



HAL
open science

Effets du changement climatique sur le système prairie-élevage: analyse économique à l'échelle européenne

Parisa Aghajanzadeh-Darzi

► **To cite this version:**

Parisa Aghajanzadeh-Darzi. Effets du changement climatique sur le système prairie-élevage: analyse économique à l'échelle européenne. Environnement et Société. 2014. Français. NNT : . tel-02800441

HAL Id: tel-02800441

<https://hal.inrae.fr/tel-02800441>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

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

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Ecole

Doctorale
ABIES

Agriculture
Agriculture
Alimentation
Food
Biologie
Biology
Environnement
Environment
Santé
Health

Doctorat ParisTech

THÈSE

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

Parisa AGHAJANZADEH-DARZI

le 28 Février 2014

**Effets du changement climatique sur le système prairie-élevage: Analyse
économique à l'échelle Européenne**

Directeur de thèse : **Pierre-Alain JAYET**

Jury

M. Lionel RAGOT, Professeur, Unité de recherche, Université Paris X
M. Alain CARPENTIER, Directeur de Recherche, INRA
M. Michele DONATI, Enseignant-Chercheur, Université de Parme, Italie
M. Nicolas VIOVY, Ingénieur, CEA, LSCE Saclay
M. Pierre-Alain JAYET, Directeur de recherche, INRA-UMR Economie Publique

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Directeur de thèse

AgroParisTech
L'UMR Economie publique (UMR 210)

Avenue Lucien Brétignières 78850 Thiverval Grignon FRANCE

À ma sœur et mes frères,

et plus particulièrement à ma mère,

&

à la mémoire de mon père.

Merci de votre soutien inconditionnel !

Remerciements

Je tiens à adresser en premier lieu mes remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur le Docteur Pierre-Alain Jayet, de m'avoir fait confiance et laissé une large autonomie. J'ai pu apprécier non seulement sa dimension scientifique, mais aussi sa dimension humaine. J'en profite pour lui exprimer ici ma plus profonde gratitude.

Je tiens à remercier les membres du jury qui me font l'honneur d'avoir consacré leur temps précieux à examiner mon travail.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Monsieur le Docteur Stephan Marette et Monsieur le Docteur Jean Christophe Bureau, directeurs de l'Unité UMR 210 INRA Economie Publique, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire.

Mes sincères remerciements s'adressent à toute l'équipe de l'INRA - UMR Economie Publique, Grignon, votre chaleur et votre générosité m'ont aidé bien plus que vous ne l'imaginez. J'adresse mes vifs remerciements à Sylvie La Mantia, Celine Lecoq, Delphine Leconte-Demarsy, Elvire Petel, Athanasios Petsakos, Pierre Humblot, Anne Fournier, Anna Lungarska et Elisabeth Maltese qui ont largement enrichi ces années de thèse.

Ces années de doctorat ont été l'occasion de nombreuses collaborations et rencontres avec des chercheurs de tous horizons qui ont enrichi mon travail. Je souhaite remercier Raphaël Martin et Sylvain Laperche (INRA UREP - Unité de Recherche sur l'Ecosystème Prairial, Clermont-Ferrand).

Mes remerciements s'adressent également à Mesdames et Messieurs les Membres du Comité, qui ont assuré un suivi régulier et constructif du travail : Audrey Trevisiol (Ingénieur ADEME responsable du suivi de la thèse), Stéphane De Cara (Directeur de recherche, INRA-Grignon), Françoise Ruget (Chercheur, INRA-Avignon), Nicolas Viovy (Chercheur, LSCE) et Gianni Belocchi (Chercheur, INRA-Clermont-ferrand).

Enfin, je tiens à adresser en particulier mes plus chaleureux remerciements à ma famille qui m'auront permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui. Je suis très reconnaissante à eux pour leur soutien constant, leur amour et leur encouragements au cours de ces années, sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui. Il m'est impossible de trouver des mots pour dire à quel point je les aime. Je souhaite remercier ma mère et ma sœur, pour l'intérêt qu'elles ont toujours porté à ce que je réalise. Merci d'avoir toujours été là et de m'avoir tant aidé. Votre présence et vos encouragements sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je suis et de ce que je fais. Merci!

Avant propos

Cette thèse est cofinancée par l'Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Elle s'inscrit principalement dans le cadre du programme [ANR VALIDATE](#) 2008-2011 (Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux événements extrêmes) et celui du programme [FP7 AnimalChange](#) 2011-2015 (AN Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate change).

This thesis is co-financed by the French agency ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) and the French public research institute INRA (Institut national de la recherche agronomique). The research leading to this thesis has been conducted as part of two project : the [FP7 AnimalChange](#) project which received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n° 266018, and the [ANR VALIDATE](#) project of the French National Research Agency (ANR/2008-2012), under the subsidy agreement n° ANR-07-VULN-11-011.

Résumé

Le système “prairies-élevage” joue un rôle majeur dans le secteur agricole et son environnement. D’une part, il assure la préservation de l’environnement grâce au rôle multifonctionnel des prairies à travers le stockage naturel du carbone, la protection contre l’érosion et la dégradation des sols. Il assure d’autre part la sécurité alimentaire par la production de viande et de lait. Ce système est étroitement lié à de nombreux déterminants, notamment le réchauffement climatique. Il est à la fois l’une des principales sources d’émission de gaz à effet de serre (protoxyde d’azote et méthane issues de l’élevage) et est affecté par l’évolution du climat.

Dans ce cadre, cette thèse vise à estimer la valeur économique des prairies et à évaluer le système agricole européen, en centrant l’évaluation sur les prairies et l’élevage, dans le contexte du changement climatique. Pour ce faire, l’étude est basée sur un modèle économique (AROPAj) couplé à trois différents modèles: un modèle de culture (STICS), un modèle économique global en équilibre partiel (GLOBIOM) et un modèle d’un écosystème prairial (PaSim). La méthodologie utilisée constitue donc un instrument utile qui vise à produire une évaluation intégrée des impacts économiques du changement climatique et de ses rétroactions sur les systèmes de production agricole.

Mots clés : Système prairie-élevage; Changement climatique; Modélisation agro-économique; Alimentation animale; Union Européenne; Prix fictifs

Abstract

“Grassland-breeding” systems play a major role in both the agricultural and environmental communities. It ensures the preservation of the environment through the multifunctional role of grasslands in carbon sequestration, soil protection against erosion and degradation. It provides food security through the production of meat and milk. This system is closely related to many determinants, including global warming. It is an important source of greenhouse gas emissions (nitrous oxide and methane from livestock production) and is concurrently affected by changing climatic conditions.

The aim of this thesis is to estimate the economic value of grass and assess the European agricultural system, including grassland-breeding, and its interactions with climate change. To do this, we use a modelling framework coupling the AROPAj agricultural supply model to three different models: a crop growth model (STICS), a global partial equilibrium model (GLOBIOM) and a dynamic grassland ecosystem model (PaSim). The methodology used provides a useful tool to assess the economic impacts of climate change and its feedback on the agricultural production systems.

Keywords : Grassland-breeding system; Climate change; agro-economique modeling; Animal feed; European Union; Shadow prices

Liste des abréviations / Lists of abbreviations

ARn :	Assessment Report (du GIEC), “n” étant l’indexation des différentes éditions
AROPAj :	Modèle micro-économique
A2H2 et B1H2 :	Scénario climatiques de SRES à l’horizon de 2070-2100
CAP :	Common Agricultural Policy
CTL :	Scénario de contrôle (1976-2005)
CO₂ :	Dioxyde de carbone
CH₄ :	Méthane
EPIC :	Modèle de culture
FADN :	Farm Accountancy Data Network
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
FG :	farm-group
GIEC :	Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat
GES :	Gaz à effet de serre
GLOBIOM :	Modèle économique d’équilibre partiel
N₂O :	Protoxyde d’azote
PRG :	Potentiel de réchauffement global
PIB :	Produit intérieur brut

- PAC :** Politique agricole commune
- PaSim :** Modèle de simulation d'un écosystème prairial
- RICA :** Réseau d'Information Comptable Agricole
- SAU :** Surface agricole utile
- SSPn :** Shared Socioeconomic reference Pathways, les scénarios socioéconomiques du GIEC, "n" étant l'indexation des différents scénarios
- SRES :** Special Report of IPCC on Emissions Scenarios, le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission
- STICS :** Modèle de culture
- UE :** Union européenne

Contents

1	Introduction générale	13
1.1	Contexte scientifique de l'étude	14
1.2	Évolution du changement climatique, scénarios et impacts	15
1.3	Impacts du changement de climat sur la structure de l'agriculture	19
1.3.1	Impacts sur le système prairial et la productivité des cultures	21
1.3.2	Impacts sur le système d'élevage et la productivité des animaux	23
1.3.3	Système d'élevage : acteur potentiel du changement climatique	25
1.4	Évolution socioéconomique et ses impacts	26
1.5	Organisation de la thèse	27
2	La question, les hypothèses et les démarches de la thèse	33
2.1	Problématique et objectifs de recherche	34
2.2	Protocole méthodologique	35
2.2.1	Modèles en jeu	36
2.2.1.1	Modèle économique d'offre agricole (AROPA _j)	36

2.2.1.2	Modèle générique de culture (STICS)	42
2.2.1.3	Modèle d'un écosystème prairial (PaSim)	43
2.2.1.4	Modèle économique en équilibre partiel (GLOBIOM) .	45
2.2.2	Couplages des modèles : base solide pour étudier le système agricole	48
2.2.2.1	AROPAj-STICS : mise en œuvre d'une dimension agronomique dans le modèle économique	48
2.2.2.2	AROPAj-PaSim : introduction des rendements des prairies et fourrages	52
2.2.2.3	AROPAj-GLOBIOM : sensibilité à l'évolution socioéconomique	55
3	Impact économique du changement climatique sur l'alimentation animale et l'élevage dans l'Union Européenne	67
3.1	Introduction	68
3.2	Méthodologie et présentation des modèles	70
3.2.1	Modèle économique de l'offre agricole (AROPAj)	71
3.2.2	Variation du rendement des prairies et fourrages	71
3.2.3	Protocole de simulation	72
3.3	Résultats à l'échelle européenne et discussion	73
3.3.1	Marge brute agricole	73
3.3.2	Réallocation des terres, productions agricoles et élevage	73
3.3.3	Émissions de GES	76

<i>CONTENTS</i>	3
3.4 Conclusion et Perspectives	78
4 Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on-farm source inputs and outputs	85
4.1 Introduction	86
4.2 Methodological framework	88
4.2.1 The agricultural supply model AROPAj	88
4.2.2 Analytical model formulation	89
4.2.3 Optimality conditions for non-marketed activities	91
4.2.3.1 The crop side	91
4.2.3.2 The livestock side	93
4.2.4 Numerical method for estimating shadow prices	94
4.3 Results	95
4.4 Conclusion and perspectives	100
5 Potential effects of climate change on the European grassland production: Impact assessment of far future	109
5.1 Introduction	110
5.2 Material and methods	111
5.2.1 Underlying models description	111
5.2.1.1 The AROPAj economic model	111
5.2.1.2 The PaSim grassland biogeochemical model	112

5.2.2	Introduction of grass yield function in the AROPAj model	113
5.3	Results and discussion	115
5.3.0.1	Grass monetary value and yield sensitivity to climate evolution	115
5.3.1	Land cover change across European regions	117
5.3.2	Agricultural productions and farm financial terms	118
5.3.3	Greenhouse gas fluxes related to grassland changes	120
5.4	Concluding Remarks	121
6	Global change challenges for the EU agricultural sector : A multi-scale model analysis	129
6.1	Introduction	130
6.2	Modeling framework	132
6.2.1	GLOBIOM-EU	132
6.2.2	AROPAj	133
6.2.3	Scenario development	134
6.2.4	AROPAj-GLOBIOM-EU coupling	135
6.3	Results and discussion	137
6.3.1	European farm financial terms	137
6.3.2	Land allocation and land use change	137
6.3.3	Agricultural production	140

<i>CONTENTS</i>	5
6.3.4 GHG emission trends and projections	142
6.4 Concluding remarks	143
7 Conclusion	151
7.1 Chapitre 7: Conclusion et Perspective	152
Annexe	159
7.2 VALIDATE project	159
7.3 ANIMALCHANGE Projects	160
7.4 Curriculum vitae	162
7.5 Valorisation des travaux de recherche	163
7.5.1 Communications écrites	163
7.5.2 Communications orales	163

List of Figures

1.1	A gauche : les émissions mondiales de GES (y compris le CO_2 , le CH_4 , le N_2O et les gaz fluorés) en billion tonnes (Gt) CO_2 -eq pour l'ensemble des six scénarios typiques du SRES de l'IPCC ; A droite : le réchauffement moyen mondial de la surface en $^{\circ}C$ [Figure extraite de l'IPCC (2007)].	17
1.2	Principales caractéristiques des quatre familles de scénarios SRES du l'IPCC, principalement orientés sur deux axes : (i) objectif économique vs. environnemental et (ii) développement global vs. régional - les chiffres concernent 2100.	18
1.3	Schématisation des facteurs de l'évolution du climat, des effets sur le changement climatique et des réponses apportées par l'IPCC [Figure extraite de Bernstein et al. (2007)].	20
1.4	Principaux effets observés et prévus des changements climatiques en Europe [Figure extraite de Martin et al. (2010)].	22
2.1	Schéma du modèle AROPAj	37
2.2	Variables d'entrées du modèle STICS relatives au climat-sol-système de culture; schéma basé sur Brisson & Mary (2002).	42
2.3	Schéma de la structure du modèle PaSiM, basé sur Martin et al. (2011).	44
2.4	Structure de l'utilisation des terres et des produits du modèle GLOBIOM - extraite de Havlik et al. (2011).	46

2.5	Rendement des prairies (t matière brute/ha) du scénarios A2H2 (à droite) selon trois niveaux d'apports azotés (t N/ha) en Europe pour les scénarios du future lointain à l'horizon 2100.	54
2.6	Variations des températures (° C) et des précipitations (mm) dans les scénarios du future comparés au scénario de référence (CTL), [Figure extraite de Leclere (2012)].	58
2.7	Résultats de l'analyse de sensibilité des rendements du maïs fourrager à l'apport azoté dans trois régions françaises pour les deux scénarios climatiques A2H2 (à gauche) et B1H2 (à droite), sur la période 2070-2100. . .	59
3.1	Variation relative (%) des surfaces en (a) cultures fourragères, (b) cultures de vente et (c) prairies, par rapport au scénario de référence (CTL) dans les pays de l'UE-15.	75
3.2	Variations relatives (%) des émissions (a) de méthane et (b) de protoxyde d'azote par rapport au scénario de référence (CTL), calculées pour les pays de l'UE-15 dans les SRES "A2" et "B1" à horizon "H2", <i>sans</i> et <i>avec</i> adaptation des pratiques agricoles.	76
3.3	Variations relatives (%) des émissions totales européennes de GES d'origine agricole en selon les régions européennes, par rapport au scénario de référence (CTL), en fonction de différents niveaux de taxe sur les émissions (€/t-eq CO ₂) pour les quartes scénarios étudiés.	78
4.1	Frequency distribution of gross margin deviation Δ^t at iteration step t among the 1074 AROPAj FTs ($\Delta^t = GM_k^t - GM_k^{t-1}$, when k denotes the FT).	97
4.2	Distribution of gross margin differences between preliminary simulations ($t = 0$) and simulations at $t = 7$	98
4.3	Relative variation of the European on-farm used cereals production compared to the initial estimates ($t = 0$).	99

4.4	Comparison of market and shadow prices of soft wheat and barley in AROPAj farm types.	99
5.1	European average distributions of changes in grass yield (row material in tonnes per hectare) under different climatic scenarios.	116
5.2	European cropland and grassland cover relative changes in future scenarios compared to present (CTL)].	117
5.3	European relative change in methane greenhouse (%) in far future scenarios compared to present (CTL).	120
5.4	European relative change in nitrous oxide emission (%) in far future scenarios compared to present (CTL)	120
5.5	European relative change in total greenhouse emission (%) in future scenarios compared to present (CTL).	121
6.1	European country detailed gross margins variation (%) following two socio-economic scenarios until 2050, compared to 2000 (provided by AROPAj model).	138
6.2	Relative land use change (%) on the European level for a few main crops between 2000 and 2050	138
6.3	European countries detailed relative change in cropland and grassland cover in 2050 compared to 2000 (based on AROPAj results).	139
6.4	Relative changes (%) in land cover between 2000 and 2050 for the EU-24 and the rest of the world (ROW).	140
6.5	European crop yield (a) and animal production (b) variation (%) under two scenarios outlined when comparing 2050 to 2000	141
6.6	Difference in (a) European and (b) ROW annualized GHG emissions (%) comparing SSP1 to SSP3 over time	143

List of Tables

1.1	Les plus importants gaz à effet de serre et leurs potentiels de réchauffement global (PRG) [basé sur l'IPCC (2007)].	16
1.2	Les impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes de production animale [source : FAO (2009)].	25
2.1	Représentation schématique de deux versions du modèle AROPAj (les groupes-types du modèle, le nombre des exploitation agricoles ainsi que le surface agricole utile (SAU)).	41
2.2	Modalités des entrées du modèle STICS utilisées pour la caractérisation des fonctions de réponse "azote - rendement" STICS.	49
2.3	Modalités des entrées de PaSim.	52
2.4	Population, GDP (gross domestic product per capita), price and productivity increases in 2050 compared to 2000 in GLOBIOM-EU in different scenarios.	55
2.5	Modalités des entrées de GLOBIOM	56
3.1	Résultats de la régression linéaire: rendement des fourrages "expliquées" par les rendements des cultures de vente et par le temps. Erreur standard résiduelle: 16.12; nombre d'observations : 168; R ² ajusté: 0,8415; significativité: ***: 0,001; **: 0,01; *: 0,05.	72
3.2	Les scénarios étudiés.	73

LIST OF TABLES

3.3	Variation relative (%) de la marge brute agricole par rapport au scénario de référence (CTL).	74
3.4	Variation relative (%) dans les secteurs de l'élevage, à l'échelle européenne, pour les scénarios de changement climatique étudiés par rapport au scénario de référence (CTL).	76
4.1	Comparison of the ratio of shadow and market prices for crop and animal production.	94
4.2	Number of farm types for which LP solution changes when $t - 1$ step shadow prices replace market prices at step t ($1 \leq t \leq 7$).	96
5.1	Description of input variables of PaSim model.	114
5.2	Overview of applied scenarios.	115
5.3	Economic value of five varieties of grass under different climatic scenarios (value expressed in €/t) and relative shadow price difference between two future climate scenarios compared to present (CTL) scenario (expressed in %).	116
5.4	Per country detailed change on-farm used crop production expressed in percentages in future scenarios compared to present (CTL).	118
5.5	Per country detailed change in variation of gross margin per hectare (GM), bought feed expenditure (BF) and livestock number (LU) expressed in percentages in future scenarios compared to present (CTL).	119
6.1	The scenarios studied.	136
6.2	Global population, GDP, price and productivity multipliers between 2000 and 2050 as input or projected by GLOBIOM-EU for the SSP1 and the SSP3 scenarios.	142

Chapter 1

Introduction générale

1.1 Contexte scientifique de l'étude

Selon l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE), une grande partie de la population pauvre mondiale (75%) vit dans des zones rurales et environ 86% de la population est -directement ou indirectement- attachée à l'agriculture, comme une source alimentaire essentielle [OECD \(2009\)](#). A l'échelle européenne, l'agriculture et le développement rural sont quelques uns des principaux enjeux pour réduire la pauvreté, accroître la sécurité alimentaire et la protection des ressources naturelles et environnementales ([Comission, 2009](#)).

Dans cette étude nous mettrons l'accent sur deux parties importantes du secteur de production agricole que sont les prairies et l'élevage. Les prairies occupent une place importante parmi les productions végétales. Elles sont composées de légumineuses et de graminées et sont exploitées par fauche ou pâture. Elles couvraient environ 3.5 milliards d'hectare en 2000 et représentaient la majorité (70%) des surfaces agricoles mondiales ([FAO, 2010](#)). Au niveau européen, les prairies occupent près de 40% de la superficie totale des terres agricoles de l'Union européenne à 27 (EU-27) ([OECD, 2011](#)). Les prairies représentent une ressource importante pour la protection de l'environnement et de la biodiversité et jouent un rôle fondamental dans l'alimentation des herbivores et ruminants ([Silva et al., 2008](#)).

