper, W., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., Watson, R., Dadi, Z., 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios - Summary For Policymakers, Group. Cambridge, UK.

Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. European Journal of Agronomy 16, 239- 262.

Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. European Journal of Agronomy 34, 96-112.

Parker, D.C., Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M.J., Deadman, P., 2003. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. Annals Of the Association of American Geographers 93, 314-337.

Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Adger, W.N., Aggarwal, P.K., et al., 2007. Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC: United Kingdom and. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., Fischer, G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. Global Environmental Change 14, 53-67.

Piesse, J., Thirtle, C., 2010. Agricultural R&D, technology and productivity. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 365, 3035-47.

Pitman, A.J., De Noblet-Ducoudré, N., Cruz, F.T., Davin, E.L., Bonan, G.B., Brovkin, V., Claussen, M., Delire, C., Ganzeveld, L., Gayler, V., van den Hurk, B.J.J.M., Lawrence, P.J., van der Molen, M.K., Müller, C., Reick, C.H., Seneviratne, S.I., Strengers, B.J., Voldoire, A., 2009. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. Geophysical Research Letters 36, 1-6.

Pongratz, J., Reick, C.H., Claussen, M., 2010. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. Geophysical Research Letters 37.

Porter, J.R., Semenov, M. a, 2005. Crop responses to climatic variation. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 360, 2021-35.

Puma, M.J., Cook, B.I., 2010. Effects of irrigation on global climate during the 20th century. Journal of Geophysical Research 115, 1-15.

Raddatz, R.L., 2007. Evidence for the influence of agriculture on weather and climate through the transformation and management of vegetation: Illustrated by examples from the Canadian Prairies. Agricultural and Forest Meteorology 142, 186-202.

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., 2007. Analysis of farm performance in Europe under different climatic and management conditions to improve understanding of adaptive capacity. Climatic Change 84, 403-422.

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R., 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. European Journal of Agronomy 32, 91-102.

Reidsma, P., Oude Lansink, A., Ewert, F., 2008. Economic impacts of climatic variability and subsidies on European agriculture and observed adaptation strategies. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 14, 35-59.

Rivington, M., Matthews, K.B., Bellocchi, G., Buchan, K., Stöckle, C.O., Donatelli, M., 2007. An integrated assessment approach to conduct analyses of climate change impacts on whole-farm systems. Environmental Modelling & Software 22, 202-210.

Rogelj, J., Hare, W., Lowe, J., van Vuuren, D.P., Riahi, K., Matthews, B., Hanaoka, T., Jiang, K., Meinshausen, M., 2011. Emission pathways consistent with a 2°C global temperature limit. Nature Climate Change 1, 413-418.

Rosenzweig, C., Parry, M.L., 1994. Potential impact of climate change on world food supply. Nature 367, 133–138.

Rosenzweig, C., Tubiello, F.N., 2007. Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 855-873.

Rounsevell, M.D.A., Annetts, J.E., Audsley, E., Mayr, T., Reginster, I., 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. Agriculture, Ecosystems & Environment 95, 465-479.

Rounsevell, M.D.A., Arneth, A., 2011. Representing human behaviour and decisional processes in land system models as an integral component of the earth system. Global Environmental Change 21, 840-843.

Rounsevell, M.D.A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R., Carter, T.R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use: II. Projecting changes in cropland and grassland. Agriculture, Ecosystems & Environment 107, 117-135.

Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Araújo, M.B., Carter, T.R., Dendoncker, N., Ewert, F., House, J., Kankaanpaa, S., Leemans, R., Metzger, M.J., 2006. A coherent set of future land use change scenarios for Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment 114, 57-68.

Sacks, W.J., Cook, B.I., Buenning, N., Levis, S., Helkowski, J.H., 2008. Effects of global irrigation on the near-surface climate. Climate Dynamics 33, 159-175.

Sacks, W.J., Deryng, D., Foley, J.A., Ramankutty, N., 2010. Crop planting dates: an analysis of global patterns. Global Ecology and Biogeography 607-620.

Samuelsson, P., Jones, C.G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, C., Kjellström, E., Nikulin, G., Wyser, K., 2011. The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. Tellus A 63, 4-23.