La deuxième partie étudiée dans ce travail de thèse porte sur le secteur de l'élevage. A l'échelle mondiale, il est le plus grand utilisateur de terres agricoles -directement par les pâturages et les cultures fourragères et indirectement par d'autres aliments du bétail ([FAO, 2012](#)). Selon les tendances actuelles des modes de production et de consommation de la viande et afin de pouvoir répondre aux demandes alimentaires de la population mondiale croissante, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (donner le sens de l'acronyme en anglais FAO) estime que la production alimentaire mondiale doit augmenter de 60% d'ici 2050. Il est estimé parallèlement que la population mondiale augmentera d'un tiers jusqu'à 2050 et les deux milliards d'humains supplémentaires habiteront dans les pays en développement ([Meybeck et al., 2012](#)). La hausse des revenus et l'urbanisation croissante dans ces pays ont également provoqué un accroissement important de la demande de produits d'origine animale qui peut représenter un signe extérieur de richesse.

Différents facteurs peuvent affecter le secteur agricole, y compris le système prairies-élevage, parmi lesquels le changement climatique fait actuellement l'objet d'une attention croissante. De nombreuses études ont été initiées afin de quantifier les impacts que

le changement climatique pourrait avoir sur ce système et vice versa. D'après FAO, l'agriculture doit répondre simultanément à trois défis interdépendants : (i) assurer la sécurité alimentaire par le biais de l'augmentation de la productivité et le revenu, (ii) s'adapter aux changements climatiques et (iii) contribuer à atténuer les changements climatiques (Meybeck et al., 2012). Dans ce contexte, différents scénarios climatiques sont régulièrement proposés par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (ou Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Ils seront présentés en détail dans les sections suivantes.

1.2 Évolution du changement climatique, scénarios et impacts

Le changement climatique peut être défini en tant que déséquilibre à long terme des facteurs météorologiques, tels que la température, le vent, les précipitations. On le considère comme l'un des phénomènes les plus importants susceptibles d'affecter l'humanité. Divers facteurs naturels et humains provoquent le réchauffement climatique, dont les premiers signes de bouleversement de l'équilibre naturel sont observés depuis la fin du 20^{ème} siècle (Pierrehumbert, 2004; Bard, 2004).

Les variations des concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (GES), les aérosols et les propriétés de la surface du sol, modifient l'équilibre énergétique du système climatique. Ces modifications sont exprimées, par l'IPCC, en termes de forçage radiatif qui définit l'effet d'influence d'un facteur sur le changement de l'équilibre des énergies entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge, émis au sein du système terre-atmosphère. Il justifie une indication d'importance de ce facteur en tant que moyen de changement climatique potentiel (Bernstein et al., 2007). Cet indicateur sert à exprimer et comparer les influences de réchauffement -forçage radiatif positif- et de refroidissement -forçage radiatif négatif- que les facteurs extérieurs peuvent apporter au bilan énergétique du système climatique.

Afin de comparer l'impact relatif du forçage radiatif global de l'émission de différents GES, un indice nommé "Potentiel de réchauffement global" (PRG) a été développé par l'IPCC. Il permet de définir, sur un horizon de temps donné, la quantité émise de gaz carbonique (CO_2) équivalente en termes de forçage radiatif à l'émission d'une certaine quantité d'un autre GES. Les deux gaz de méthane (CH_4) et protoxyde d'azote (N_2O) jouent un rôle important dans le bilan radiatif de l'atmosphère. Ils sont particulièrement

1.2. ÉVOLUTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE, SCÉNARIOS ET IMPACTS

importants parce que leur PRG est supérieur à celui du dioxyde de carbone (Steven K. & Huey-Lin, 2008; O'Hara et al., 2003; IPCC, 2001a). Sur un horizon de 100 ans, le PRG du CH_4 est de 21, et celui du N_2O est de 310, démontrant que l'émission d'un kg de méthane et de protoxyde d'azote est respectivement équivalente en termes de forçage radiatif à l'émission de 21 kg de CO_2 et 310 kg de CO_2 (IPCC, 2007) (Table 1.1).

Gaz	Durée de vie moyenne (an)	PRG à 100 ans
Dioxyde de carbone (CO_2)	100	1
Méthane (CH_4)	12	21
Protoxyde d'azote (N_2O)	120	310

Table 1.1: Les plus importants gaz à effet de serre et leurs potentiels de réchauffement global (PRG) [basé sur l'IPCC (2007)].

La concentration atmosphérique de gaz carbonique -le gaz à effet de serre anthropique le plus important- s'est fortement accrue depuis 1750, en raison des activités humaines. Les émissions annuelles de CO_2 ont augmenté d'environ 80% entre 1970 et 2004. La tendance à long terme de la diminution des émissions de CO_2 par unité d'énergie fournie s'inverse après 2000 (IPCC, 2007a). Le niveau actuel de la concentration atmosphérique de ce gaz est de 370 parties par million (ppm)(IPCC, 2007) ; elle est en augmentation par rapport à la concentration avant la révolution industrielle (environ 260 ppm), et devrait atteindre de 450 à 1000 ppm à la fin du siècle (Caldeira & Wickett, 2003).

Les concentrations atmosphériques de méthane et de protoxyde d'azote sont classées en deuxième et troisième rang parmi les gaz à effet de serre imputables aux activités humaines. Ils ont augmenté considérablement, respectivement de 7.0 parties par milliard (ppb) an^{-1} et 0.8 ppb an^{-1} (IPCC, 2001a). Ces changements conduisent à modifier la température moyenne à la surface de la terre qui a augmenté de $0.74^{\circ}C \pm 0.18^{\circ}C$ au cours des cent dernières années (1996-2006). Cette tendance dans toute l'Europe est bien établie ($+0.8^{\circ}C$ de 1900 à 2000). Il est estimé que l'augmentation future de la température mondiale sera comprise entre 1.1 et $6.4^{\circ}C$ dans les années 2090-2099, selon la localisation et le scénario. En conséquence, les températures mondiales continueront à augmenter (IPCC, 2007), au rythme d'environ $+2^{\circ}C$ au cours des deux prochaines décennies (Figure 1.1).

Un ensemble de scénarios climatiques est proposé par l'IPCC qui décrit l'évaluation des changements climatiques futurs et ses impacts qui font l'objet de la section suivante.

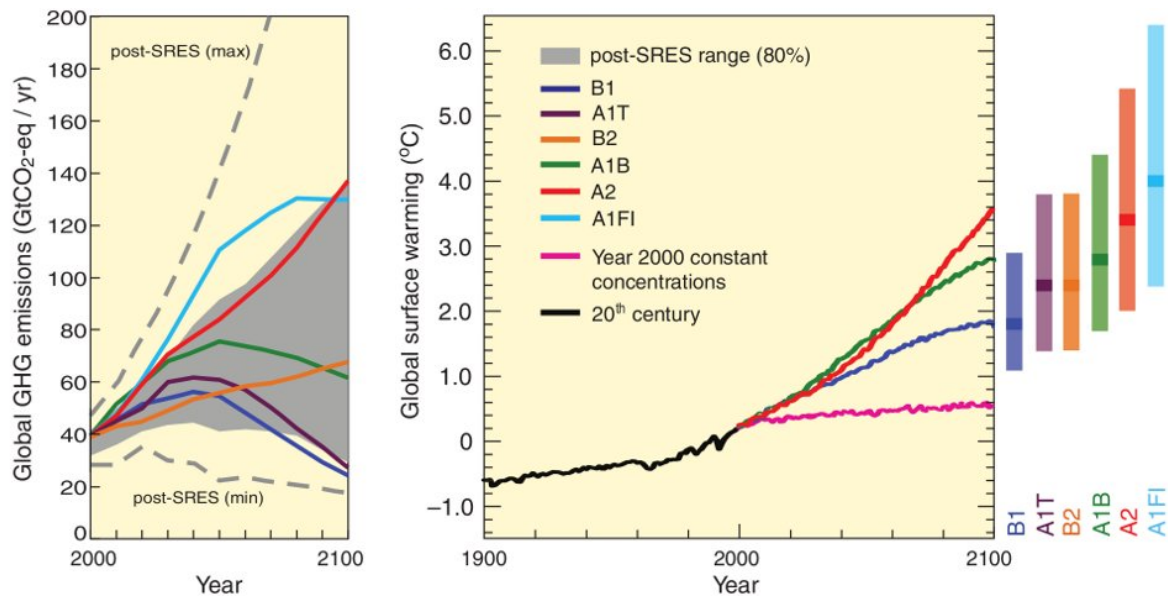


Figure 1.1: A gauche : les émissions mondiales de GES (y compris le CO_2 , le CH_4 , le N_2O et les gaz fluorés) en billion tonnes (Gt) CO_2 -eq pour l'ensemble des six scénarios typiques du SRES de l'IPCC ; A droite : le réchauffement moyen mondial de la surface en $^{\circ}C$ [Figure extraite de l'IPCC (2007)].

Changement climatique et scénarios pour le futur

Le changement climatique est progressivement devenu un enjeu majeur pour la vulnérabilité de l'agriculture et la production alimentaire. A mesure que la population humaine augmente, le concept de sécurité alimentaire devient plus important. D'après les recensements d'Eurostat, la population de l'UE-27 devrait atteindre un pic de 526 millions autour de 2040 (contre 501,1 millions en 2010) (Eurostat, 2011). Le changement climatique mondial est l'un des phénomènes aggravant la sécurité alimentaire par ces impacts directs et indirects sur l'agriculture qui est la principale source d'approvisionnement alimentaire pour la population mondiale (FAO, 2003). Il est par conséquent essentiel d'étudier le futur scénario de réchauffement climatique et d'envisager l'avenir de l'agriculture pour répondre à des besoins humains. A cette fin, l'IPCC a travaillé dans le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (ou Special Report on Emission Scenarios, SRES), sur les scénarios contenant les prévisions sur le changement climatique global et les conséquences liées à cette problématique. Quatre canevas qualitatifs présentant quatre ensemble de familles de scénarios climatiques ("A1", "A2", "B1", "B2") ont été proposés, ce qui aide à l'analyse des prédictions du réchauffement climatique induits par l'homme, leurs impacts potentiels et les options pour l'adaptation et l'atténuation jusqu'à la fin du siècle (Figure 1.2).

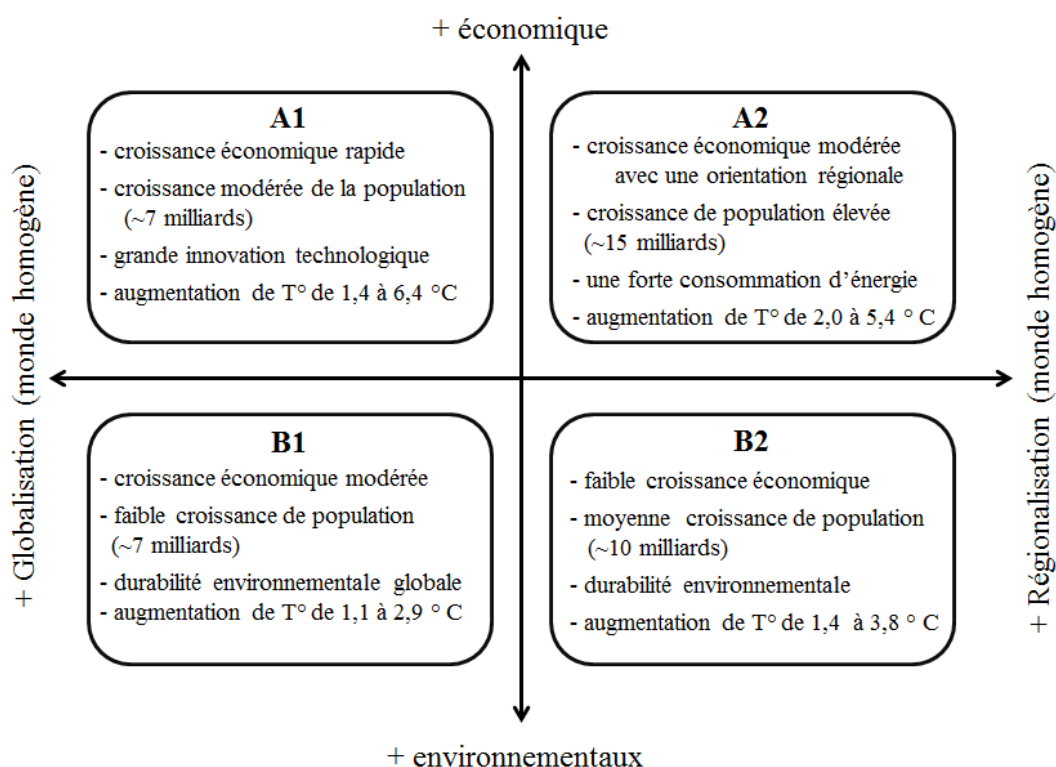


Figure 1.2: Principales caractéristiques des quatre familles de scénarios SRES de l'IPCC, principalement orientés sur deux axes : (i) objectif économique vs. environnemental et (ii) développement global vs. régional - les chiffres concernent 2100.

Ces quatre familles, détaillées ci-dessous, représentent une évolution différente aux niveaux social, économique, démographique, technologique et environnemental jusqu'à 2100 (IPCC, 2000) :

- I. *La famille "A1"* correspond au scénario "technologies énergétiques", elle représente les scénarios à croissance économique rapide avec la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle avant de décliner. L'introduction de technologies nouvelles dans ce scénario est rapide et plus efficace. Une grande convergence du produit intérieur brut (PIB) par habitant est envisagée avec une interaction culturelle et sociale croissante. La famille de scénarios *A1* est divisée en trois sous-groupes en fonction des priorités données au développement des technologies énergétiques possibles : (i) "*A1FI*" avec une forte intensité de combustibles fossiles ; (ii) "*A1T*" avec d'autres sources d'énergie que les fossiles ; et (iii) "*A1B*" avec l'équilibre entre les sources, soit la recherche d'un équilibre entre les diverses sources énergétiques et la promotion de l'efficacité énergétique.
- II. *La famille "A2"* de scénarios "hétérogènes" se base sur l'hypothèse d'un renforcement des identités et des traditions locales, avec une démographie plus élevée, ainsi

qu'une faible évolution technologique et économique.

- III. *La famille "B1"* de scénarios "convergeants" décrit un monde avec le même niveau d'évolution de population mondiale que *A1*, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une technologie propre qui utilise les ressources de manière efficiente. Dans ce scénario, l'accent est porté sur des solutions mondiales orientées vers la viabilité économique, sociale et environnementale.
- IV. *La famille "B2"* de type scénario "régional" représente un monde où l'accent est mis sur la durabilité et le développement durable, ainsi que sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale au niveau local. La croissance démographique de la population mondiale dans ce scénario est inférieure au scénario *A2*, avec les niveaux intermédiaires du développement économique, où les évolutions techniques sont plus diverses et moins rapides que dans les scénarios *B1* et *A1*. Ce scénario est orienté vers la protection environnementale et l'équité sociale aux niveaux local et régional.

Les travaux présentés dans le cadre de la thèse ([Chapitres 3 et 5](#)) ont été réalisés pour les scénarios contrastés *A2* et *B1*, portant sur une durée de 30 ans sur la période 2070 à 2100 ("*H2*"), avec la concentration en CO_2 atmosphérique de 724 et 533 ppm respectivement (scénarios ci-après dénommés "*A2H2*" et "*B1H2*"). Afin d'étudier les impacts des scénarios de changement climatique futur sur les systèmes prairies-élevage et l'agriculture, ces scénarios ont été comparés au scénario de référence (période 1976-2005) avec un niveau de 352 ppm de concentration de CO_2 (ci-après dénommé "*CTL*").

1.3 Impacts du changement de climat sur la structure de l'agriculture

Les émissions de gaz à effet de serre provoquées par les activités humaines -en grande partie du fait de l'industrialisation, l'urbanisation et l'explosion démographique depuis le 19^{ème} siècle- ont influencé négativement le climat, en particulier par la hausse des températures. Le réchauffement de la température moyenne observé semble suivre une évolution accélérée ces dernières années.

Le changement climatique aura des conséquences sur l'agriculture en général, par l'augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, tels que l'augmentation

1.3. IMPACTS DU CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LA STRUCTURE DE L'AGRICULTURE

de la fréquence et de l'ampleur des sécheresses et des inondations, ainsi que la disponibilité de l'eau et la hausse de la température. On peut s'attendre à une aggravation des effets des risques naturels et des événements liés à l'évolution du climat (IPCC, 2001b, 2007c). L'activité agricole contribue significativement à l'augmentation des émissions de GES et au réchauffement climatique. Parallèlement, les systèmes de production agricole sont sensibles à l'état du système climatique. Leurs impacts provoquent une boucle de rétroaction présentée dans la Figure 1.3.

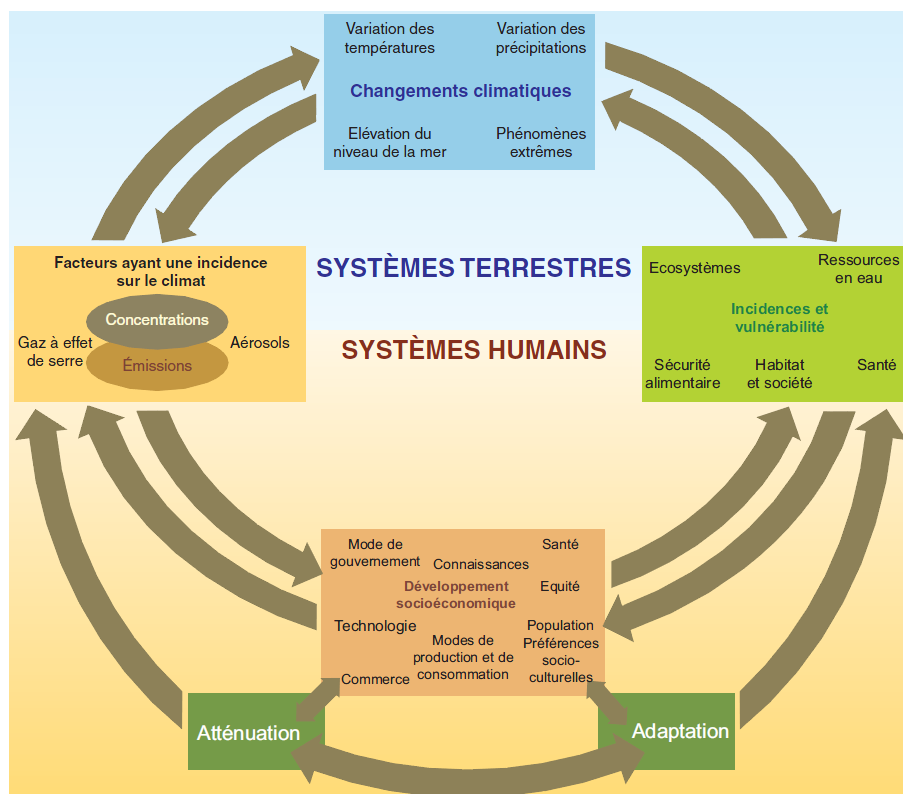


Figure 1.3: Schématisation des facteurs de l'évolution du climat, des effets sur le changement climatique et des réponses apportées par l'IPCC [Figure extraite de Bernstein et al. (2007)].

La relation entre le changement climatique et l'agriculture (production végétale et animale) est complexe. L'agriculture subit les effets du changement climatique tout en étant une source importante d'émissions de GES (à l'échelle mondiale, environ 14% par déforestation, changement d'utilisation des terres, les ruminants, les rizières et d'utilisation des engrais azotés). Elle a simultanément des capacités potentielles d'adaptation et d'atténuation représentant un volume important des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Meybeck et al., 2012).

L'agriculture européenne est l'objet de politiques agro-économiques (PAC) pour lesquelles les problèmes environnementaux (réchauffement climatiques) jouent ou joueront un rôle

important dans l'avenir de ce secteur. Les effets combinés du climat et des politiques provoquent de grandes mutations dans le secteur agricole avec les enjeux considérables de la sécurité alimentaire et de la préservation de l'environnement. Le changement climatique influence les agrosystèmes en termes de relation "input-output" et d'allocation des terres agricoles. Les effets du changement climatique, et l'adaptation des systèmes de production au changement climatique devraient néanmoins être différents en nature et en amplitude si l'on étudie le problème à l'échelle européenne. Notre travail porte essentiellement sur le système de prairies-élevage. La description de ce système et l'évaluation des impacts du changement climatique sur ce système sont détaillées ci-après.