Schneider, U. a., McCarl, B. a., Schmid, E., 2007. Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry. Agricultural Systems 94, 128-140.

Schulze, E.-D., Luyssaert, S., Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I.A., Soussana, J.-F., Smith, P., Grace, J., Levin, I., Thiruchittampalam, B., Heimann, M., Dolman, A.J., Valentini, R., Bousquet, P., Peylin, P., Peters, W., Rödenbeck, C., Etiope, G., Vuichard, N., Wattenbach, M., Nabuurs, G.-J., Poussi, Z., Nieschulze, J., Gash, J.H., 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. Nature Geoscience 2, 842-850.

Seo, S.N., Mendelsohn, R., 2008. An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms. Ecological Economics 67, 109-116.

Smit, B., Skinner, M., 2002. Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. Mitiand adaptation strategies for global change 7, 85-114.

Smit, B., Wandel, J., 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change 16, 282-292.

Smith, P., Gregory, P.J., van Vuuren, D., Obersteiner, M., Havlík, P., Rounsevell, M.D.A., Woods, J., Stehfest, E., Bellarby, J., 2010. Competition for land. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 365, 2941-57.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, S.M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 363, 789-813.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., 2007. Agriculture, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change. New york, NY, USA, pp. 1-44.

Soussana, J.-F., Graux, A.-I., Tubiello, F.N., 2010. Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. Journal of experimental botany 61, 1-12.

Stockle, C.O., Williams, J.R., Rosenberg, N.J., Allan Jones, C., 1992. A method for estimating direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield crops:

Part I—Modification of the EPIC model for climate change analysis. Agricultural Systems 38, 225-238.

Szczypta, C., Calvet, J.-C., Albergel, C., Balsamo, G., Boussetta, S., Carrer, D., Lafont, S., Meurey, C., 2011. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. Hydrology and Earth System Sciences 15, 647-666.

Tol, R.S.J., 2009. The economic effects of climate change. Journal Of Economic Perspectives 23, 29 -51.

Verburg, P.H., 2006. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. Landscape Ecology 21, 1171-1183.

Vermont, B., De Cara, S., 2010. How costly is mitigation of non-CO2 greenhouse gas emissions from agriculture?A meta-analysis. Ecological Economics 69, 1373-1386.

van Vuuren, D.P., Lucas, P.L., Hilderink, H., 2007. Downscaling drivers of global environmental change: Enabling use of global SRES scenarios at the national and grid levels. Global Environmental Change 17, 114-130.

Waha, K., van Bussel, L.G.J., Müller, C., Bondeau, A., 2012. Climate-driven simulation of global crop sowing dates. Global Ecology and Biogeography 21, 247-259.

Weitzman, M.L., 1974. Prices vs quantities. The Review of Economic Studies 41, 477-491.

van der Werf, E., Peterson, S., 2009. Modeling linkages between climate policy and land use: an overview. Agricultural Economics 40, 507-517.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 503-515.

Willekens, A., Van Orshoven, J., Feyen, J., 1998. Estimation of the phenological calendar, Kc-curve and temperature sums for cereals, sugar beet, potato, sunflower and rapeseed across Pan Europe, Turkey, and the Maghreb countries by means of transfer procedures. Joint Research Center of the European Communities-Space Applications Institute-MARS Project, Leuven I.

Annexes

Illustration des scénarios de changement climatique considérés

Les figures X.1 et X.2 présentent l'évolution pour les scénarios A2 et B1 (respectivement des températures moyennes saisonnières, et du cumul saisonnier de précipitation), par rapport au scénario CTL (différences entre les moyennes sur les 30 années de chaque scénario). A titre d'information, les valeurs saisonnières de ces mêmes variables pour le scénario CTL sont présentées dans les figures X.3 et X.4, respectivement.