1.3.1 Impacts sur le système prairial et la productivité des cultures

Les pâturages sont une unité importante du fonctionnement de l'écosystème terrestre. Selon les statistiques d'Eurostat, les prairies couvrent 34% de la superficie agricole utile de l'UE-27 (Eurostat, 2012). Les prairies sont l'un des systèmes naturels qui contribuent le mieux à la multifonctionnalité de l'agriculture (Cossée, 1999). L'importance des prairies peut être analysée selon deux points de vue : (i) elles ont un rôle considérable dans la production agricole, puisque le fourrage est un élément essentiel pour l'alimentation du bétail, aussi bien en conditions extensives qu'intensives, (ii) d'un point de vue écologique, elles représentent une ressource importante pour la protection de l'environnement contre l'érosion et le ruissellement (limitation du lessivage), la conservation des espèces, le stockage du carbone dans le sol et la détoxification des polluants des sols. Elles contribuent aussi à la qualité et à la diversité des paysages (FAO, 2010; Huygue, 2008; Silva et al., 2008).

Les impacts directs et/ou indirects du changement climatique peuvent varier, selon le type de cultures végétales et la position géographique de la ferme agricole. Ces impacts sont globalement liés à trois facteurs : (i) la modification du régime des précipitations saisonnières influence l'humidité des sols et la disponibilité en eau. Le risque accru de pénurie d'eau est bien accentué dans les régions de l'Europe du sud, de l'Europe centrale et de l'Europe de l'est. Il est lié à une baisse des précipitations annuelles et estivales dans ces régions. Les régions du nord-ouest de l'Europe, au contraire, ont moins de problème de sécheresse suite à augmentation des précipitations hivernales (Figure 1.4) (Martin et al., 2010) ; (ii) l'augmentation de la température affecte la production et entraîne la réduction des cycles de vie des produits. Les extrêmes de températures élevées seront plus fréquents dans les régions de l'Europe centrale et de l'Europe de l'est ; (iii) la diffusion des maladies des végétaux, avec une fréquence et une intensité accrues, des épisodes de température,

1.3. IMPACTS DU CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LA STRUCTURE DE L'AGRICULTURE

élevée affecte négativement la production agricole en augmentant le risque de pertes de récolte.

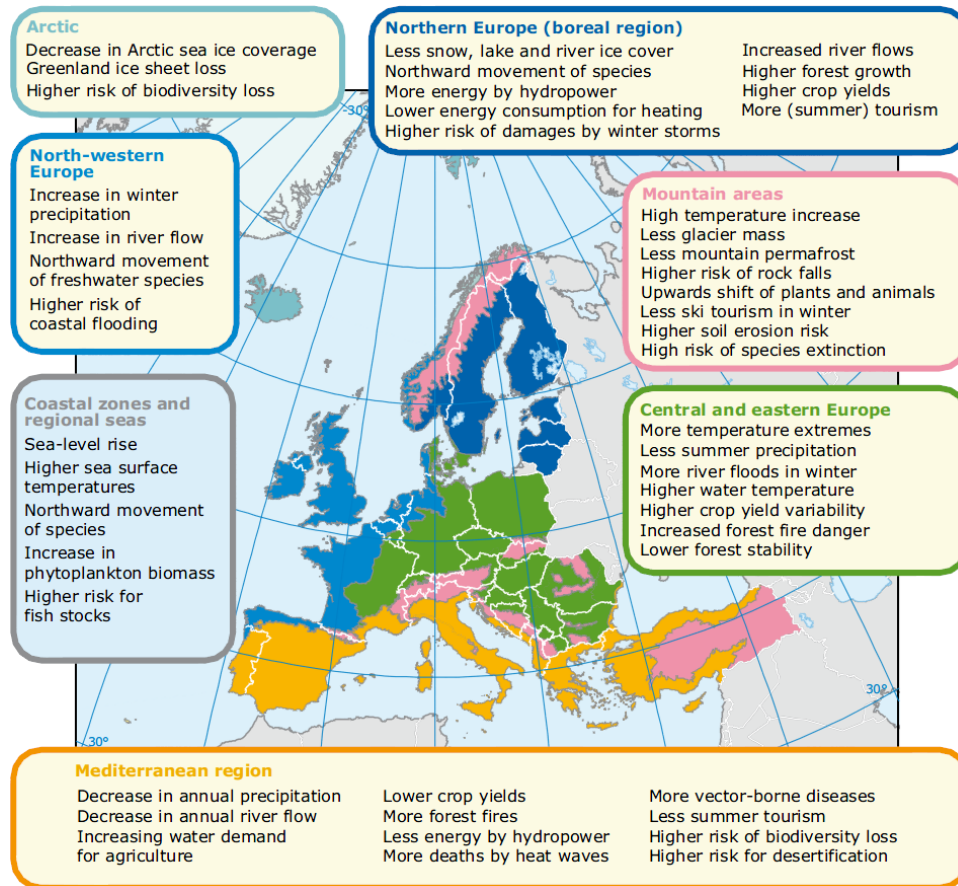


Figure 1.4: Principaux effets observés et prévus des changements climatiques en Europe [Figure extraite de [Martin et al. \(2010\)](#)].

Dans le cas des prairies, l'augmentation du rayonnement solaire et la réduction des précipitations estivales liées au changement climatique diminuent l'humidité du sol et par conséquent la production des prairies ([Brisson & Levrault, 2010](#)). La concentration croissante de dioxyde de carbone a aussi un impact significatif sur la durée des cycles de culture et l'élaboration des rendements, ainsi que sur les conditions de culture. La hausse de la concentration en CO_2 provoque l'augmentation de la quantité de fourrage, mais elle pourrait aussi avoir des répercussions négatives sur la qualité du fourrage, en raison des effets sur la teneur en protéines des plantes, réduisant ainsi la capacité de la terre à fournir l'alimentation du bétail de manière adéquate. Cette augmentation de CO_2 réduit la digestibilité des fourrages qui sont déjà de mauvaise qualité, et pourrait avoir des effets prononcés sur la croissance, la reproduction et la survie des animaux. Les prairies pauvres en azote et riches en espèces réagissent différemment à l'augmentation de la concentration de CO_2 , et les réponses à court terme et à long terme seront différentes ([Cannell & Thornely, 1998](#)).

A côté de tous les effets négatifs introduits par plusieurs travaux, quelques études montrent l'aspect positif de ce changement qui dépend, des espèces cultivées, des conditions de fertilité du sol et d'autres facteurs limitatifs possibles (ex. la possibilité de l'irrigation). L'augmentation des niveaux de CO_2 dans l'atmosphère conduit à une meilleure productivité des cultures selon l'espèce. Les plantes en C3¹ comme le blé et le soja, présentent une augmentation de la productivité de 20 à 30% avec un doublement de la concentration de CO_2 ; les plantes en C4² telles que le maïs et la canne à sucre montrent une réponse moins positive que celle des cultures en C3, en augmentant la productivité en moyenne de 5 à 10% (Fischer et al., 2002). Le travail de Brisson & Levrault (2010) indique que l'accroissement du taux de CO_2 et des températures tendent à augmenter la production, notamment en période humide. Thornely & Cannell (1997) montrent que les prairies intensives et riches en nutriments répondront positivement à la fois à la concentration de CO_2 , et à la température plus élevée, en présence d'une quantité suffisante d'eau. Galko (2007) estime que le forçage de CO_2 conjugué à l'augmentation de la température pourrait favoriser la marge brute agricole. Les surfaces en prairies pourraient augmenter grâce à une meilleure productivité. Dans le cas de la production animale, une hausse du produit brut animal pourra apparaître. Soussana et al. (2002) ont démontré que la production fourragère augmente avec le doublement de la concentration en CO_2 . Pourtant, en combinaison avec un réchauffement de 3 °C, il n'y a pas d'amélioration de la production malgré un allongement de la saison de croissance, car le manque d'eau est accru. Le travail réalisé par Seguin & Soussana (2006) a prouvé un allongement de la période de production des prairies (en moyenne montagne dans le Massif Central), ce qui devrait permettre une augmentation du chargement animal à l'hectare, et de la saison de pâturage, de l'ordre de trois semaines.

1.3.2 Impacts sur le système d'élevage et la productivité des animaux

Le secteur de l'élevage et la production animale occupent une place très importante dans l'agriculture. Ils représentent 70% de toutes les terres agricoles et 30% de la surface terrestre de la planète. Par ailleurs, la production animale apporte une contribution importante à l'économie agricole et présente 40% de la valeur brute de la production mondiale

¹La majorité des espèces végétales entre dans la catégorie des plantes en C3 (blé, tomate, betterave à sucre, pomme de terre, soja, orge, avoine ainsi que tous les arbres). Elles se caractérisent par le type de photosynthèse : elles fabriquent une molécule composée de trois atomes de carbone (cf. cycle de Calvin) pendant les premières phases de l'absorption du CO_2 (FAO, 1997). Elles vivent dans des environnements riches en eau et sont plutôt adaptées aux zones tempérées.

²Les plantes en C4 (sorgho, maïs, canne à sucre) ont la caractéristique de fabriquer une molécule constituée de quatre atomes de carbone, lors des premières phases de l'absorption du CO_2 . Il s'agit des graminées tropicales et tempérées, adaptées à des zones où les précipitations sont abondantes pendant la saison chaude.

1.3. IMPACTS DU CHANGEMENT DE CLIMAT SUR LA STRUCTURE DE L'AGRICULTURE

(Steinfeld et al., 2006; FAO, 2002). Cette part est destinée à augmenter (Steinfeld et al., 2006). Au sein de l'économie agricole Européenne, l'élevage représente l'un des secteurs de l'économie agricole dont la croissance est la plus dynamique, avec les changements technologiques et structurels accélérés.

L'activité de l'élevage et la productivité des animaux peuvent être affectées, directement ou indirectement, par le changement climatique. La température élevée et la hausse de l'énergie rayonnante sont les facteurs qui contribuent au stress thermique. Ils peuvent simplement être définis comme le point où l'animal perd l'équilibre thermique de son corps avec des effets sur sa santé et sur sa performance. Un certain nombre de changements se produisent chez l'animal en raison du stress thermique, notamment la diminution d'absorption de matière sèche de 10 à 20%, la baisse de la production de lait de 10 à 25%, la diminution des performances de reproduction (diminution du taux de fertilité et augmentation du risque de mortalité embryonnaire) et, l'augmentation des décès potentiels de vaches (Chase, 2007; Fuquay, 1989).

Le réchauffement climatique modifie aussi la disponibilité des fourrages et du pâturage, ainsi que le type d'élevage le plus adapté aux différentes zones agro-écologiques. Le [Tableau 1.2](#), résume les impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes de production traditionnels et industriels; ce qui aura de larges conséquences sur la production animale, en raison de ses effets sur l'alimentation du bétail et sa productivité. L'augmentation de température et la diminution des précipitations réduisent le rendement des terres et contribuent à leur dégradation. La baisse des précipitations et la hausse des sécheresses entraînent une diminution de la productivité, avec un risque de surpâturage et de dégradation des sols.

Dans les systèmes de production hors pâturage, le changement climatique devrait avoir surtout des effets indirects. La baisse des rendements agricoles et la concurrence accrue des autres secteurs auront des effets sur l'augmentation du prix des céréales et des cultures oléagineuses (principales sources d'alimentation animale). Le réchauffement climatique peut aussi augmenter le coût du bien-être des animaux (climatisation des bâtiments) et il joue un rôle significatif dans la propagation des maladies. Avec la hausse des températures et la variabilité des précipitations, de nouvelles maladies risquent d'apparaître ou des maladies connues peuvent toucher des régions qui ont été jusqu'à maintenant préservées (FAO, 2009).

Le changement climatique aura probablement des impacts sur les systèmes de production animale de toute l'Europe. Selon la [FAO \(2009\)](#), les impacts du changement climatique varient selon la nature du système d'élevage. Certains de ces impacts seront plus mar-

	Pâturage	Autres systèmes
Impacts directs	<ul style="list-style-type: none"> * Augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrême * Augmentation de la fréquence et de l'ampleur des sécheresses et des inondations * Pertes de productivité (stress physiologique) dues à la hausse de la température * Évolution de la disponibilité de l'eau (peut augmenter ou baisser, selon la région) 	<ul style="list-style-type: none"> * Évolution de la disponibilité de l'eau (augmenter/baisser, selon la région) * Augmentation de la fréquence des événements météorologique extrêmes (impact moins précis que pour les systèmes extensifs)
Impacts indirects	<ul style="list-style-type: none"> * Évolutions agro-écologiques et transformation des écosystèmes entraînant : <ul style="list-style-type: none"> - une altération de la qualité et de la quantité du fourrage - des évolutions au niveau des interactions hôtepathogène entraînant une incidence accrue des maladies naissantes - des épidémies 	<ul style="list-style-type: none"> * Augmentation des prix des ressources (aliments, eau et énergie) * Épidémies de maladie * Augmentation du coût des logements pour les animaux (les systèmes de refroidissement)

Table 1.2: Les impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes de production animale [source : [FAO \(2009\)](#)].

qués pour les systèmes de pâture. La hausse de température et l'ampleur des sécheresses affectent directement la production fourragère, et donc le système d'élevage. Pour rester actifs et compétitifs, dans certaines régions, les agriculteurs devront adapter leurs pratiques. Par ailleurs, la demande mondiale de protéines animales augmentera en fonction de l'évolution démographique, de la hausse du revenu réel et du changement des habitudes alimentaires. C'est pourquoi la production animale joue et continuera à jouer un rôle essentiel dans l'approvisionnement alimentaire.

Les systèmes de production animale supposent non seulement la production de viande, mais également ils jouent un rôle important pour entretenir la biodiversité et assurer le maintien de l'activité économique particulièrement dans les régions défavorisées. Le secteur de l'élevage produit aussi des nutriments, sous forme d'effluents et de boues utilisés pour amender les sols, ainsi que des matières premières pour la production de biogaz. Il fournit également des produits dérivés de la chaîne de production, tels que le suif³, source de biodiésel et produit substitut aux carburants fossiles ([OCDE, 2006](#); [AAC](#),

³Le suif est l'une des sources biologiques de biodiésel équivalent au diésel. Ce combustible est parmi les sources de biodiésel les plus courantes en Amérique. L'utilisation du suif n'est pas encore développée au sein de l'Union européenne et en Asie. Actuellement, l'huile de colza et l'huile de palme sont

2006; OCDE-FAO, 2010).

1.3.3 Système d'élevage : acteur potentiel du changement climatique

L'activité d'élevage influe considérablement sur les ressources mondiales en eau, la terre et la biodiversité naturelle et il contribue aussi largement à l'effet de serre. Selon le rapport publié par la FAO, l'élevage est un des premiers responsables des émissions de gaz à effet de serre (Steinfeld et al., 2006). L'élevage et les activités liées aux animaux comme la déforestation et les pratiques agricoles accentuent les émissions de gaz à effet de serre (au niveau mondial, plus de 18%, répartis comme suit : 9% de l'émission de dioxyde de carbone liée aux changements d'utilisation des terres causés par l'expansion de la production animale, près des deux tiers des émissions mondiales anthropiques de protoxyde d'azote par les fumiers, 35 à 40% des émissions totales de méthane par la fermentation entérique des ruminants) et il est également le premier responsable de la destruction de la couche d'ozone.

Tel qu'indiqué ci-dessus, les ruminants contribuent largement à l'effet de serre en raison de leur production de méthane d'origine digestive. En Europe ou en Amérique du Nord, une vache à viande produit de 60 à 71 kg/an de méthane, soit environ 1.3 tonnes d'équivalent CO_2 et une vache laitière produit de 109 à 126 kg/an de méthane, soit environ 2,4 tonnes d'équivalent CO_2 (O'Mara, 2004; Johnson & Johnson, 1995). Il faut ajouter à cela, l'utilisation des fumiers, lisiers et les engrais chimiques qui participent de manière indirecte à l'émission de CH_4 .

1.4 Évolution socioéconomique et ses impacts

La question du changement climatique a été développée dans les parties précédentes, cependant les évolutions socioéconomiques (l'évolution du produit intérieur brut et de la population, ainsi que les changements futurs de prix, etc.) pourront également influencer le secteur agricole, y compris celui du système de prairies-élevage.

Afin de bien prendre en compte les effets des évolutions socioéconomiques sur le marché agricole, le quatrième rapport d'évaluation de l'IPCC, s'oriente vers cinq types de scé-

respectivement les principales sources dans l'UE et en Asie (AAC, 2006).

nario socio-économique (SSP). Ces scénarios varient en fonction de la capacité d'adaptation de la société au changement climatique et de leur capacité à atténuer les émissions de GES (IPCC, 2010) :

- I. Le scénario “*SSP1*” décrit un monde durable avec une haute capacité d'adaptation et d'atténuation. Il présente des objectifs de développement durable incluant la réduction de la dépendance à l'égard des carburants fossiles et les progrès technologiques rapides, vers des procédés plus respectueux de l'environnement y compris les technologies permettant d'améliorer les rendements.
- II. Le scénario “*SSP2*” dénomme un cas intermédiaire entre les deux scénarios *SSP1* et *SSP3*, où la capacité d'adaptation et d'atténuation est faible.
- III. Dans le scénario “*SSP3*” la capacité d'atténuation et d'adaptation de la société est faible. Une croissance économique modérée et une population à croissance démographique rapide entraînent l'augmentation des émissions de GES. La mutation technologique, dans le secteur de l'énergie, est lente et rend l'atténuation difficile. Des politiques sont orientées vers la sécurité et la production industrielle et sont donc peu soucieuse de l'environnement. Un grand nombre de personnes sont vulnérables au changement climatique, du fait de la faiblesse de l'investissement en capital humain et en développement institutionnel.
- IV. Le scénario “*SSP4*” est un scénario avec faible capacité d'adaptation et haute capacité d'atténuation. Il décrit un monde avec un développement technologique relativement rapide, dans le domaine des sources d'énergie sobres en carbone (à faible teneur en carbone), dans les régions émettrices. Cependant, dans les autres régions, le développement progresse lentement. Ainsi, une grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.
- V. Dans le scénario “*SSP5*”, le monde est plutôt centré sur le développement traditionnel qui se base sur une forte consommation d'énergie, ainsi que sur des technologies émettrices de carbone. C'est un monde qui a une forte capacité d'adaptation avec, à l'inverse, une faible capacité d'atténuation. Un monde moins vulnérable qui a l'avantage de mieux s'adapter aux impacts du changement climatique, à la croissance démographique selon un rythme plus lent, et à la répartition des ressources plus équitable.

L'étude présentée dans le [Chapitre 6](#), examine les deux scénarios contrastés “*SSP1*” et “*SSP3*”, avec l'objectif d'étudier les impacts des scénarios socio-économiques sur le secteur agricole Européen.

1.5 Organisation de la thèse

La thèse est structurée en six chapitres, dont un est publié et trois présentés sous forme d'articles rédigés en anglais.

Le chapitre 2 expose l'objectif de recherche et les choix méthodologiques. Il précise également les modèles utilisés pour simuler les systèmes de prairies-élevage mettant en jeu de nombreuses interactions entre systèmes de production agricole, facteurs climatiques et socioéconomiques.

Le chapitre 3 s'appuie sur l'étude de l'adaptation et de la vulnérabilité des systèmes agricoles, et plus particulièrement des systèmes d'élevage, dans un contexte de changement climatique. Ce chapitre a été publié par la revue française Fourrages (n° 215, septembre 2013).

Le chapitre 4 vise à améliorer l'évolution de la valeur économique des productions agricoles partiellement ou totalement utilisées à la ferme, par le modèle bioéconomique. Cette méthode a également été utilisée dans la [Chapitre 5](#) mettant l'accent essentiellement sur la production fourragère.

Le chapitre 5 est consacré à l'étude des futurs impacts économiques du changement climatique sur les prairies et ses interaction avec les systèmes agricoles, à travers un couplage entre un modèle économique et un modèle de prairies à l'échelle Européenne.

Le chapitre 6 traite et analyse, grâce à son approche multi-échelles, les défis des évolutions socioéconomiques globales (la variation des prix) pour le secteur agricole Européen. Il fournit également une évaluation quantitative des impacts économiques et environnementaux sur le secteur agricole à l'extérieur de l'Union européenne.

Le chapitre 7 présente la conclusion et les perspectives de la thèse.

Bibliography

- AAC (2006). *Le biodiésel*. Technical report, Agriculture et Agroalimentaire Canada. <http://publications.gc.ca/collections/Collection/A27-18-19-15F.pdf>.
- Bard, E. (2004). Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *C. R. Geoscience*, 336, 603–638.
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., Hare, W., Huq, S., Karoly, D., Kattsov, V., Kundzewicz, Z., Liu, J., Lohmann, U., Manning, M., Matsuno, T., Menne, B., Metz, B., Mirza, M., Nicholls, N., Nurse, L., Pachauri, R., Palutikof, J., Parry, M., Qin, D., Ravindranath, N., Reisinger, A., Ren, J., Riahi, K., Rosenzweig, C., Rusticucci, M., Schneider, S., Sokona, Y., Solomon, S., Stott, P., Stouffer, R., Sugiyama, T., Swart, R., Tirpak, D., Vogel, C., & Yohe, G. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Brisson, N. & Levrault, F. (2007-2010). *Livre Vert de projet CLIMATOR, Changement Climatique, Agriculture et Forêt en France: simulation d'impacts sur les principales espèces*. ADEME.
- Caldeira, K. & Wickett, M. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425, 365.
- Cannell, E. & Thornely, J. (1998). N-poor ecosystems may respond more to elevated CO_2 than n-rich ones in the long term. a model analysis of grassland. *Global Change*, 4, 431–42.
- Chase, L. E. (2007). Climate change impacts on dairy cattle. *Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses*.
- Comission, E. (2009). *Comission staff working document, EU 2009 Report on Policy Coherence for Development*. Technical report, Comission of the European communities.
- Cossée, B. (1999). La plurifonctionnalité des prairies. *AFPF*, 160, 333–343.

BIBLIOGRAPHY

- Eurostat (2011). *Projections de population 2010-2060*. Technical report, Eurostat.
- Eurostat (2012). *Agriculture, fishery and forestry statistics; Main results 2010-11*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- FAO (1997). *Le Changement Climatique, les Forêts et l'Aménagement Forestier: Aspects Généraux*. FAO.
- FAO (2002). *World agriculture: towards 2015/2030*. Technical report, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- FAO (2003). *Agriculture, food and water*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO (2009). *The State of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2010). *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems; A technical report on grassland management and climate change mitigation*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO (2012). *FAO Statival Yearbook, World Food and Agriculture*. Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy.
- Fischer, G., Shah, M., & van Velthuisen, H. (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability, Special Report to the UN World Summit on Sustainable Development, Johannesburg 2002*. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis under United Nations Institutional.
- Fuquay, J. (1989). Heat stress as it affects animal production. *Animal science*, 52, 164–174.
- Galko, E. (2007). *Modélisation de l'offre agricole européenne face à de nouveaux enjeux : réformes politiques, effet de serre et changement climatique*. PhD thesis, ABIES.
- Huygue, C. (2008). La multifonctionnalité des prairies en France: I. les fonctions de productions. *Cahiers Agricultures*, 17, 427–435.
- IPCC (2000). *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, UK. pp 570.
- IPCC (2001a). *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical report, Cambridge University Press, New York.

- IPCC (2001b). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of WG II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007 : Synthesis Report*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007b). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. IPCC Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007c). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2010). *IPCC Workshop on Socio-Economic Scenarios*. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- Johnson, K. & Johnson, D. (1995). Methane emissions from cattle. *Animale Science*, 73, 2483–2492.
- Martin, J., Henrichs, T., Pirc-Velkavrh, A., Volkery, A., Jarosinska, D., Csagoly, P., & Hoogeveen, Y. (2010). *The European environment - state and outlook 2010: synthesis*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- Meybeck, A., Gitz, V., Azzu, N., Batello, C., Chaya, M., De Young, C., Friedrich, T., Gerber, P., Henderson, B., Osborn, T., Sessa, R., Soto, D., Yirenyki, S., & Martinez, D. (2012). *Greening the economy with climate-smart agriculture*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- OCDE (2006). *Libéralisation des échanges dans le domaine des énergies renouvelables et des technologies associées : biodiesel, énergie solaire thermique et énergie géothermique*. Technical report, OCDE.
- OCDE-FAO (2010). *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2010*. OCDE-FAO.
- OECD (2009). *Building Blocks for Policy Coherence for Development*. Technical report, Organization for Economic Cooperation and Development (OECD).
- OECD (2011). *Evaluation of Agricultural Policy Reforms in the European Union*. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD).
- O'Hara, P., Freney, J., & Ulyatt, M. (2003). *Abatement of Agriculture Non-Carbon Dioxide Greenhouse Gas Emissions*. MAF.

BIBLIOGRAPHY

- O'Mara, F. (2004). Greenhouse gas production from dairying: reduction methane production. *Advances in Dairy Technology*, 16, 295.
- Pierrehumbert, R. T. (2004). Greenhouse effect: Fourier's concept of planetary energy balance is still relevant today. *Nature*, 432, 677.
- Seguin, B. & Soussana, J. (2006). Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de ges. *Fourrages*, 186, 139–154.
- Silva, J., Toland, J., Jones, W., Eldridge, J., Thorpe, E., & O'Hara, E. (2008). *LIFE and Europe's grasslands: Restoring a forgotten habitat*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- Soussana, J., Teyssonneyre, F., Picon-Cochard, C., Casella, E., Belse, J., Lherm, M., & Loiseau, P. (2002). Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production. *Fourrages*, 169, 3–24.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow, environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Steven K., R. & Huey-Lin, L. (2008). *Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions Data for Climate Change Economic Analysis*. Technical report, GTAP Working Paper No. 43.
- Thornely, J. & Cannell, M. (1997). Temperate grassland responses to climate change: an analysis using the hurley pasture model. *Annals of Botany*, 80, 205–21.

Chapter 2

La question, les hypothèses et les démarches de la thèse

2.1 Problématique et objectifs de recherche

Dans le cadre de la thèse, je me suis attachée d'un côté à comprendre les interactions entre le changement climatique et le système de "prairies-élevage" et ses effets sur l'agriculture européen (cf. [Chapitres 3 et 5](#)). Et de l'autre côté, j'ai étudié les impacts d'évaluation socioéconomique sur le marché agricole, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'Union européenne (l'UE) (cf. [Chapitre 6](#)). La thèse s'articule autour de trois axes principaux :

- I. Quantifier et intégrer les impacts potentiels du changement climatique sur le secteur "prairies-élevage" européen. Ces impacts seront analysés en termes :
 - d'allocation des terres et d'impacts de la production végétales (productivité, rendements, etc.)
 - d'impacts plus spécifiquement économiques (en particulier en terme de marges brutes, productions, couts, etc.)
 - d'impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre)
- II. Évaluer les effets du changement climatique combinés à ceux qu'engendre l'évolution des politiques publiques (PAC, etc.)
- III. Estimer les impacts des futures changements socioéconomique sur le système d'agricole et ses interactions avec les systèmes prairies-élevage.

Pour traiter l'ensemble de ces enjeux, le couplage des modèles a été utilisée pour obtenir de plus amples renseignements sur ces enjeux associés. Ce choix collectif à été fait dans le cadre de deux projets qui ont financé la thèse : [AnimalChange](#) (projet européen FP7, 2007-2013, n° 266018) et [Validate](#) (projet ANR-VMCS, 2008-2012, n° ANR- 07-VULN-11-011). Un résumé de ces projets est présenté en annexe de la thèse.

Pour atteindre les objectifs de la thèse, dans un premier temps, j'ai mis l'accent sur le calcul de la valeur économique des prairies et les cultures qui sont entièrement/ partiellement consommées sur la ferme, pour les productions desquelles il n'y a pas de prix de marché. Ce calcul a été fait à l'aide du modèle agro-économique AROPAj. Ce travail est fourni en [Chapitre 4](#) de la thèse. Je me sers ensuite de cette valeur pour estimer les courbes de réponse simulée des rendements des prairies aux intrants azotes. Les rendements des prairies ont été calculés par le modèle PaSim qui est un modèle mécaniste biogéochimique de simulation d'un écosystème prairial géré. Ce travail à été présenté dans le [Chapitre 5](#),

qui a pour objectif d'étudier l'impact potentiel des variations du changement climatiques sur les prairies ainsi que sur le système d'élevage européen.

Enfin, afin d'analyser la façon dont les futures conditions socio-économique peuvent affecter les systèmes agricoles, la méthode de couplage d'un modèle économique d'équilibre partiel (GLOBIOM) avec le modèle AROPAj a été choisie. La présentation de ce travail est fourni dans le [Chapitre 6](#) de la thèse.

2.2 Protocole méthodologique

La méthodologie utilisée est fondée sur de l'expertise et la modélisation intégrée (modèles biophysique et économique) à différents niveaux (périmètre économique, échelle géographique). Dans le but de mesurer le coût économique du changement climatique et socio-économique pour le système agricole, nous nous sommes appuyés sur les quatre modèles existant de : AROPAj (modèle économique de l'offre agricole européenne), STICS (modèle de culture), PaSim (modèle mécaniste, déterministe et dynamique d'un écosystème prairial), et GLOBIOM(modèle d'équilibre partiel).

La modélisation permet de prendre en compte différentes éléments exogènes (climatiques et socio-économiques) en les paramétrant plus facilement que de passer par des expérimentations en conditions réelles. La modélisation est jugée moins coûteuse et plus efficace en terme de temps.

Notre approche repose sur le couplage de modèles déjà éprouvés qui nous permet de produire une évaluation des impacts économiques du changement climatique / socio-économique et des rétroactions de celui-ci sur les systèmes de production agricole dans une perspective d'économie publique. La marge brute agricole, les coûts des politiques publiques affectant le secteur agricole, et les émissions de gaz à effet de serre constitueront le critère public privilégié dans cette analyse. Le reste de l'économie et les rétroactions attendus par les prix ont été associées à l'analyse en utilisant les modèles macro-économiques existants. Outre cette évaluation économique, nous avons focalisé l'analyse sur les évolutions possibles en termes d'usage des terres agricoles et d'intensité factorielle (azote, chargement animal, etc.).

A cette fin, l'emploi d'un modèle agronomique (forçage STICS-AROPAJ) permet d'acquérir des données fines sur les relations entre l'apport azoté et le rendement des grandes

cultures, ce qui sert à compléter les données d'entrées du modèle économique AROPAj et y apporter une meilleure sensibilité technique au niveau des principales cultures européennes. Pour l'évaluation économique du système des prairies et compléter les fonctions dose-réponse associant intrants azotés et rendement de fourrages et prairies, nous avons fait appel au modèle de simulation d'un écosystème prairial (forçage PaSim-AROPAj), qui nous offre la possibilité de les intégrer dans le modèle économique. Enfin, le couplage d'un modèle de type équilibre partiel avec le modèle AROPAj (forçage GLOBIOM-AROPAj), permet d'analyser l'évolution future des prix agricoles sur le marché agricole. La caractéristique de chaque modèle sera présentées en détail ci-après.

2.2.1 Modèles en jeu

2.2.1.1 Modèle économique d'offre agricole (AROPAj)

AROPAj (Agriculture, Recomposition de l'Offre et Politique Agricole) développé au sein de l'UMR Économie Publique de l'INRA, est un modèle annuel de programmation mathématique linéaire (PL) qui simule l'offre agricole de l'Union européenne. Les paramètres du modèle sont essentiellement estimés à partir des données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) européen¹.

Ce modèle calcule les choix individuels d'offre des agents en termes d'allocation des surfaces, de production animale, de production végétale et d'intra consommation pour un ensemble d'exploitations représentatives (exploitation-type, ci-après dénommée "groupe-type"). Les groupes-types se sont différenciés au sein d'une même région selon trois caractéristiques: (i) *l'altitude (a priori celle du siège de l'exploitation, ou celle qui est indiquée dans le registre du RICA par l'exploitant enquêté)* comprenant trois classes d'altitude de 0-300 m, 300-600 m, au-dessus de 600 m, (ii) *la dimension économique* définie à partir d'une normalisation du résultat économique (déclinée en 9 catégories), et (iii) *l'orientation technique-économique (OTE)* définie à partir de la répartition de la marge brute entre les principales productions animales et végétales, conduisant dans le

¹Le RICA collecte chaque années, les données comptables des exploitations agricoles de tous les états membres de l'UE, afin d'évaluer le revenu des agriculteurs et l'impact des réformes de la Politique Agricole Commune (PAC). Les données du RICA couvrent environ 90% de la superficie agricole utile (SAU) et présente plus de 90% de la production agricole totale de l'UE. Les informations recueillies pour chaque exploitation comportent les variables des données physiques et structurelles (localisation, la superficie des cultures, le cheptel, la population active, etc) et les variables économiques et financières (la valeur de la production des différentes cultures, stocks, ventes, achats, coûts de production, des actifs, des passifs, des quotas de production et les subventions, etc), y compris celles liées à l'application des mesures de la PAC

RICA à une nomenclature en 14 types. Le nombre d'exploitations regroupées dans un groupe-type doit être assez grand pour se conformer aux restrictions de confidentialité, mobilisant un échantillon d'au moins quinze exploitations agricoles.

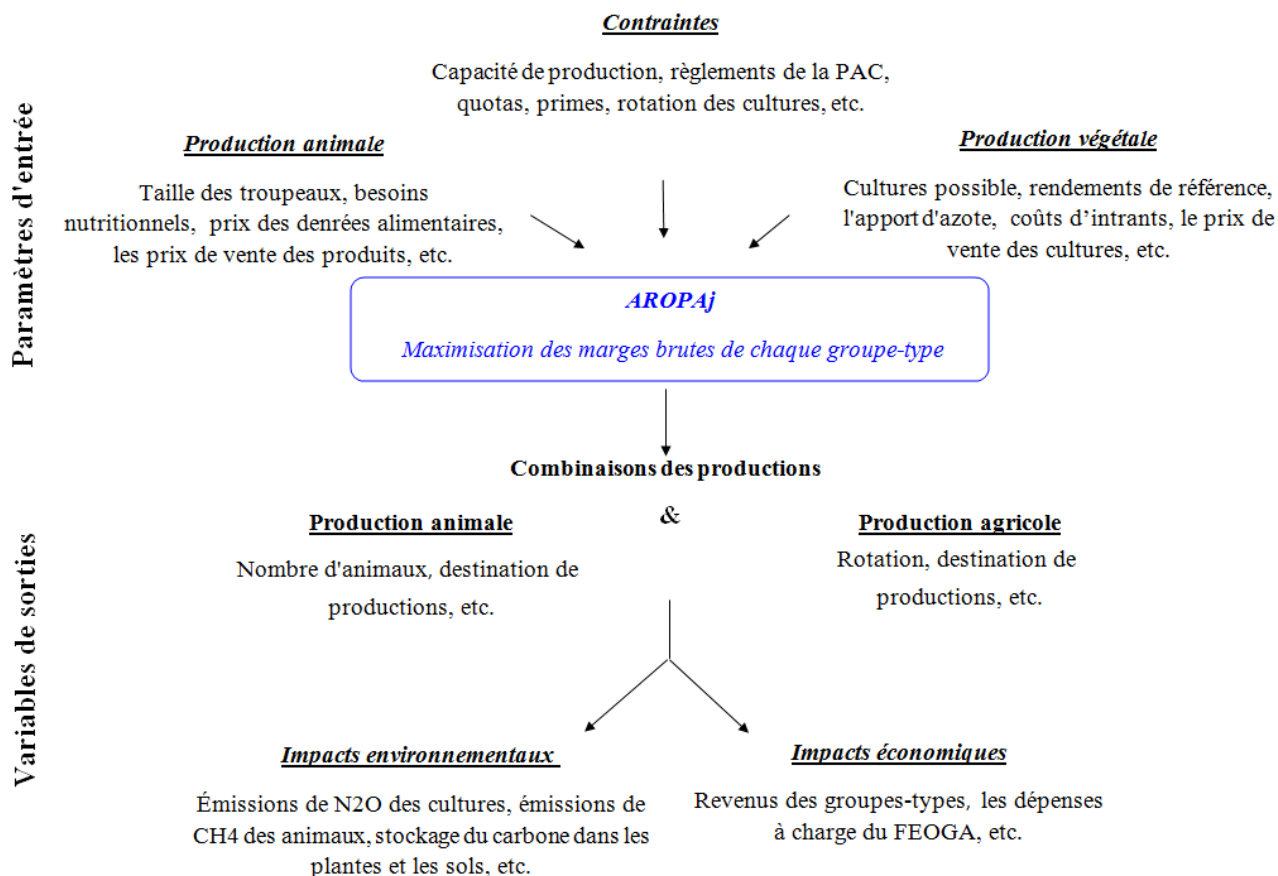


Figure 2.1: Schéma du modèle AROPAj

La Figure 2.1 présente une vue schématique du modèle AROPAj, exposant en détail les paramètres d'entrée, les contraintes et les paramètres du modèle. Les variables et contraintes appartiennent à trois grandes catégories de "modules" que sont (i) la production animale (effectifs animaux, production de lait, l'alimentation, les quotas laitiers) et (ii) la production végétale comprennent la superficie de chaque culture, de céréales ou d'autres produits végétaux, la terre comme facteur quasi-fixe, les quotas laitiers et les quotas de betteraves à sucre) et (iii) les contraintes relatives aux politiques telles que la PAC ou les politiques à visée environnementale qu'il est facile d'implémenter dans le modèle (taxe sur les pollutions ou sur les polluants, etc.).

Les variables éventuellement calculées par le modèle sont principalement associées aux surfaces et rendements optimums des cultures, les surfaces en jachère, effectifs animaux, destinations de productions (marché ou intra-consommation), émissions de GES. AROPAj

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

calcule environ 20 sources d'émission de méthane (CH_4) -produit par la fermentation entérique des animaux, la gestion du fumier, et la culture du riz- et protoxyde d'azote (N_2O) -produit par l'utilisation des engrais azoté, l'épandage du fumier, les résidus de récolte dans le sol-, fondée sur la base des directives de niveau 1 de l'IPCC (Tier 1 guidelines) (Houghton et al., 1996).

AROPAj couvre trente-deux activités végétales représentant la plupart des utilisations de terre agricole européenne, comprenant principalement les grandes cultures, les prairies et les fourrages. Les agriculteurs ont la possibilité de vendre leurs productions ou bien de les consommer sur la ferme pour l'alimentation animale. Au niveau des catégories d'animaux, trente-une activités sont présentes dans le modèle, comprenant vingt-sept catégories pour les bovins et quatre catégories respectivement pour les ovins, caprins, porcs et volailles. Les activités animales sont distinguées en fonction de la classe d'âge, du sexe, de la destination et de l'orientation du troupeau (viande et lait). Dans le modèle, l'alimentation des animaux est fondée sur quatre types d'aliments concentrés et un type d'aliment grossier (Jarrige, 1988), avec différents contenus en énergie et en protéines pour répondre aux besoins nutritionnels des animaux. Dans le modèle, les exploitants choisissent l'alimentation animale de façon à couvrir les besoins en énergie et en protéines de chaque catégorie animale. Pour les herbivores, il existe une contrainte additionnelle de limite de capacité d'ingestion. Enfin une part importante des contraintes est associée aux restrictions imposées par la PAC. Les obligations de jachère tout comme les quotas laitiers et sucriers font partie de ces contraintes qu'il est possible de modifier voire de supprimer selon les scénarios de PAC qui seront retenus pour les simulations.

Les étapes de construction du modèle consistent en :

- La conception de l'exploitation-type décrivant l'objectif de la ferme (maximiser la marge brute, etc.), les activités et l'ensemble de production défini par des contraintes liées à différents blocs (systèmes de cultures, démographie bovine, alimentation animale, émissions de GES, bilan azoté, etc.).
- Le regroupement des exploitations individuelles de l'échantillon RICA en groupe type (Tableau 2.1), qui sont ensuite les entités retenues comme agents économiques de base représentés par autant de modèles économiquement indépendants (programmes linéaires).
- La pré-estimation des paramètres à l'aide de méthodes économétriques linéaires à partir des données du RICA combinées avec des dires d'experts (pour l'alimentation animale en particulier).

- Le calibrage qui consiste à ré-estimer des sous-ensembles des paramètres par des méthodes de type Monte Carlo et gradient.

Dans le modèle AROPAj, chaque exploitation-type “ k ” est supposé choisir le niveau de l’offre et de la demande d’intrants en maximisant la marge brute totale “ π_k ”. Le modèle générique pour la exploitation-type k peut être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \max_{x_k} \pi_x(x_k) &= g_k \cdot x_k \\ \text{s.c. } A_k \cdot x_k &\leq z_k \\ X_k &\geq 0 \end{aligned}$$

Où x_k , g_k , A_k désignent le vecteur d’activité de l’exploitation-type k , la marge brute et la matrice des coefficients d’entrée-sortie. Le vecteur z_k désigne les ressources ou capacités de production. Les composantes du vecteur x_k incluent différentes variables comme les surfaces de cultures en hectares, la production végétale distinguant la part intra-consommée de la part vendue, le nombre d’animaux de chaque catégorie, la production de lait, ainsi que la production de fourrage et les quantités d’aliment concentré pour le bétail. Les émissions de gaz à effet de serre sont aussi parmi les composantes de x_k . Le vecteur g_k comporte les coûts de l’alimentation animale, les coûts associées aux cultures fourragères et aux cultures de vente.