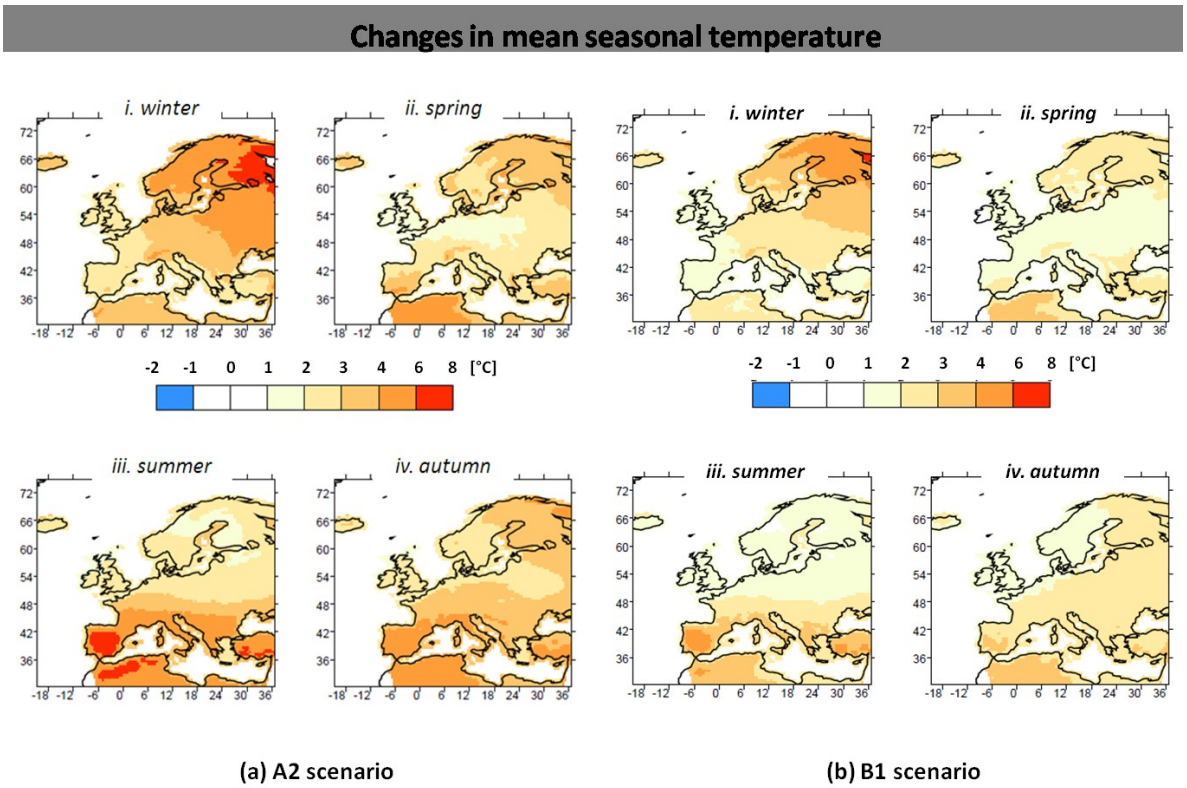


Figure X.1 - Cartes de l'évolution des températures moyennes saisonnières pour les scénarios A2 (a) et B1 (b), en moyenne sur la période 2071-2100, par rapport à la moyenne en CTL (1976-2005). Valeur absolue en °C.

Ces cartes permettent de préciser quelques points importants, quant à la différentiation de nos scénarios de changement climatique :

- En termes de température moyenne saisonnière, la tendance est à réchauffement dans toute l'Europe et à toutes les saisons. Celui-ci est d'au moins +1°C pour B1, et +2°C pour A2. En termes de précipitation, il y a une démarcation entre la moitié Nord et la moitié Sud de l'Europe. Tandis que la première semble gagner en précipitation quelque soit la saison, la deuxième semble au contraire perdre en précipitation, bien qu'en B1, ce ne soit le cas qu'en été.

- La distribution spatiale des changements de température est très contrastée entre saisons : la hausse semble être beaucoup plus intense au Nord (respectivement au Sud) de l'Europe en hiver (respectivement en été), jusqu'à plus de +4°C pour B1, et plus de +6°C pour A2. En automne et au printemps, il semble que la bande de latitude centrale de l'Europe soit moins affectée que le Sud et le Nord de l'Europe par la hausse des températures, et que celles-ci soient plus modérées.
- Le contraste saisonnier des évolutions du cumul de précipitation est marqué pour le scénario A2, avec une ligne de démarcation entre gain (au Nord) et perte (au Sud) de précipitations qui monte en latitude de l'hiver à l'été, puis redescend pour le scénario A2. Pour le scénario B1, seule le Sud de l'Italie et la Grèce subissent une baisse des précipitations dans d'autres saisons qu'en été.