Il est important de noter que, la superficie agricole utilisée par chaque groupe-type est considérée comme fixe (le changement de la surface agricole utile -SAU- est exogène) et les éleveurs ont la possibilité de modifier leur capital animal dans la limite d’une amplitude de variation exogène du capital animal initial (on retiendra dans la plupart des simulations un taux d’ajustement du capital animal de +/- 15%).

Il existe trois versions du modèle : version 2 (V2) qui couvre l’Union européenne à 15 (l’UE-15) avec 101 régions et 1074 exploitations-types, qui est fondée sur les données du RICA-2002. Les fonctions dose-réponse entre azote-rendement sont calculées pour V2, issue du travail de [Godard \(2005\)](#); [Godard et al. \(2008\)](#), pour les grandes cultures y compris les céréales, oléagineux, betterave et pomme de terre. Cette version bénéficie aussi d’un module de spatialisation à haute résolution ([Cantelaube et al., 2012](#)). Le travail présenté dans le [Chapitre 5](#) vise à compléter la base de données de cette version d’AROPAJ en calculant les fonctions dose-réponse de l’azote-rendement de cinq types de prairies et fourrages. La version V3 du modèle est calibrée pour l’UE-24, couvrant

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

119 régions et 1307 exploitations-types, représentant le secteur européen sur la base des données du recensement du RICA de 2004 (Tableau 2.1). La version 4 du modèle est en phase de calibrage et couvre l'Union européenne à 27 (L'EU-24 plus la Bulgarie, la Roumanie et la Malte).

Les modèles économiques qui peuvent traiter de politiques économiques et environnementales liées à l'agriculture sont nombreux (e.g. FARMIS (Osterburg et al., 2001), CAPRI (Britz & Witzke, 2008), PROMAPA (Júdez et al., 2008) et AROPAj (Jayet & Labonne, 2005)). À cet égard, nous pouvons comparer les deux modèles AROPAj et CAPRI² qui sont les deux modèles qui appartiennent à la catégorie des modèles économiques d'offre les plus utilisés au niveau européen.

Le caractère générique du modèle AROPAj, évoqué ci-dessus, présente plusieurs intérêts par rapport aux questionnements de cette thèse. Il couvre les liens entre les différentes activités agricoles et leur environnement physique. La représentation fine des systèmes agricoles Européens correspond au niveau auquel nous souhaitons porter notre analyse. Par exemple dans le cas du modèle CAPRI, il ne donne pas une représentation détaillée de l'hétérogénéité spatiale des systèmes de production agricole à un niveau inférieur aux régions administratives (NUTS II). Par ailleurs, le modèle AROPAj est développé pour la prise en compte de phénomènes de petite échelle, tels que le tassement des sols. Nous utiliseront le modèle AROPAj tout au long de ce travail pour étudier le secteur agricole européen dans divers contextes climatiques et techniques. Cette choix a été fait pour la raison d'accéder au coeur du modèle AROPAj du point de vue informatique.

²Common Agricultural Policy Regional Impact modelling system

Etat membre	V2 - RICA 2002			V3 - RICA 2004		
	Groupe- type	N° des exploita- tions agricoles	SAU (M ha)	Groupe- type	N° des exploita- tions agricoles	SAU (M ha)
Belgique	27	33.77	42.15	24	29.95	34.56
Chypre	-	-	-	9	8.46	1.89
République tchèque	-	-	-	23	12.21	91.39
Danemark	22	43.59	68.55	21	37.34	53.18
Allemagne 1	91	121.70	654.56	90	111.06	640.69
Allemagne 2	53	83.24	750.24	48	88.97	757.27
Grèce	54	198.10	89.57	59	208.54	117.82
Espagne 1	99	200.54	923.55	89	165.20	541.53
Espagne 2	56	129.42	303.54	61	109.77	275.27
Estonie	-	-	-	11	6.53	14.18
France 1	99	179.37	1691.87	91	186.64	1695.33
France 2	58	134.53	578.27	53	112.75	417.10
Royaume-Uni	59	118.22	657.80	64	93.56	610.26
Hongrie	-	-	-	45	66.78	420.43
Irlande	22	76.91	83.53	23	68.98	84.09
Italie 1	90	114.99	317.47	92	165.01	533.02
Italie 2	98	125.58	320.04	98	166.74	419.44
Italie 3	90	133.36	303.33	17	21.96	15.16
Lituanie	-	-	-	22	29.52	142.75
Luxembourg	13	1.64	1.76	11	1.51	1.42
Lettonie	-	-	-	19	19.87	54.65
Pays-Bas	19	51.29	28.40	18	41.59	22.33
Autriche	38	74.09	82.82	39	72.93	85.90
Pologne 1	-	-	-	97	212.24	1129.71
Pologne 2	-	-	-	79	226.04	320.45
Portugal	37	78.97	80.07	32	72.18	66.07
Finlande	20	42.88	41.15	21	42.17	45.93
Suède	29	39.00	87.97	27	30.57	68.12
Slovaquie	-	-	-	13	3.42	23.28
Slovénie	-	-	-	11	33.44	5.44
EU-15	1074	1981.24	117992.16	-	-	-
EU-27	-	-	-	1307	2445.97	231180.30

Table 2.1: Représentation schématique de deux versions du modèle AROPAj (les groupes-types du modèle, le nombre des exploitation agricoles ainsi que le surface agricole utile (SAU)).

2.2.1.2 Modèle générique de culture (STICS)

Le modèle **STICS** (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard), développé au sein de l'INRA depuis 1996, est un modèle de fonctionnement des cultures et de leurs bilans hydrique et azoté, à pas temps journalier (Brisson et al., 1998, 2003, 2008) qui simule le comportement du système sol-culture à l'échelle annuelle.

Ce modèle de croissance de culture est organisé en huit composantes principales : trois modules traitent des parties aériennes des plantes (développement, croissance aérienne et rendement), quatre autres modules simulant le bilan hydrique, azoté et la croissance racinaire du sol et un dernier module gérant les interactions entre les techniques culturales et le système sol-plante, concernant des apports d'eau, d'engrais et de l'environnement climatique. Il simule le fonctionnement des cultures à partir des variables d'entrées liées au climat, au sol et au système de culture. Il estime les variables de sortie représentant la quantité et qualité de la production, l'environnement et l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture (Figure 2.2).

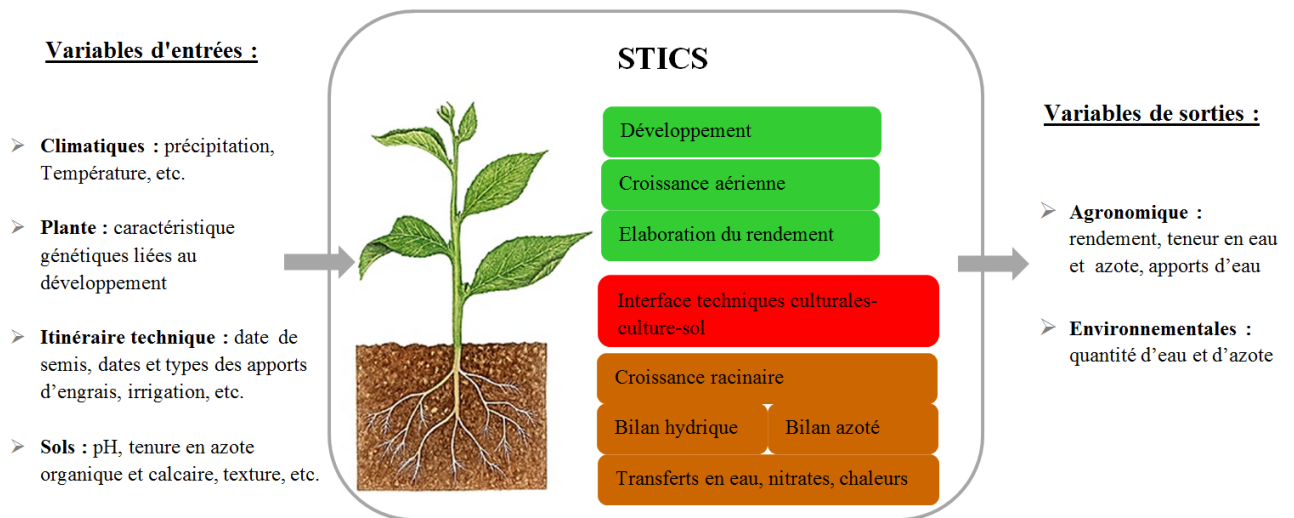


Figure 2.2: Variables d'entrées du modèle STICS relatives au climat-sol-système de culture; schéma basé sur [Brisson & Mary \(2002\)](#).

STICS est adaptable à plusieurs cultures (blé, maïs, soja, sorgho, lin, prairies, tomate, betterave, tournesol, pois, colza, banane, canne à sucre, carotte, laitue, etc.) et il a la capacité de simuler des conditions pédoclimatique variées sans générer de biais importants. Les principaux processus de simulation représentés par STICS sont la croissance et le développement des cultures associés à l'eau et l'azote du sol. Pour traiter des questions liées au changement climatique, le modèle de culture prend en compte ce phénomène, non seulement via l'augmentation des températures moyennes, mais aussi

par l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique.

La limite supérieure³ du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol. STICS peut simuler le bilan d'eau, le bilan carbone et le bilan d'azote du système. Il permet de calculer à la fois les variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et les variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) dans différentes situations agricoles (Brisson & Mary, 2002).

Plusieurs modèles agronomiques ont été développés qui simulent le comportement du système sol-plante-atmosphère dans son environnement physique et technique (e.g. GOSSYM (Whisler et al., 1986), STICS (Brisson et al., 1998) et APSIM (McCown et al., 1996)).

Parmi ces modèles de culture notre choix porte sur le modèle STICS qui répond le mieux à notre objectif de modélisation, avec une approche similaire pour toutes les cultures par le lien entre rapport azote-rendement de plusieurs cultures sous différentes conditions relatives au climat et au sol. Les caractéristiques de STICS nous permettent d'intégrer diverses sources d'azote (engrais minéraux achetés, effluents d'élevage). Ce modèle est assez robuste pour fonctionner dans les différentes conditions liées au sol et au climat (pour traiter la question du changement climatique STICS est capable de prendre en compte ce phénomène à la fois par la hausse des températures moyennes et la concentration accrue de CO_2 atmosphérique).

2.2.1.3 Modèle d'un écosystème prairial (PaSim)

PaSim (PAsture SIMulation Model) est initialement développée par Riedo et al. (1998), est un modèle mécaniste biogéochimique de simulation d'un écosystème prairial géré (permanentes ou temporaires). Il a été paramétré sur une prairie typique de moyen montagne qui prend en compte une végétation "moyenne" composée d'un ensemble d'espèces sur une parcelle. Le principal objectif du modèle est de simuler, à l'échelle de la parcelle et de la demi-heure, le fonctionnement de la prairie. Il intègre les pratiques de gestion de la tonte du gazon, du pâturage, ainsi que l'application d'engrais et de lisier.

Ce modèle mécaniste de l'écosystème des prairies permet de simuler la production des prairies à l'échelle européenne, ainsi que le bilan de gaz à effet de serre (il prédit les

³Selon la présentation standard de STICS.

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

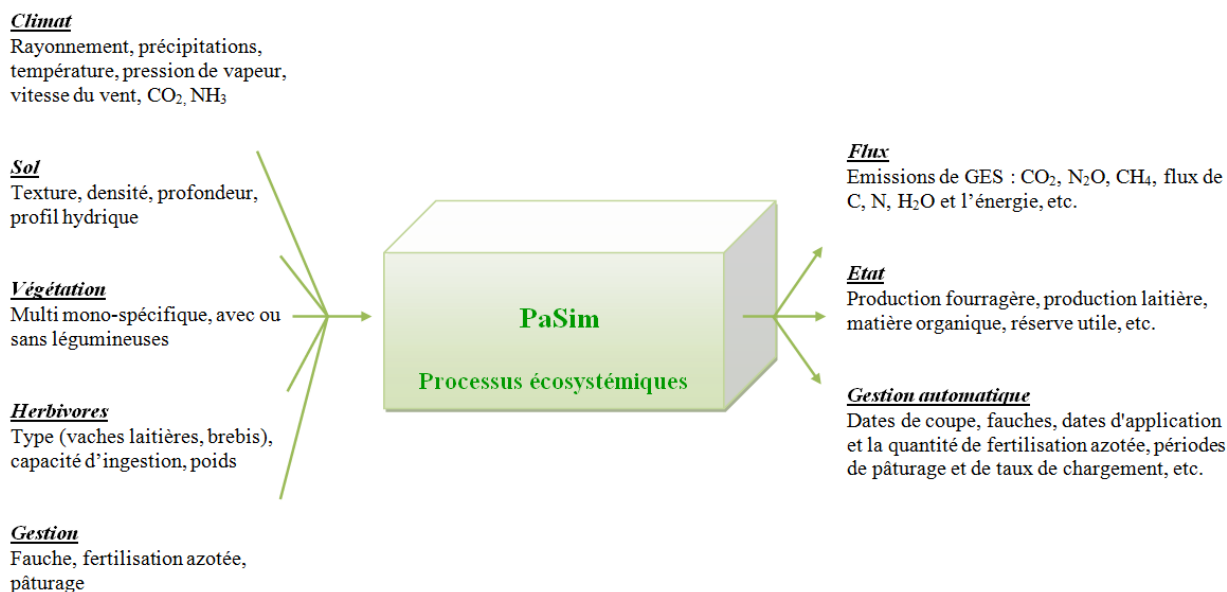


Figure 2.3: Schéma de la structure du modèle PaSiM, basé sur [Martin et al. \(2011\)](#).

flux de CO_2 , N_2O et CH_4). Le modèle est entièrement dynamique et peut être appliqué au système de pâturage pour différentes conditions de coupe. Les principales variables d'entrée permettant de faire fonctionner PaSiM sont le climat, le sol, la végétation, les herbivores (Figure 2.3). Les variables de sorties sont les flux de GES, la production des plantes et des animaux en relation avec le pâturage ainsi qu'en relation avec les conditions climatiques et les pratiques agricoles. Il simule les flux de carbone, d'azote, d'eau et d'énergie à l'interface entre le sol, la végétation, les animaux et l'atmosphère, ainsi que la productivité primaire nette de fourrage pour la consommation (au sens que les chercheurs de science du sol donnent) par les herbivores domestiques ([Riedo et al., 1998](#); [Vuichard et al., 2007](#); [Graux et al., 2011](#)). La végétation y est représentée à l'échelle de la communauté et a été initialement paramétrée pour une prairie permanente, composée de graminées et de légumineuses.

Les principales limites du modèle sont : (i) la représentation de la végétation, qui utilise une approche par compartiment et, en conséquence, le rôle fonctionnel important de la diversité n'est pas prise en compte ; (ii) le paramétrage lié à la température qui est désormais calculée automatiquement en début d'une nouvelle année et ne prend pas en compte les effets des événements extrêmes comme les sécheresses sévères et les fortes températures; (iii) concernant les animaux, le fait que PaSiM puisse seulement simuler un troupeau de vaches laitières en pâturage continu. Les vaches sont nourries exclusivement à l'herbe et le calcul de leurs performances reste simpliste et se limite au calcul de la production laitière.

A l'échelle du système fourrager, plusieurs modèles ont été identifiés (e.g. DNDC (Li, 2000), STICS (Brisson et al., 1998), SEBIEN (Jouven & Baumont, 2008) et PaSim (Riedo et al., 1998)), parmi les quelles nous avons choisi de travailler avec PaSim. Ce choix collectif à été fait dans le cadre du projet [Validate](#) (projet ANR-VMCS, 2008-2012, n° ANR- 07-VULN-11-011).

Contrairement aux autres modèles, PaSim permet de simuler le fonctionnement du couvert végétal en prenant en compte ces interactions avec le sol. Il optimise les surfaces en prairie fauchée et pâturée ainsi que le chargement animal. Il simule la production des prairies et ses flux associés de carbone, d'azote et de l'eau dans les pâturages productifs, qui correspond à notre objectif de sensibiliser le modèle économique AROPAj à la production fourragère dans le contexte de changement climatique.

2.2.1.4 Modèle économique en équilibre partiel (GLOBIOM)

Le modèle [GLOBIOM](#) (Global Biosphere Management) est un modèle économique global en équilibre partiel, développé à l'IIASA⁴ (Havlik et al., 2011). Les principales sources de données utilisées sont essentiellement issues des données de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il fournit une analyse de la politique sur les questions mondiales relatives à la concurrence de l'utilisation des terres entre les principaux secteurs de production en relation avec la terre.

Il couvre trois secteurs principaux de la biomasse : l'agriculture, la bioénergie et la sylviculture. La [Figure 2.4](#) représente les relations entre les produits ainsi que les options de changement d'utilisation des terres mises en œuvre dans le modèle. Il est possible de passer d'un mode d'utilisation des terres à un autre, cependant la superficie totale des terres couvrant toutes les catégories reste fixe.

La demande et le commerce international sont représentés au niveau de trente régions économiques agrégées à l'échelle mondiale (y compris cinq régions de l'UE). Ces secteurs sont, cependant, modélisés selon une comptabilité détaillée, représentant les cultures les plus importantes au niveau mondial, une gamme d'activités d'élevage, des produits forestiers ainsi que les différentes voies de transformation en énergie. Le modèle permet de simuler la concurrence pour les terres entre différentes utilisations provoquées par des facteurs exogènes comme les variations de prix et de la productivité.

⁴International Institute for Applied Systems Analysis

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

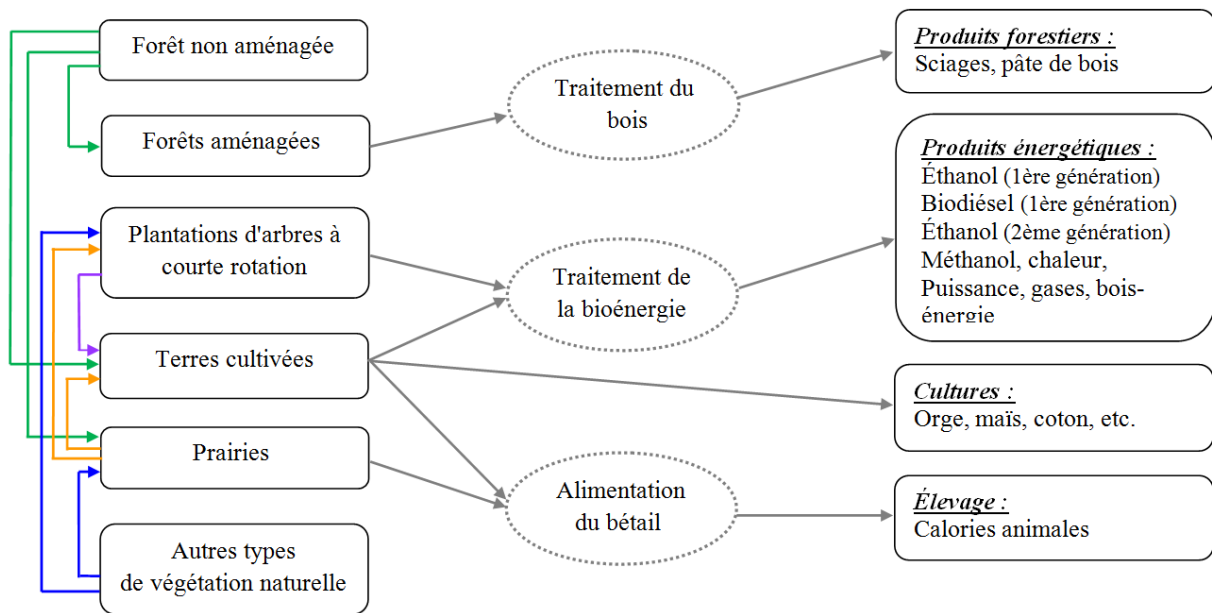


Figure 2.4: Structure de l'utilisation des terres et des produits du modèle GLOBIOM - extraite de [Havlik et al. \(2011\)](#).

Comme cela est présenté par [Seale et al. \(2003\)](#), les demandes de produits de base sont spécifiées par des fonctions croissantes à élasticité constante, en utilisant les données de FAOSTAT sur les prix, les quantités et les élasticités-prix. L'offre du modèle est basé sur une désagrégation détaillée des terres en regroupant les Unités de simulation (SimUs) de cinq minutes d'arc appartenant au même pays et ayant en commun, l'altitude, la pente et la classe de sol, contenues dans la même maille de trente minutes d'arc ([Skalsky et al., 2008](#)). La productivité de l'agriculture, de la sylviculture et des plantations à courte rotation est estimée conjointement avec les paramètres environnementaux connexes tels que les bilans de GES ou le lessivage de l'azote au niveau des SimUs. GLOBIOM représente dix-huit grandes cultures gérées selon quatre systèmes de gestion différents (irriguée, forte et faible dépendance à la pluviométrie, subsistance) simulée par le modèle de culture EPIC⁵ (Environmental Policy Integrated Climate) ([Izaurre et al., 2006](#); [Williams, 1995](#)). Les paramètres de la production primaire des forêts y compris de l'approvisionnement annuel à moyen terme, la part maximale de bois à scier dans la biomasse récoltée et les coûts d'exploitation sont fournis par le modèle G4M⁶ ([Kindermann et al., 2006](#)).

Le modèle représente six types d'utilisation des terres : terres cultivées, prairies, plantation forestière à courte rotation, forêts gérées, forêts naturelles et autre terrain na-

⁵EPIC est un modèle agro-environnementaux qui simule, à pas de temps journalier, les activités agricoles et ses interactions avec climat et l'environnement.

⁶G4M est un modèle à base d'agent géographiquement explicite qui estime l'impact des activités forestières (boisement, déforestation et la gestion forestière) sur la biomasse et des stocks de carbone.

turel. L'équilibre global des marchés agricoles et forestiers du modèle est calculé en choisissant l'utilisation des terres et les activités de transformation visant à maximiser la somme des surplus des producteurs et des consommateurs dans le respect de contraintes de ressources, de technologiques et de politiques. Les principaux déterminants du changement d'utilisation des terres du modèle GLOBIOM viennent des changements de la demande et de la rentabilité des différentes d'activités liées à l'exploitation des terres. L'article de [Havlik et al. \(2011\)](#) donne une description plus détaillée du modèle GLOBIOM.

Le choix d'un modèle économique de type équilibre partiel (EP) comme GLOBIOM porte sur ses avantages par rapport aux objectifs visés dans cette étude. Contrairement aux modèles d'équilibre général (EG), les modèles EP sont présentés comme des modèles simples et transparents qui sont centrés sur un seul secteur (dans cette étude le secteur agricole). Les modèles EP sont axés en terme de la spécification détaillée des politiques agricoles et ne prennent pas en compte les interactions entre les marchés. Dans les modèles de type EP, le changement technique est toujours supposé être mesuré par l'évolution des rendements. Le choix du modèle GLOBIOM a été fait dans le cadre du projet [AnimalChange](#) (projet européen FP7, 2007-2013, n° 266018).

GLOBIOM-EU

Une nouvelle version du modèle a été récemment élaboré au sein de l'IIASA, dénommée "GLOBIOM-EU", fondée sur les données plus détaillées au niveau européen (EU-27). Dans cette version, les cinq régions de l'UE dans GLOBIOM sont désagrégées par pays portant le nombre total de régions à cinquante-deux. Le concept de SimUs européen est proche de celle qui de la version globale, toutefois il diffère en plusieurs points : (i) l'unité spatiale de base de GLOBIOM-EU est 1×1 km résolution au lieu de 10×10 km dans la version GLOBIOM, la limite spatiale dans ce cas représentée par les régions NUTS2⁷ tandis que la grille de 50×50 km a été utilisée dans la version globale ; (ii) les autres déterminants de la simulation dans GLOBIOM-EU sont : la pente, l'altitude et le sol, comme dans la version globale, cependant dans GLOBIOM-EU le paramètre du sol est décomposé en trois dimensions : la texture du sol, la profondeur et la pierrosité ; (iii) la catégorie de couverture terrestre, la présence du matériel d'irrigation et des bassins fluviaux sont des dimensions supplémentaires des SimUs européennes ; (iv) les informations

⁷Nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS), est un système hiérarchique de découpage du territoire économique de l'UE : <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts-nomenclature/introduction>

sur l'occupation du sol dans GLOBIOM-EU sont basées sur la carte de la couverture terrestre de CORINE/PELCOM⁸ au lieu de GLC-2000⁹ dans la version globale.

Dans le secteur des cultures, de nouvelles simulations réalisées avec le modèle EPIC ont été mises en œuvre pour l'UE-27, avec représentation détaillée des systèmes de gestion (trois systèmes de labour -travail conventionnel, travail réduit et travail minimum du sol- et deux systèmes d'irrigation et d'engrais), la rotation des cultures et les nouvelles cultures (par rapport à la version internationale) ont été mises en œuvre dans cette version. La rotation des cultures est calculée à partir des statistiques régionales d'Eurostat sur les zones de cultures. La rotation optimale des cultures est calculée à partir des parts de culture au niveau NUTS2. Pour cela, le modèle de rotation des cultures CropRota (Schonhart et al., 2011) a été utilisé en prenant en compte les données sur les parts de cultures, ainsi que les hypothèses concernant les décisions de plantation des cultures et les contraintes agronomiques. Par ailleurs, les nouvelles cultures ont été incorporés dans GLOBIOM-UE (blé tendre et blé dur -représentés précédemment par un blé dans GLOBIOM-, le seigle, l'avoine, la betterave à sucre, le pois, le maïs-ensilage, les autres fourrages verts, les jachères et le lin).

2.2.2 Couplages des modèles : base solide pour étudier le système agricole

2.2.2.1 AROPAj-STICS : mise en œuvre d'une dimension agronomique dans le modèle économique

L'un des éléments méthodologiques de la thèse repose sur une approche bio-économique, qui est basée sur le couplage du modèle de d'offre agricole d'AROPAJ avec le modèle de croissance des cultures STICS. Cette méthode, développée par Godard (2005), permet de tenir compte de l'influence des paramètres agronomiques sur l'offre agricole. Ainsi, le modèle agro-économique utilise les fonctions de production traitant le rapport azote-rendement (sous une forme exponentielle) chez chacun des groupes type d'exploitation des différentes régions de l'UE-15. Avec l'utilisation du modèle STICS, la détermination de ces fonctions requiert des données supplémentaires concernant le sol, le climat et l'itinéraire technique (voir le Tableau 2.2).

⁸The Pan-European Land Use and Land Cover Monitoring (PELCOM) : <http://www.geoinformatie.nl/projects/pelcom/public/index.htm>

⁹Global Land Cover 2000 Project : <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>

Entree du modèle STICS	Mode de définition
Climat	Trois scénarios climatiques (SRES) : CTL, A2H2 et B1H2
Sol	Cinq types de sol
Itinéraire technique	Deux combinaisons possibles : soit trois dates de semis et une variété, soit une date de semis et trois variétés
Précédent	Blé ou pois
Irrigation	Selon les cultures : cas irrigué ou non irrigué
Type d'engrais	Engrais organiques et engrais de synthèse

Table 2.2: Modalités des entrées du modèle STICS utilisées pour la caractérisation des fonctions de réponse "azote - rendement" STICS.

Les données climatiques sont calculées par le projet MARS et le modèle climatique régional de RCA3¹⁰ (Samuelsson et al., 2011), forcées par des simulations du modèle de circulation générale atmosphérique ECHAM5 (modèle du Max-Planck Institute). Le scénario de référence ("CTL") comprend un ensemble de trente années entre 1976 et 2005 avec un niveau de 352 ppm (parties par million) de concentration de CO_2 . Les deux scénarios du futur lointain se basent sur la période de 2070 à 2100, avec une série de données climatiques sous l'hypothèse de concentration de CO_2 de respectivement 724 ppm et 533 ppm pour les scénarios "A2H2" et "B1H2" (Leclere, 2012). Comme le montre la Figure 2.6 (voir annexe), l'augmentation du taux de CO_2 en lien avec le changement climatique conduit à une augmentation de la température avec une baisse des précipitations. Des fortes hausses des température sont estimées pour l'Europe entière (dans les régions du nord de +1 à +3 °c et dans le sud de l'Europe entre +3 et +8 °c), combinées à des chutes de précipitation plus remarquables dans les régions sud de l'Europe (de 10 à 50 mm au centre et de 25 à 75 mm au sud). Cela s'accompagnerait de sécheresses -principalement dans les régions du sud-, et affecterait les rendements agricoles. Ces effets sont encore plus significatifs dans le scénario A2H2 dont la concentration de CO_2 est plus élevée.

Les données sur la date de semis et la variété proviennent de la base de données phénologiques du projet MARS¹¹ ainsi que les connaissances d'experts : pour le maïs et le tournesol, dont les variétés sont supposées être très variables en ce qui concerne la précocité : 3 variétés et 1 date de semis moyennes ont été attribuées à chaque type d'exploitation agricole, et pour les autres cultures (blé, colza, orge, pomme de terre et betterave à sucre), 1 seul cultivar (le plus courant dans la région) et 3 dates de semis ont été sélectionnés.

¹⁰RCA3 a été développé à l'Organisation Météorologique et Hydrologique Suédoise, il fournit des données de température de la surface, les précipitations, le vent, les conditions de neige, la pression moyenne au niveau des mers et des nuages.

¹¹"Monitoring Agriculture with Remote Sensing" du Joint Research Center (JRC) d'Ispira.

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

Cinq types de sol les plus représentatifs des régions administratives du RICA sont sélectionnés dans la base de données géographiques des sols européens et Corine Land Cover 2000 (Godard, 2005; Leclere, 2012).

Deux variétés du précédent cultural sont considérées, avec pour effet soit bénéficier au sol si cette culture fixe l'azote (les légumineuses comme le pois), soit d'être dommageables pour le sol si la culture est riche en carbone (les céréales comme le blé). Concernant les engrais, deux types sont considérés : engrais de synthèse (la quantité totale utilisée pour chaque culture est renseignée à partir de connaissances d'experts), et engrais organiques (les quantités et les types évalués à partir des effectifs des différentes catégories animales de chaque groupe-type d'AROPAj basées sur les données du RICA). Enfin, les données sur l'irrigation sont disponibles selon les cultures (irriguées et non irriguées), provenant du RICA et sur la base de connaissances d'experts.

STICS est ensuite exécuté en utilisant les différentes combinaisons de tous ces paramètres, pour produire 30 ou 60 courbes "*N*-rendement", pour chaque culture de chaque groupe-type d'AROPAj. Un rendement pour chaque dose d'azote est fourni par le modèle STICS. Par conséquent, afin de pouvoir tracer la courbe avec un nombre suffisant de points, 31 simulations de STICS ont été réalisées avec différentes quantités d'azote appliqué (de 0 à 600 kg par hectare avec un pas de 20kg). Ensuite pour chaque culture, une courbe de fonction de réponse été ajustée, sur la base de la forme exponentielle suivante :

$$r = B - (B - A) \cdot \exp^{-tN}$$

Dans cette équation, *r* est le rendement de la culture, *A* et *B* indiquent respectivement le rendement minimum et maximum de la culture, *t* est le taux d'accroissement et *N* est la quantité d'azote. Afin d'obtenir la courbe qui s'ajuste le mieux aux critères économiques du modèle AROPAj, les 30 (ou 60) sont comparées avec le rendement de référence (*r*₀) issu de l'estimation du modèle AROPAj, les courbes qui sont au-dessous de ce rendement sont éliminées. Les autres courbes sont testées par la condition marginale de l'utilisation d'azote :

$$\frac{dr(N)}{d(N)} = \frac{w}{p_j}$$

Avec $dr(N)/dN$, la productivité marginale (la pente de la fonction de rendement au point $r = r_0$), p_j le prix de la culture, et w le prix de l'azote. Le critère est la différence entre le

rapport de prix (azote/produit), et la tangente de la courbe au voisinage du rendement observé (estimé à partir du RICA). La courbe qui minimise cette différence est sélectionnée. Les fonctions dose-réponse ont été calculés pour les cultures de ventes dans la Version 2 d'AROPAj, couvrant 15 pays membres de l'Union Européenne. Elles sont utilisées pour sensibiliser le modèle à la vulnérabilité des systèmes agricoles dans le contexte des changements climatiques.

Ceci correspond au climat présent (CTL), pour lequel des observations de rendement sont disponibles. Afin de tenir compte des évolutions du rendement des cultures liées aux changements dans le climat, les rendements observés des cultures et les apports d'azote estimés à partir du RICA ont été remplacés les rendements simulées par le modèle AROPAj couplé avec le modèle STICS en utilisant les entrées spatialisées concernant les pratiques et les conditions météorologiques ([Leclere, 2012](#)).

2.2.2.2 AROPAj-PaSim : introduction des rendements des prairies et fourrages

La méthode de couplage d'AROPAJ-STICS, plus adaptée aux systèmes de culture de vente (céréales, oléo-protéagineux, etc.), est encore insuffisamment développée pour les prairies et plantes fourragères, en raison du manque d'information en termes de productivité. Afin d'obtenir un résultat fiable de la mesure des rendements des prairies et des fourrages, nous avons développé le couplage du modèle AROPAj avec le modèle de simulation de système prairial de PaSim, qui permet de mieux mesurer les rendement des prairies et les interactions entre le climat, le système de culture et plus généralement les productions destinées à l'alimentation animale. Cela permet, corollairement, d'éclairer la question de l'utilisation des terres dans un contexte élargi à une partie importantes des terres agricoles.

A cette fin, le modèle PaSim a été mobilisé (par l'équipe de l'INRA-UREP de Clermont-Ferrand) pour les prairies productives gérées de façon intensive, par exemple un mélange de ray-grass/ trèfle blanc et pour différents combinaisons d'entrée concernant le type de sol, le climat, niveau d'apports azoté. Les trois scénarios climatiques résultant du travail de [Leclere \(2012\)](#) ont été utilisés, avec la résolution spatiale de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Concernant les propriétés du sol, un sol moyen (avec la résolution spatiale de 0.25 degré) a été extrait de la base de données Harmonized World Soil Database pour chaque pixel. Il est caractérisé pour le type de texture du sol du USDA (United States Department of Agriculture), du pH et de la densité apparente de la couche arable et du sous-sol, basés sur les données harmonisées des sols du monde (1/120 degré).

Pour la gestion de l'azote, trois niveaux de gestion de l'azote fourni ont été générés en partie grâce au modèle CAPRI qui élabore à l'échelle de l'UE une cartographie des gestions à un niveau de résolution de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ avec trois niveaux d'"intensité" d'apports azoté minéral et organique : faible, moyen et élevé, variant de 0 à 0.35 t N/ha. Les modes de gestion combinent fertilisation sont indissociable en l'état ([Tableau 5.1](#)).

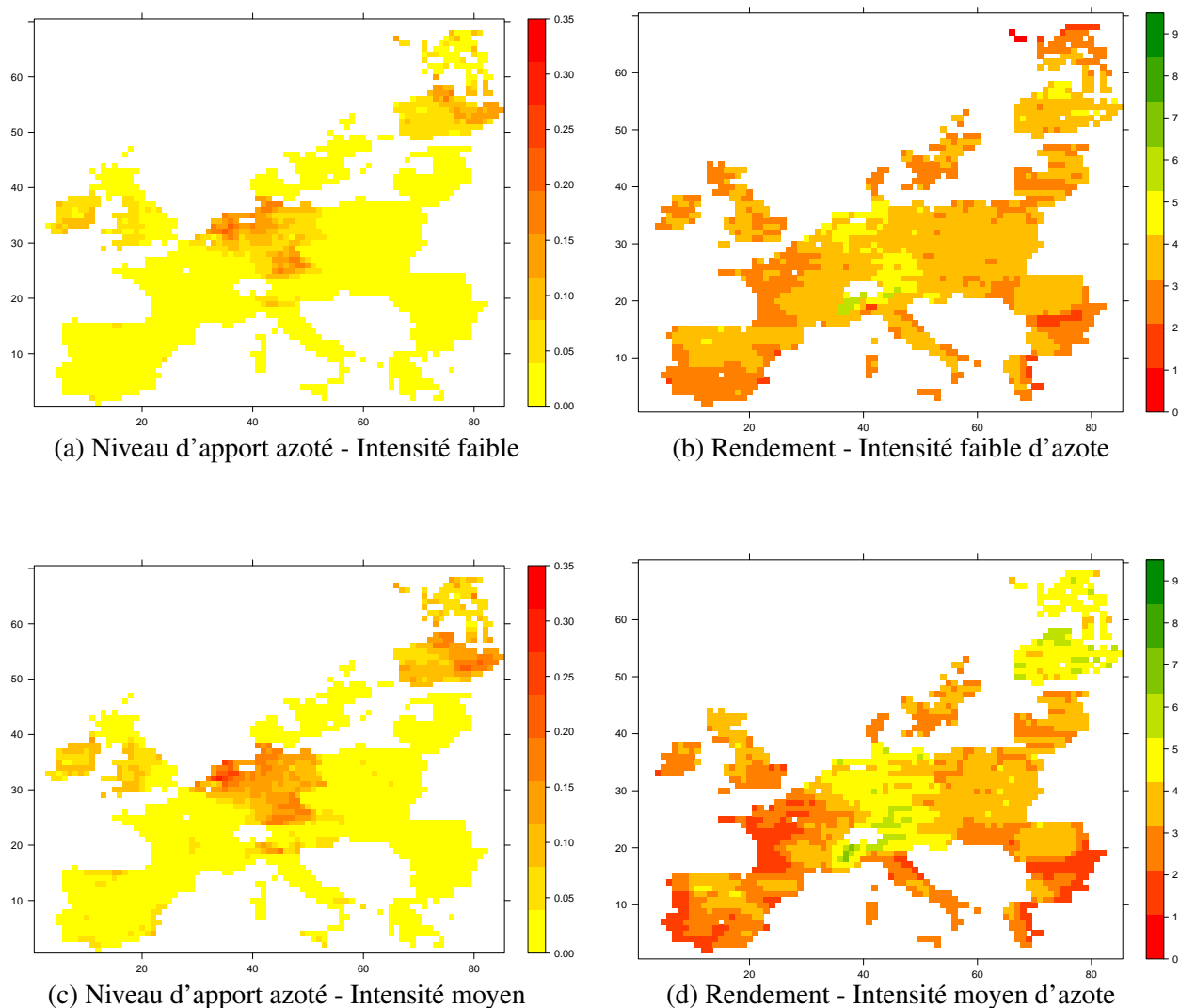
Entrées du modèle PaSim	Mode de définition
Type de prairies	Permanententes ou temporaires, mélange de ray-grass/ trèfle blanc
Données de climat	Trois scénarios climatiques : CTL, A2H2 et B1H2
Données de sol	Basées sur les données du projet CARBO-Extreme
Niveau et type d'apport azoté	Trois niveaux d'apports azotés : faible, moyen, élevé, et deux sources d'azote : minéral et organique

Table 2.3: Modalités des entrées de PaSim.

Les [Figures 2.5](#) montrent le niveau d'apport azoté à l'échelle européenne pour les deux

scénarios du future lointain. La quantité d'azote épandu varie de 0 à 0.10 t N/ha pour la plupart des pays de l'Union européenne, à l'exception de l'Allemagne, l'Espagne, l'Irlande, le Royaume-Uni ainsi que pour les régions du centre-est français avec une variation moyenne d'apport azoté de 0.10 à 0.30 t N/ha.

Le modèle PaSim fournit le rendement des prairies pour chaque pixel à l'échelle de l'Union européenne et pour trois niveaux d'intensité azotée. Les rendements de PaSim sont exprimés en matière sèche, alors que ceux d'AROPAj sont estimés en matière brute. Les rendements de Pasim génèrent un nuage de points, sur lequel une courbe de réponse d'azote-rendement a été ajustée pour chaque culture et chaque région de l'UE. Les fonctions dose-réponse d'azote-rendement du modèle PASIM remplacent les rendements préalablement calibrés dans le modèle AROPAj pour cinq types de cultures fourragères : la betterave fourragère, le maïs fourrager, les prairies permanentes, les prairies temporaires et les autres prairies (Figures 2.5).