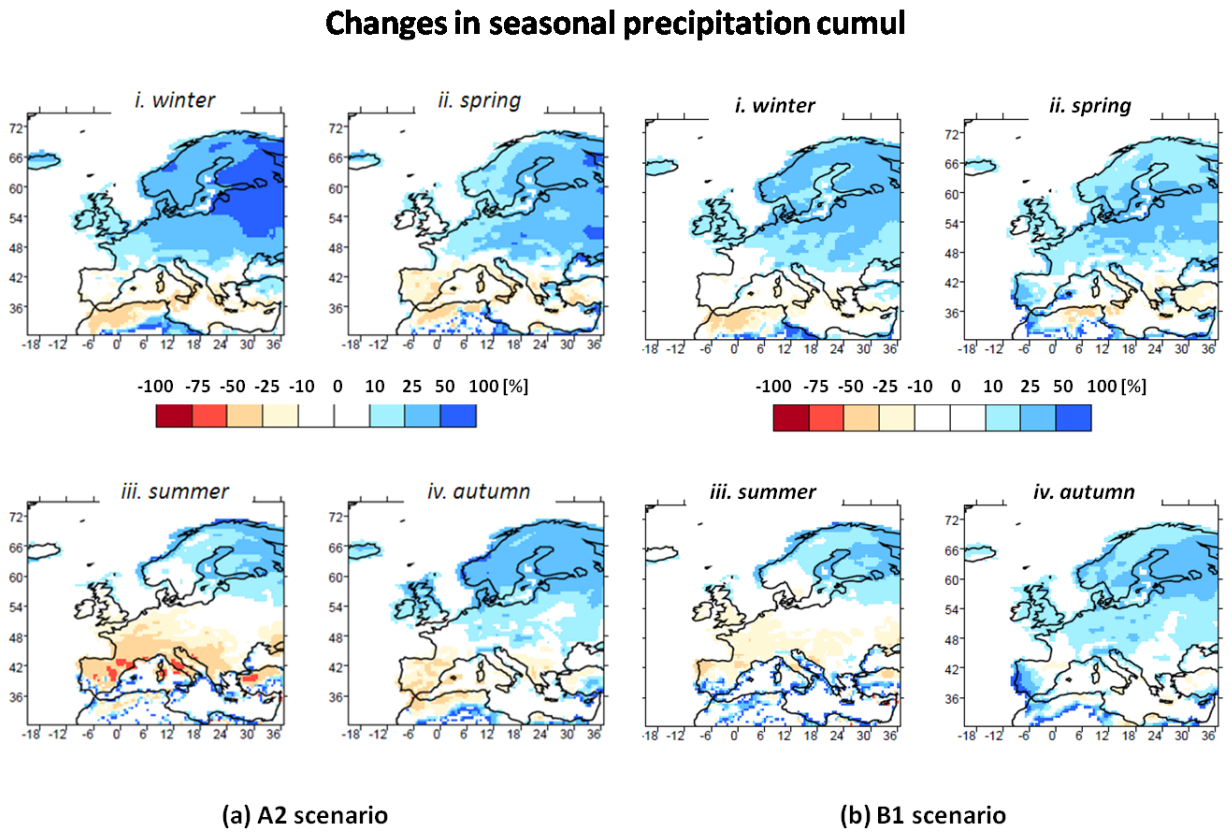


Figure X.2 - Cartes de l'évolution du cumul saisonnier des précipitations pour les scénarios A2 (a) et B1 (b), en moyenne sur la période 2071-2100, par rapport à la moyenne en CTL (1976-2005). Valeur relative en %.

De manière générale, il semble donc il y avoir quelques démarcations claires :

- entre scénarios de changement climatique (les évolutions annuelles et leur saisonnalité sont plus fortes en A2 qu'en B1).

- entre le Sud et le Nord de l'Europe (la température augmente surtout en été dans le Sud, et en hiver dans le Nord, alors que les précipitations ont tendance à baisser dans le Sud et à augmenter dans le Nord).
- entre les températures et les précipitations (les températures augmentent quasiment partout, en toute saison, et pour chaque scénario, tandis que les précipitations évoluent de manière plus différenciées entre régions, saisons et scénarios).

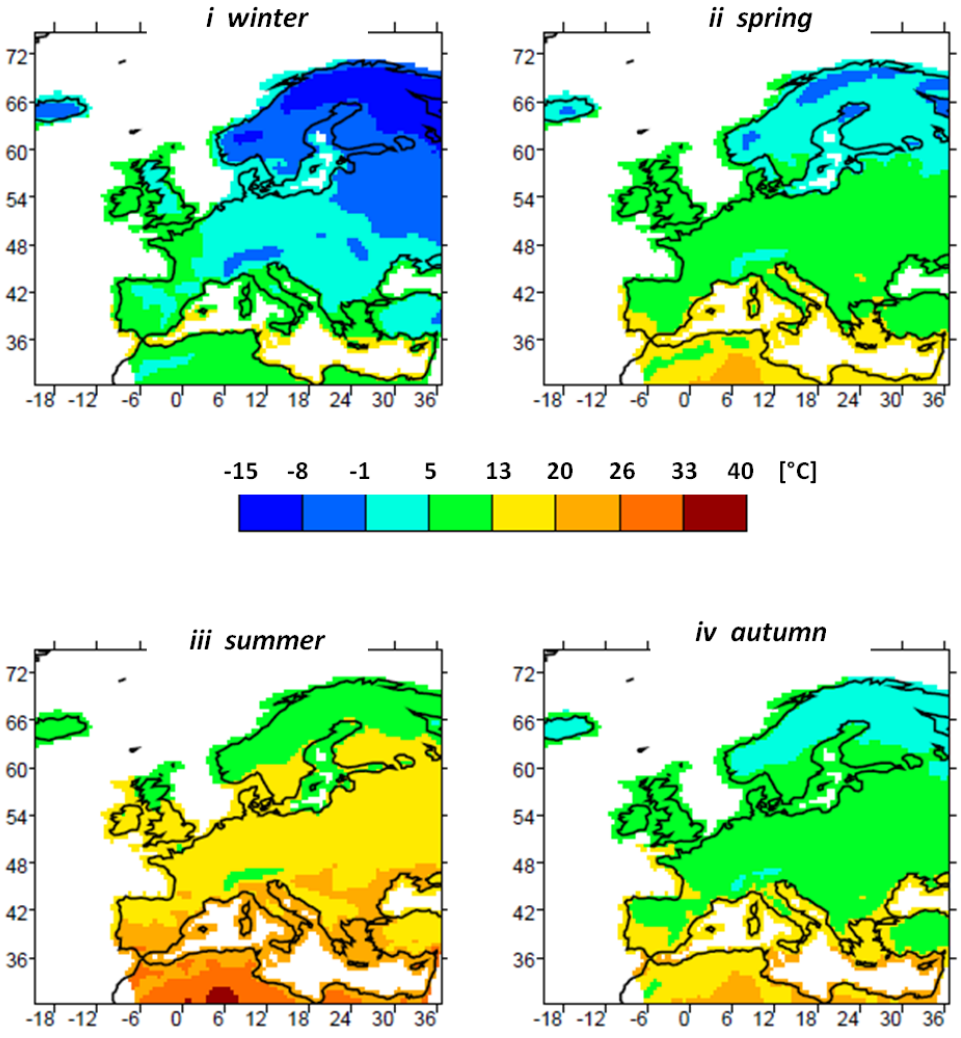


Figure X.3 - Cartes des températures moyennes saisonnières pour le scénario CTL (1976-2005).