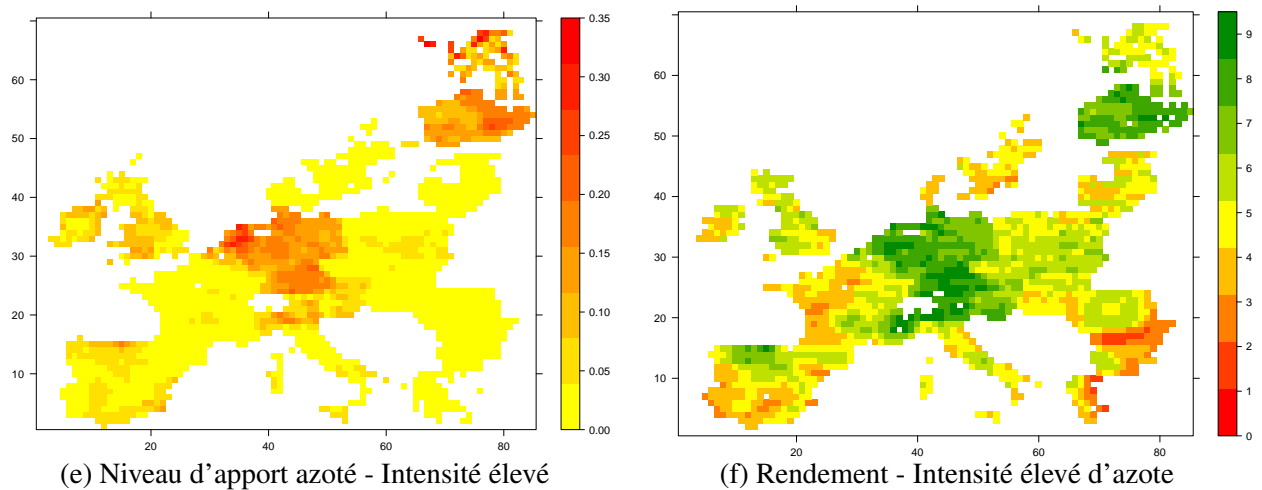


Figure 2.5: Rendement des prairies (t matière brute/ha) du scénarios A2H2 (à droite) selon trois niveaux d'apports azotés (t N/ha) en Europe pour les scénarios du future lointain à l'horizon 2100.

Comme indiqué précédemment, le modèle AROPAj (version V2 pour l'UE-15) couvre 101 régions RICA et un grand nombre d'exploitations agricoles (groupes-type), en vue de les tenir compte, tous les groupes-types dans chaque région ont été identifié. Pour chacun des 1074 groupes type et pour chaque plante fourragère, une courbe de réponse d'azote-rendement a été ajustée. Les courbes de réponse du rendement à l'azote des trois régions françaises -les plus riches en prairies (Agrest, 2013)- selon les deux scénarios climatiques A2H2 et B1H2, sont présentées dans la Figure 2.7 (voir annexe). Ces données ont été ensuite utilisées dans le modèle AROPAj pour étudier la sensibilité des productions des prairies et fourrages associées aux systèmes d'élevage à son environnement physique.

Le processus de calcul des prix fictifs en deux étapes itératif développé par Aghajanzadeh-Darzi et al. (2012) (cf. Chapitre 4), pour les cultures a été étendu pour les productions des prairies et des plantes fourragères. Ce processus a déjà été développé pour les produits qui sont entièrement consommés sur la ferme (typiquement le céréale totalement utilisé pour l'alimentation animal sur la ferme). Dans ce cas, la solution optimale conduit à remplacer le prix du marché par le prix fictif dans le calcul du rendement et de la quantité d'azote. Le modèle de programmation linéaire fournit ces prix fictifs, tandis que ces prix fictifs sont requis comme entrées pour le calcul du rendement et la quantité d'azote. La partie itérative du processus conduit à utiliser à chaque itération les prix fictifs calculé à l'itération précédente. Nous commençons ce processus itératif par les prix du marché (pour les cultures) et les valeurs zéro (lorsqu'il n'existe pas de prix de marché, comme dans le cas des prairies) à la place du prix fictifs. Ce travail a été brièvement présenté dans

les [Chapitres 4 et 5](#). Il s'agit de tenir compte de l'absence de prix de marché, alors que l'optimisation nécessite de passer par des prix (fictifs).

2.2.2.3 AROPAj-GLOBIOM : sensibilité à l'évolution socioéconomique

Le couplage d'AROPAj avec les modèles STICS et PaSim, exposé ci-dessus, rend AROPAj plus sensible aux éléments de contexte physique et climatique. AROPAj étant un modèle d'offre, les prix sont exogènes. La sensibilité au contexte économique implique de mobiliser les prix d'équilibre de marché résultant de modèles d'équilibre partiel ou général. Nous avons réalisé un couplage d'un modèle d'équilibre partiel (GLOBIOM) avec le modèle AROPAj. Cela permettra de tester la sensibilité de nos résultats aux variations de prix, variations obtenues à l'aide de GLOBIOM dans un cadre cohérent intégrant produit intérieur brut, démographie, et d'autres déterminants économiques ([Tableau 2.4](#)).

			SSP1	SSP3
Crop sector	EU-24	Price	1.55	1.47
		Productivity	1.31	1.23
	ROW	Price	1.01	1.19
		Productivity	1.55	1.47
Livestock sector	EU-24	Price	0.99	0.98
		Productivity	1.02	0.96
	ROW	Price	0.98	1.09
		Productivity	1.28	1.25
Macroeconomic drivers	EU-24	Population	1.10	0.86
		GDPpCAP	2.11	1.74
	ROW	Population	1.41	1.75
		GDPpCAP	4.85	2.84

Table 2.4: Population, GDP (gross domestic product per capita), price and productivity increases in 2050 compared to 2000 in GLOBIOM-EU in different scenarios.

Le couplage AROPAj-GLOBIOM repose sur l'introduction, dans le modèle AROPAj, de l'évolution des prix et des rendements des cultures calculés par GLOBIOM. A cette fin, GLOBIOM a été mobilisé (par l'équipe de l'IIASA) avec différents jeux de données concernant les scénarios socio-économiques et les données économiques (PIB, cultures, élevage, etc.) pour l'année de référence (2000), ainsi que pour les scénarios du futur de moyen terme (2010-2050) présentés dans le [Tableau 2.5](#).

Les cinq séries de scénarios socio-économiques de l'IPCC (AR5) a été développées par

2.2. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE

Entrées du modèle GLOBIOM	Mode de définition
Scénario socioéconomique	Deux scénarios de l'IPCC : SSP1 et SSP3
Productivités des cultures	Estimés en utilisant une analyse économétrique
Données techniques	Productivités des cultures ont été estimées en utilisant économétrique
Données de l'élevage	L'augmentation de l'efficacité pour cinq produits de l'élevage, basés sur Bouwman et al. (2005) en dehors de l'Europe et sur CAPRI pour l'UE

Table 2.5: Modalités des entrées de GLOBIOM

la modélisation d'évaluation intégrée (IAM), ainsi que par une modélisation de type "Impacts, Adaptation and Vulnerability (IAV)". Ces cinq scénarios d'évolution socio-économique (Shared Socio-Economic Pathways-SSP), couvrent une large gamme de situations futures possibles qui répartissent selon deux axes représentant la capacité d'adaptation des sociétés au changement climatique ainsi que leur capacité à atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Ils prennent également en compte les informations quantitatives sur la population et le produit intérieur brut (PIB) sur des trajectoires allant jusqu'à l'horizon 2100 au niveau nationale. On tient compte également des informations semi-quantitatives concernant les différences relatives entre les scénarios fournissent pour une large série de paramètres allant de l'éducation à l'intensité énergétique de l'économie.

Deux scénarios socio-économiques contrastés : "SSP1" et "SSP3" ont été utilisés en tenant compte des informations quantitatives et semi-quantitatives concernant le PIB, la population et le progrès technologique. Le scénarios SSP1 est caractérisé par une croissance relativement rapide du PIB, un faible taux de croissance de la population et des évolutions technologiques rapides, et le scénario SSP3 est marqué par une faible croissance du PIB, une croissance démographique relativement rapide et un progrès technologique lente. En restant dans le cadre de la politique agricole actuelle, nous nous concentrons sur l'analyse à moyen terme allant jusqu'à 2050. Les données sur le PIB et la population étaient donc disponibles directement à partir de la base de données des scénarios SSP. La productivité des cultures a été estimée en utilisant des analyses économétriques. L'évolution des rendements des cultures en relation avec l'évolution du produit intérieur brut par habitant ont été estimés pour 18 cultures¹². La réponse au PIB par habitant dans GLOBIOM a été différenciée en quatre groupes de revenus selon le système de classification des revenus de la Banque mondiale (inférieurs à 1.500, de 1.500 à 4.000, de 4.000 à 10.000, et supérieurs à 10.000 USD PIB par habitant). Les données sur les rendements des cultures au niveau

¹²blé, orge, riz, maïs, betteraves, coton, colza, tournesol, soja, pommes de terre, sorgho, arachide, pois chiches, Manioc, haricots secs, patate douces, Millet, Palmiers à huile

des pays ont été fournies à partir de FAOSTAT alors que le PIB par habitant a été basé sur les données de la Banque mondiale (1980-2009). En ce qui concerne le secteur de l'élevage, l'augmentation de rendement de cinq produits de l'élevage (ruminants, porcs, viande de volaille, lait et œufs) est basé sur [Bouwman et al. \(2005\)](#) en dehors de l'Europe et sur le modèle CAPRI au sein de l'Union européenne.

Annexe A: Répartition des précipitations annuelles et la température dans les différents scénarios climatiques de SRES

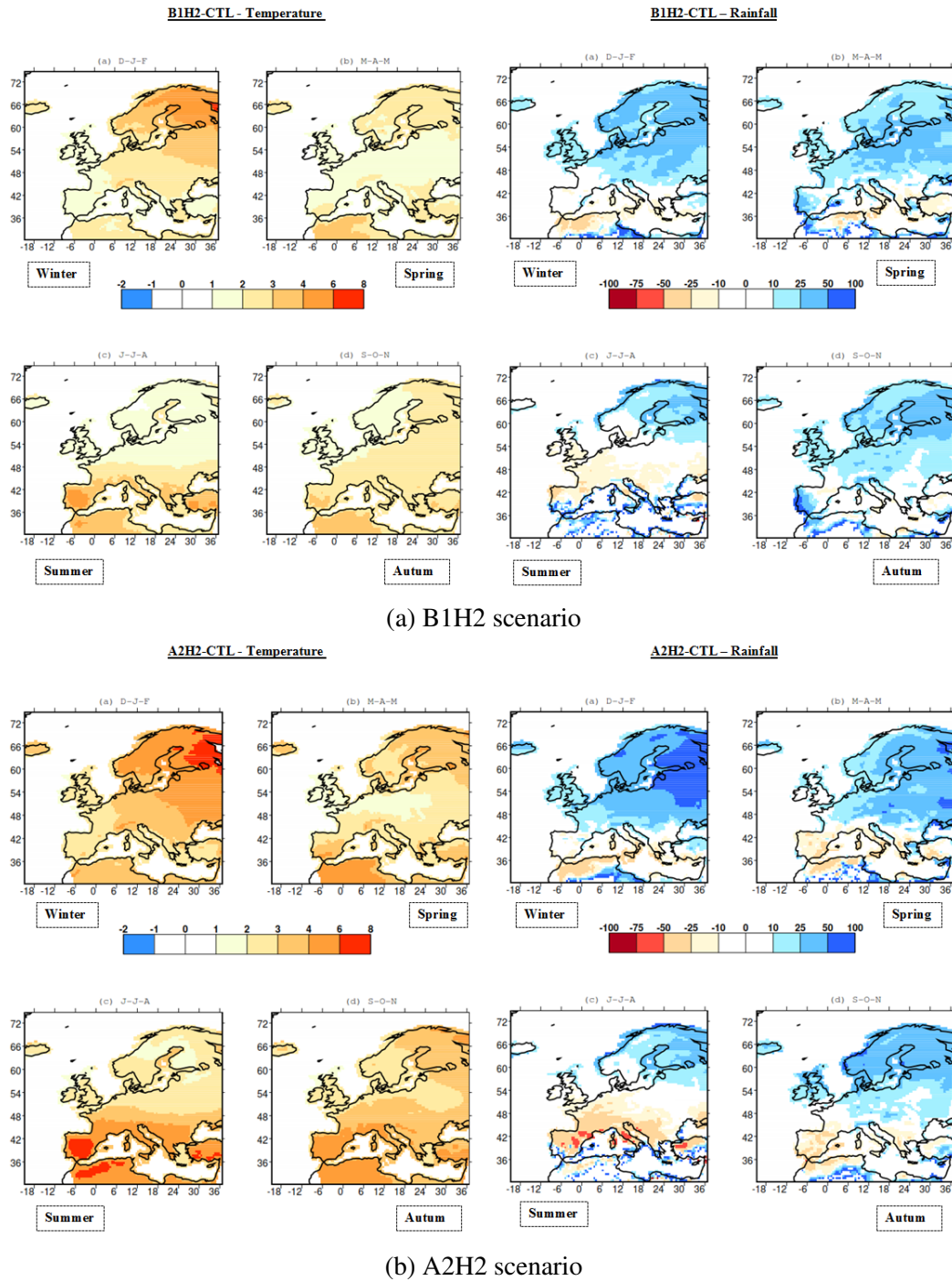


Figure 2.6: Variations des températures ($^{\circ}$ C) et des précipitations (mm) dans les scénarios du futur comparés au scénario de référence (CTL), [Figure extraite de [Leclere \(2012\)](#)].

Annexe B: Analyse de sensibilité des rendements des prairies en rapport avec trois niveaux d'apport azoté

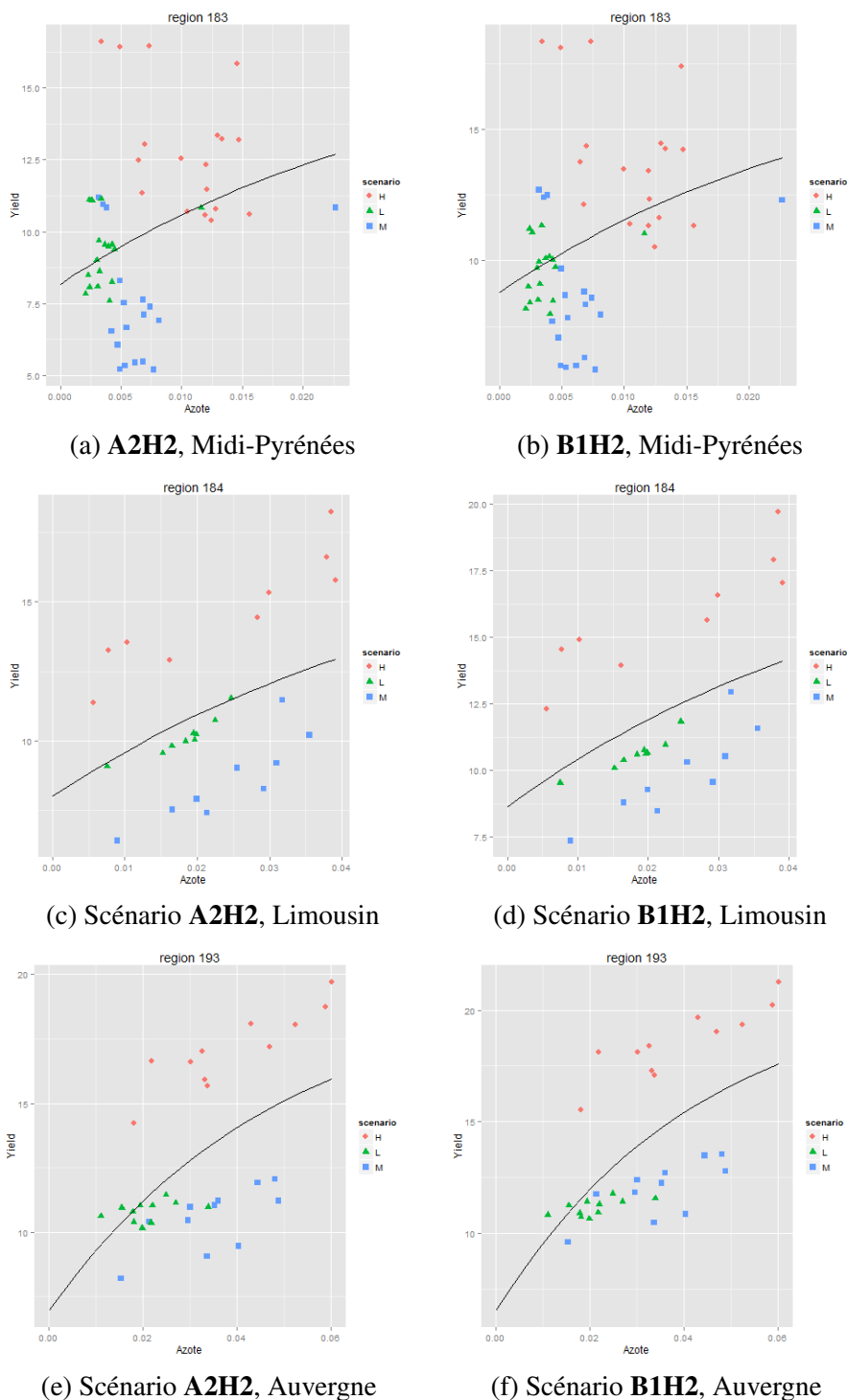


Figure 2.7: Résultats de l'analyse de sensibilité des rendements du maïs fourrager à l'apport azoté dans trois régions françaises pour les deux scénarios climatiques A2H2 (à gauche) et B1H2 (à droite), sur la période 2070-2100.

Bibliography

- Aghajanzadeh-Darzi, P., Jayet, P.-A., & Petsakos, A. (2012). Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on-farm source inputs and outputs. 28th ICAE - International Conference of Agricultural Economists, Foz do Iguacu, Brazil.
- Agrest (2013). *Les cultures fourragères et les prairies dans les moyennes et grandes exploitations*. Technical report, Agreste.
- Bouwman, A., Van Der Hoek, K., Eickhout, B., & Soenario, I. (2005). Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, 84, 121–153.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., B., M., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.-M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., & Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309–332.
- Brisson, N. & Mary, B. (2002). *STICS versions 5.0 Notice concepts et formalismes*. Technical report, INRA.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antoinoletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J., Meynard, J.-M., & Delecolle, R. (2008). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Up date Sciences and technologies.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antoinoletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., & Delecolle, R. (1998). Stics: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. i. theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311–346.

- Britz, W. & Witzke, H.-P. (2008). *CAPRI model documentation 2008 : Version 2*. Technical report, .
- Cantelaube, P., Jayet, P.-A., Carré, F., Zakharov, P., & Bamps, C. (2012). Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level. *Land Use Policy*, 29, 35–44.
- Godard, C. (2005). *Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle Européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique*. PhD thesis, ABIES.
- 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.
- Graux, A.-I., Gaurut, M., Agabriel, J., Baumont, R., Delagarde, R., Delaby, L., & Sousana, J.-F. (2011). Development of the pasture simulation model for assessing livestock production under climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 69–91.
- Havlik, P., Schneider, U.-A., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalsky, R., Aoki, K., De Cara, S., 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.
- Houghton, J., Meira Filho, L., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D., & Callender, B. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Izaurrealde, R.-C., Williams, J.-R., McGill, W.-B., Rosenberg, N.-J., & Quiroga Jakas, M.-C. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC : Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192, 362–384.
- Jarrige, R. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Technical report, INRA.
- Jayet, P. & Labonne, J. (2005). Impact d'une réforme de la politique agricole commune par le découplage. *Economie et Prévision*, 167, 156.
- Júdez, L., de Andrés, R., Ibáñez, M., de Miguel, J.-M., Miguel, J.-L., & Urzainqui, E. (2008). *Impact of the CAP reform on the Spanish agricultural sector*, chapter 11, (pp. 151–161). Ashgate Publishing Limited.

- Jouven, M. & Baumont, R. (2008). Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. *Agricultural systems*, 96, 260–272.
- Kindermann, G.-E., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., & I., M. (2006). Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices. *Carbon Balance and Management*, 1, 1–17.
- Leclere, D. (2012). *Offre agricole Européenne et changement climatique : une exploration régionale des enjeux liés aux changements d'échelle par la modélisation intégrée*. PhD thesis, ABIES.
- Li, C.-S. (2000). Modelling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58, 259–276.
- Martin, R., Gaurut, M., Lardy, R., Carrère, P., Graux, A.-I., Drouet, J., Fiorelli, J.-L., Blanfort, V., Capitaine, M., Duret, S., Gabrielle, B., Cellier, P., & Soussana, J.-F. (2011). Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique. *Innovations Agronomiques*, 12, 97–108.
- McCown, R.-L., Hammer, G.-L., Hargreaves, J.-N.-G., Holzworth, D.-P., & Freebairn, D.-M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50, 255–271.
- Osterburg, B., Offermann, F., & Kleinhans, W. (2001). *A Sector Consistent Farm Group Model for German Agriculture*, chapter IV, (pp. 152–159). Agricultural sector modelling and policy information systems : proceedings of the 65th European seminar of the European Association of Agricultural Economists (EAAE).
- Riedo, M., Grub, A., Rosset, M., & Fuhrer, J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105, 141–183.
- Samuelsson, P., Jones, C.-G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, C. Kjellstrom, G., Nikulin, G., & Wyser, K. (2011). The rossby centre regional climate model RCA3: model description and performance. *Tellus*, 63, 4–23.
- Schonhart, M., Schmid, E., & Schneider, U.-A. (2011). Croprota - a crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy*, 34, 263–277.
- Seale, J., Regmi, A., & Bernstein, J. (2003). *International Evidence on Food Consumption Patterns*. Technical report, ERS-USDA.