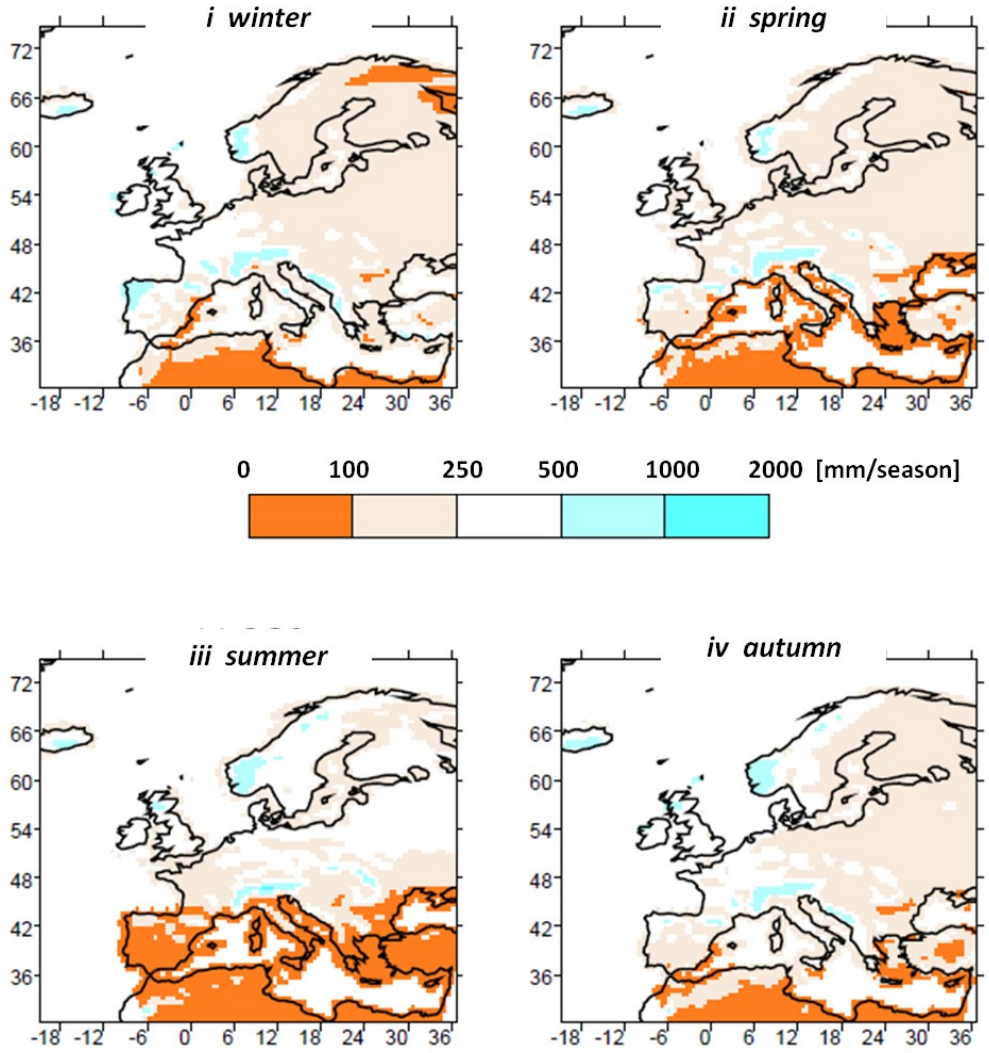


Figure X.4 - Cartes des précipitations saisonnières cumulées pour le scénario CTL (1976-2005).

Description des variétés utilisées

Comme détaillé dans la section 2.2.3 (chapitre 2), la gestion de la durée et du positionnement du cycle est traitée en même temps. Il existe peu d'observation pour renseigner cette composante de l'itinéraire technique, et dans la procédure permettant d'attribuer des entrées techniques pour chaque couple « culture-agent », je teste 3 pour options pour cette composante. En fonction de la culture, ces 3 options correspondent soient à 3 possibilités de date de semis pour les cultures dont on ne dispose que d'une variété, soit de 3 variétés et une date de semis, pour les cultures dont on dispose de 3 variétés. Les variétés sont dans tous les cas caractérisées par des durées de cycle différentes (ou « groupes de précocité »), qui sont définies par des cumuls de température pour différents stades des phases végétatives et reproductrices des espèces considérées. Elles diffèrent aussi,

Pour plus de réalisme, j'ai découpé l'espace géographique de l'EU-15 en deux zones (Nord et Sud, voir figure X.5), pour lesquelles les variétés utilisées diffèrent pour certaines cultures (blé tendre et blé dur, et soja). Le tableau X.2 présente par espèce et par zone géographique les variétés à disposition ainsi que leurs caractéristiques de précocité.

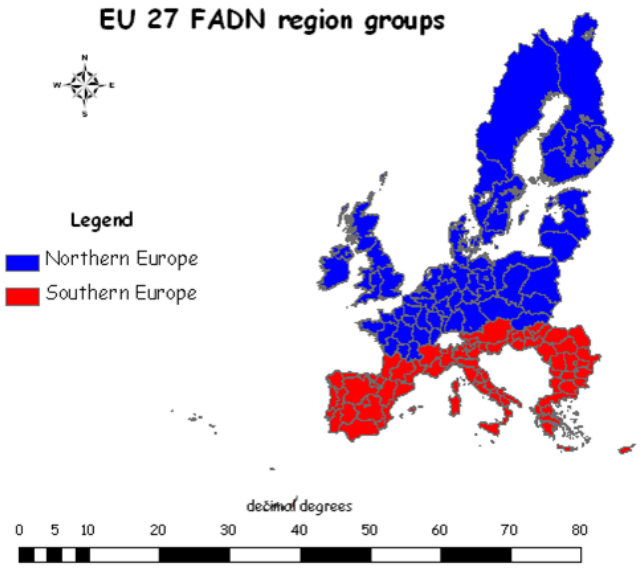


Figure X.5 - Délinéation des zones Nord et Sud de l'EU-15 pour la distribution des variétés cultivées.

N°	Name	Precocity [-]	JVC [Jour]	SVEG [°Jour]	SREPRO [°Jour]	PMG maxi [mg]
			Sugarbeet			(80%Hum)
1	-	-	-	15500	5450	1260000
			Soft wheat			(16%Hum)
6	Sidéral	p	38	1392	1392	38
5	Promentin	½ p	50	1462	1462	50
4	Soissons	½ p	38	1422	1422	38
2	Talent	p	50	1392	1392	50
1	Arminda	t	55	1537	1537	46
			Durum wheat			(16%Hum)
10	Arcalis	½ p	29	1492	1492	55
4	Acalou	p	0	1457	1457	52
7	Néodur	t	0	1522	1522	56
5	Ardente	p	0	1457	1457	52
6	Lloyd	½ p	0	1492	1492	52
1	Ambral	t	10	1522	1522	42
			Rapeseed			(9%Hum)
1	Goëland	-	60	1750	2520	4.15
			Potato			(80%Hum)
1	Bintje	-	-	1850	3750	450000
			Winter barley			(0%Hum)
1	Plaisance	-	50	1225	1177	44
			Spring barley			(0%Hum)
1	Scarlett	-	0	927	1297	44
			Sunflower			(9%Hum)
1	-	p	-	1570	1570	80
2	-	½ p	-	1640	1640	80
3	-	t	-	1700	1700	80
			Soybean			(0%Hum)
1	-	p	-	970	1010	225
2	-	t	-	1040	1320	225
			Maize			(32%Hum)
10	A0 Ext précoce	p	-	1470	1470	300
4	C2 ½ précoce	½ p	-	1785	1785	330
7	E1 tardif	t	-	1920	1920	348

	All EU-15
	Southern zone
	Northern Zone

Tableau X.2 - Propriétés des variétés utilisées par espèce, et par zone géographique. Pour chaque espèce, on donne le nom et les propriétés de la variété unique, ou des 3 variétés considérées (par zone géographique). Les propriétés décrivent le groupe de précocité (*precocity*, tardif *t*, demi-précoce *½ p*, ou précoce *p*), le nombre de jours vernalisants (*JVC*, pour les cultures d'hiver), le cumul de degré-jours des phases végétatives (*SVEG*) et reproductrices (*SREPRO*), et enfin la limite maximale du poids d'un grain en milligrammes (*PMG maxi*).