BIBLIOGRAPHY

- Skalsky, R., Tarasovicova, Z., Balkovic, J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G., & Scholtz, P. (2008). *GEO-BENE global database for bio-physical modeling v. 1.0 - concepts, methodologies and data*. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria.
- Vuichard, N., Soussana, J.-F., Ciais, F., Viogy, N., Ammann, C., Calanca, P., Clifton-Brown, J., Fyhrer, J., Jones, M., & Martin, C. (2007). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 1. model evaluation from in situ measurements. *Global Biogeochemical Sysles*, 21, GB1004.
- Whisler, F.-D., Acock, B., Baker, D.-N., Fye, R.-E., Hodges, H.-F., Lambert, J.-R., H.-E., L., McKinion, J.-M., & Reddy, V.-R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40, .
- Williams, J.-R. (1995). *The EPIC Model*. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.

Chapter 3 :

Changement climatique et alimentation animale

Ce chapitre est consacré à simulation des effets économiques du changement climatique sur les système de “prairies-élevage” européen. Cette étude répond à l’objectif du projet VALIDATE qui porte sur la Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux évènements extrêmes. Ici, nous ne nous intéressons qu’au changement climatique et ne prenons pas en compte les évènements extrêmes.

BIBLIOGRAPHY

Chapter 3

Impact économique du changement climatique sur l'alimentation animale et l'élevage dans l'Union Européenne

Aghajanzadeh-Darzi, P.^{a,b,*}, Jayet, P.A.^{a,*}

^a. INRA, UMR 210 Economie Publique INRA-AgroParisTech, 78850 Grignon, France

^b. ADEME, French Environment and Energy Management Agency, 49004 Angers, France

Ce travail a été publié dans la revue de l'association française pour la production fourragère (AFPF) N° 215, en mars 2013, qui porte sur "Changement climatique, prairies et systèmes fourragers".

Résumé

Avec le changement climatique, il est admis que les variations de température et de précipitations sont susceptibles d'affecter significativement les systèmes naturels tout autant que les systèmes de production de l'agriculture et de l'élevage. L'objectif de cet article est d'illustrer l'évaluation des impacts du changement climatique sur les productions végétales et de ses interactions avec les productions animales, en particulier *via* les changements d'utilisation des sols agricoles et l'alimentation animale. Une évaluation des émissions directes de gaz à effet de serre affectées par les changements au sein des systèmes de production est réalisée. L'étude repose sur les résultats obtenus avec le couplage d'un modèle de culture (STICS) et d'un modèle agro-économique (AROPAj), sous différents scénarios climatiques résultant de simulations du climat à long terme (scénarios "A2H2" et "B1H2" de l'AR4¹ de l'IPCC). Les résultats obtenus montrent que l'adaptation des pratiques agricoles dans le futur lointain atténue voire renverse les effets négatifs que pourrait causer le changement climatique sur les systèmes de culture. Lorsque l'on généralise cette analyse aux prairies et aux cultures fourragères, les résultats apparaissent plus mitigés et les systèmes d'élevage pourraient moins bien résister et évoluer moins favorablement que les systèmes de culture si les prairies devaient subir une diminution significative de leur surface.

Mots-clés : Agriculture, Aspect économique, Changement climatique, Gaz à effet de serre, Politique agricole, Production agricole, Production céréalière, Production fourragère, Système d'exploitation

Abbreviations : ARn: Assessment Report (de l'IPCC, "n" étant l'indexation des différentes éditions); AROPAj: Modèle agro-économique; GES: Gaz à effet de serre; IIASA: Institut International pour l'Analyse des Systèmes Appliqués; IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (acronyme français: GIEC); RICA: Réseau d'Information Comptable Agricole; UE: Union Européenne; SRES : Special Report on Emissions Scenarios.

3.1 Introduction

L'accroissement de la population humaine et de la solvabilité d'un plus grand nombre de consommateurs exerce une pression croissante sur les marchés alimentaires, y compris ceux de la viande et des produits de l'élevage. Il est par conséquent essentiel de travailler sur les facteurs susceptibles d'influencer la production. Le changement climatique est l'un des éléments qui devraient conjointement avoir un impact significatif sur les systèmes alimentaires, la vulnérabilité de

¹Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC destiné à évaluer les informations scientifiques, techniques et socio-économiques concernant le changement climatique, ses effets, ainsi que des options pour l'adaptation et l'atténuation.

l'agriculture et la sécurité alimentaire dans le monde (Fischer et al., 2002). L'agriculture connaît particulièrement ces effets depuis les années 1980, lorsque les premiers signes de la perturbation des équilibres naturels et environnementaux sont été enregistrés. La relation entre l'élevage et le changement climatique est soumise à un processus complexe. L'élevage contribue aux changements climatiques; il est dans le même temps affecté par ces changements, avec des conséquences négatives sur la santé des animaux, sur la production économique qui leur est associée, ainsi que sur la qualité et la quantité des aliments tels que les fourrages et les céréales.

De nombreux travaux ont été réalisés pour étudier les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Topp Cairistiona & Doyle Christopher (1996) montrent qu'une augmentation de rendement annuel des graminées, sous haute température et niveau élevé d'émission de CO₂, conduit à une hausse de rendement laitier moyen par vache. A l'inverse, Hanson & Baker (1993) font état d'une baisse de la production animale, provoquée par l'augmentation de la température ambiante et la baisse de la qualité des plantes fourragères. Le changement du climat pourrait aussi influencer la répartition spatiale des espèces : selon l'étude de Bakkened et al. (2006), plus de 50% des espèces au nord de l'Europe seraient invasives et environ 25% dans le sud de l'Europe disparaîtraient sous l'effet du climat simulée pour 2100. Certaines études sont essentiellement structurées autour des effets des changements climatiques sur l'agriculture française. Moreau & Lorgeou (2007) montrent des effets divergents sur les systèmes fourragers français. Ils montrent que le changement climatique entraîne une possibilité de repousse de l'herbe en automne et peut aussi avoir des effets négatifs sur la croissance de l'herbe et le système d'élevage, effets négatifs générés par des périodes de sécheresse estivale plus intenses et plus durables. Soussana et al. (2002) estiment probable l'accroissement du rendement des prairies (+20%) dans le Massif central par un réchauffement global modeste (+2%). Ceci contraste avec le travail de Ruget et al. (2012), reposant sur une double approche combinant simulations et expérimentation, qui montre une légère baisse de la production fourragère dans l'ensemble des régions de France.

L'étude proposée ici combine la modélisation agro-économique (AROPAj) déjà utilisée pour l'étude des relations entre agriculture européenne et climat (voir par exemple Leclere et al. (2013)) et une approche économétrique très simple mobilisant des résultats en cours d'élaboration à l'IIASA (Aghajanzadeh-Darzi et al., 2013; AnimalChange-FP7, 2012). L'approche économétrique utilise ces résultats comme des pseudo-données permettant d'associer changement climatique et productions fourragères. Ceci permet d'étendre à ces productions les facteurs d'impact du climat que la modélisation (AROPAj et STICS) avait permis de déterminer pour les principales cultures de vente (Leclere et al., 2013).

La suite de l'article est développée en trois sections. Dans un premier temps, nous présentons les modèles utilisés et la méthodologie d'ensemble. Puis, nous interprétons les résultats et, enfin, nous concluons.

3.2 Méthodologie et présentation des modèles

Ce travail repose sur la méthode de couplage entre le modèle économique de l'offre agricole (AROPAj) et le modèle de croissance de culture (STICS) développée et utilisée dans différents articles ([Godard et al., 2008](#)). L'attention est portée sur le fait que le changement climatique affecte simultanément les productions animales et les productions végétales qui, à l'échelle de l'exploitation agricole, sont en interaction par l'alimentation animale et par la production d'amendements organiques (riches en azote). Les productions de céréales à paille sont particulièrement bien représentées dans le modèle agro-économique AROPAj (blé tendre, blé dur, orges, maïs grain, avoine, seigle, autres céréales) et le modèle STICS a été utilisé pour les principales d'entre elles (blé tendre, maïs, orges).

Par ailleurs, le modèle prend explicitement en compte le fait que ces productions céréalières peuvent être collectées et vendues ou utilisées sur la ferme pour l'alimentation animale. Dans le modèle, la situation des prairies et fourrages est à la fois plus simple (la production est entièrement consommée à la ferme) et plus complexe (le modèle STICS est moins développé sur ces productions, et l'ajustement AROPAj-STICS est compliqué par le fait que nous ne disposons pas de "prix")².

Dans notre étude, nous ajoutons les productions fourragères comme productions explicitement sensibles au climat. Ce qui en soi et en principe n'est pas nouveau, mais le devient dans la modélisation qualitative malgré le fait que nous ne disposons pas de l'évaluation des facteurs d'impacts du climat sur les productions fourragères, à l'image de ce qui avait été réalisé précédemment avec AROPAj pour les productions de grande culture. L'idée est ici d'utiliser les évaluations faites à l'IIASA dans le cadre du programme FP7 AnimalChange ([Aghajanzadeh-Darzi et al., 2013](#)) en matière d'impact du climat sur les rendements des différentes productions, fourrages compris. Même si ces évaluations ont été réalisées à l'échelle d'un pays membre de l'UE, alors que les agents économiques à la base du modèle AROPAj sont les "exploitations types" définies à l'échelle régionale, elles ont le mérite d'offrir la possibilité d'une évaluation de l'impact du climat sur les rendements fourragers. Ceci permet donc d'améliorer la sensibilité du modèle agro-économique à différents scénarios de changement de politique agricole et de changement climatique.

²Le couplage AROPAj-STICS, permet d'élaborer un ensemble de fonctions "dose-réponse" associant l'apport d'azote et le rendement des cultures. La méthode de sélection de ces fonctions, développée par [Godard et al. \(2008\)](#), repose en particulier sur la connaissance des rapports de prix du produit (de la culture) et du facteur (le fertilisant azoté).

3.2.1 Modèle économique de l'offre agricole (AROPAj)

Développé par l'INRA, AROPAj est un modèle de programmation linéaire annuel qui simule l'offre agricole de l'Union Européenne à une échelle infrarégionale ("exploitations agricoles types") en fonction de différents paramètres décrivant le contexte économique (De Cara & Jayet, 1999, 2000, 2011; Cantelaube et al., 2012; Galko & Jayet, 2011). AROPAj calcule les choix individuels effectués par les agents (*i.e.* les exploitations types) en termes d'allocation des surfaces, de production animale, de collecte végétale et d'intra d'autoconsommation. Il optimise la marge brute des agriculteurs en fonction des prix des produits, des taxes, des aides directes et du coût des intrants. Dans la mise en œuvre d'AROPAj, il est important de noter que la superficie agricole utilisée par chaque exploitation est constante (le changement de la surface agricole utile -SAU- est exogène) et les éleveurs ont la possibilité de modifier leur capital animal dans un intervalle choisi (on opte le plus souvent pour l'intervalle $\pm 15\%$ du capital animal initial).

Le premier objectif du modèle AROPAj a été d'évaluer les impacts de la Politique Agricole Commune (PAC) (Galko & Jayet, 2011). Il a par la suite été utilisé pour traiter des problèmes agroenvironnementaux, en particulier pour étudier les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole, ainsi que pour évaluer les coûts de réduction des GES dans les régions de l'UE (De Cara et al., 2005; De Cara & Jayet, 2011). Les paramètres du modèle sont obtenus principalement par estimation à partir des données du RICA européen. La typologie en "groupes types d'exploitations" est réalisée par classification automatique à partir de l'échantillon des exploitations agricoles du RICA principalement orientées sur les cultures annuelles et l'élevage, et à partir des trois critères que sont (i) les catégories "OTEx"³, (ii) l'altitude et (iii) la dimension économique. Nous utilisons la version V2 du modèle AROPAj fondée sur les données du RICA 2002, couvrant 101 régions RICA de l'UE-15, y compris la France avec 22 régions.

3.2.2 Variation du rendement des prairies et fourrages

Le couplage AROPAj-STICS adapté aux systèmes de culture de vente (céréales, oléoprotéagineux, betterave, pomme de terre) n'a pas encore été développé pour les prairies. Pour intégrer les variations de rendement des prairies en rapport avec le changement climatique, nous avons donc fait appel à des résultats obtenus avec un autre système de couplage (GLOBIOM-EPIC) traitant conjointement quelques productions de grande culture et de fourrages selon différents scénarios d'évolution du climat. A l'aide du modèle économique global en équilibre partiel GLOBIOM, développé à l'IIASA et couplé avec le modèle de culture EPIC⁴, pour différentes années et dans le cadre de deux scénarios "AR5" (faisant référence au "Fifth Assessment Report" de l'IPCC), et

³Orientation technico-économique des exploitations; nomenclature en 14 types, proposée par le RICA et fondée sur la décomposition de la marge brute selon les principales productions.

⁴Voir par exemple le <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/globiom/crops.html>

3.2. MÉTHODOLOGIE ET PRÉSENTATION DES MODÈLES

pour tous les pays de l'UE, les rendements des prairies et fourrages ont été estimés avec le même mode opératoire que pour les autres productions végétales ([AnimalChange-FP7, 2012](#)). Nous avons alors utilisé ces résultats pour corrélérer, par régression linéaire, le rendement potentiel des prairies et fourrages à celui d'autres productions végétales ([Tableau 3.1](#)).

Variable explicative (rendement ou période)	Valeur estimée	Significativité*
Orge	0.427118	***
Maïs	0.259602	***
Pomme de terre	0.581457	***
Colza	-0.376261	***
Betterave à sucre	-0.160456	.
Blé	-0.473850	***
Avoine	0.146138	*
Seigle	-0.156582	*
Riz	2.757583	***
Coton	-11.309497	***
Année	0.009226	***

Table 3.1: Résultats de la régression linéaire: rendement des fourrages “expliquées” par les rendements des cultures de vente et par le temps. Erreur standard résiduelle: 16.12; nombre d'observations : 168; R^2 ajusté: 0,8415; significativité: ***: 0,001; **: 0,01; *: 0,05.

Ce calcul de corrélation fait état d'un effet “temporel” significatif (nous disposons des résultats GLOBIOM-EPIC pour les années 2010, 2020 et 2030), l'effet du scénario (AR5-SSP1 et SSP3) quant à lui ayant été estimé peu significatif.

A partir de ces corrélations et des calculs réalisés par ailleurs pour l'évolution des rendements en grande culture, nous estimons les rendements en prairies et fourrages chez les différentes exploitations types du modèle AROPAj dans le contexte climatique étudié pour l'horizon 2070-2100 (“H2”) et pour lequel ont été estimés les rendements des grandes cultures (l'analyse est présentée en détail dans [Leclere et al. \(2013\)](#)).

3.2.3 Protocole de simulation

Plusieurs scénarios ont été étudiés à l'aide du modèle AROPAj, à partir de la combinaison de deux jeux d'hypothèses ([Tableau 3.2](#)): (i) les données climatiques sont fondées sur un scénario de contrôle “CTL” (1976-2005) et deux scénarios climatiques à horizon 2070-2100 (“H2”) de type “SRES-AR4”, dénommés respectivement “A2H2” et “B1H2”, avec pour le scénario CTL un niveau de 352 ppm de concentration de CO_2 et pour les deux scénarios de climat futur une con-

centration de CO_2 de 724 ppm et 533 ppm respectivement; (ii) l'adaptation des pratiques agricoles vue à travers le choix de la culture précédente, de la gestion du cycle des cultures et de la disponibilité de l'eau d'irrigation (Leclere et al., 2013) est prise en compte dans les deux SRES, dans des scénarios respectivement dénommés "A2H2-A" et "B1H2-A".

Scénario	Climat	Année	Concentration en CO_2 (ppm)	Adaptation des pratiques agricoles
Référence	CTL	1976-2005	352 ppm	-
Future	A2H2	2070-2100	724 ppm	non
	B1H2	2070-2100	533 ppm	non
	A2H2-A	2070-2100	724 ppm	oui
	B1H2-A	2070-2100	533 ppm	oui

Table 3.2: Les scénarios étudiés.

Le modèle AROPAj permet aux éleveurs de modifier leur capital animal dans la limite d'une amplitude de variation exogène. Un ajustement de ce capital de $\pm 30\%$ a été retenu pour tous les scénarios. Nous intégrons de la sorte une possibilité supplémentaire d'adaptation des systèmes de production face aux changements climatiques.

3.3 Résultats à l'échelle européenne et discussion

3.3.1 Marge brute agricole

Le [Tableau 3.3](#) présente la variation de la marge brute agricole de différents États membres de l'UE pour les scénarios à l'horizon 2100 comparés au scénario de référence. Les résultats mettent en lumière que l'agriculture de la plupart des pays européens pourrait bénéficier du changement climatique. L'effet "fertilisant" du CO_2 est déterminant. La marge brute européenne augmenterait de 3.5% dans le scénario A2H2 pour lequel la concentration de CO_2 est plus élevée que dans le scénario B1H2 pour lequel la marge brute diminuerait de 0.8%. L'adaptation des pratiques agricole a un effet positif, avec une hausse moyenne de 17.5% de la marge brute européenne comparée avec la marge "CTL". La marge de la plupart des pays évolue dans une fourchette de +5% à +20%.

3.3. RÉSULTATS À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE ET DISCUSSION

Scénario	A2H2	B1H2	A2H2-A	B1H2-A
Belgique	-2.4	-10.5	7.9	6.7
Danemark	4.8	7.8	18.2	25.9
Allemagne	9.5	11.5	23.3	26.9
Grèce	-4.1	-1.6	9.8	13.6
Espagne	2.2	-13.6	27.8	13.5
France	2.9	-5.1	25.5	25.1
Grande Bretagne	0.0	-0.1	14.1	15.6
Irlande	1.4	-4.7	4.4	3.6
Italie	-1.4	0.6	7.6	7.5
Luxembourg	8.5	5.3	19.3	12.9
Pays-Bas	9.8	-5.6	11.0	8.0
Autriche	30.7	-5.1	39.3	21.7
Portugal	5.8	-6.5	16.5	13.2
Finlande	7.2	7.4	7.4	10.5
Suède	2.3	6.3	5.7	11.3
UE-15	3.5	-0.8	17.9	17.2

Table 3.3: Variation relative (%) de la marge brute agricole par rapport au scénario de référence (CTL).

3.3.2 Réallocation des terres, productions agricoles et élevage

Le changement climatique et le doublement du taux de CO_2 influenceront les systèmes d'élevage de façons directe et indirecte. Nous nous intéressons ici aux seuls impacts indirects sur les animaux, *via* la sensibilité des productions végétales au changement climatique, lesquelles sont à la base de l'alimentation animale. Les résultats présentés en [Figure 3.1](#) montrent que l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique et l'adaptation des pratiques agricoles provoqueraient un accroissement des surfaces en cultures fourragères de l'ordre respectivement de 7.0% et 6.5%, sans et avec l'adaptation des pratiques agricoles. Le blé tendre (+36.8%), le riz (+13.6%) et la betterave à sucre (+16.5%) seraient les principales cultures favorisées par le climat futur avec l'adaptation des pratiques agricoles.

A contrario, le changement climatique aurait des effets négatifs sur la part de surface dévolue aux prairies, de l'ordre respectivement de -5.9% et -20.7%, sans et avec l'adaptation des pratiques agricoles ([Figure 3.1c](#)). Une tendance similaire est calculée pour l'orge (-11.2%), le seigle (-5.3%) et le maïs (-7.6%). L'une des raisons que l'on peut avancer pour expliquer ces modifications est la diminution prévue des précipitations de 10 à 50 mm et de 10 à 25 mm respectivement dans les régions du centre et du sud de l'Europe.

CHAPTER 3. IMPACT ÉCONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ALIMENTATION ANIMALE ET L'ÉLEVAGE DANS L'UNION EUROPÉENNE

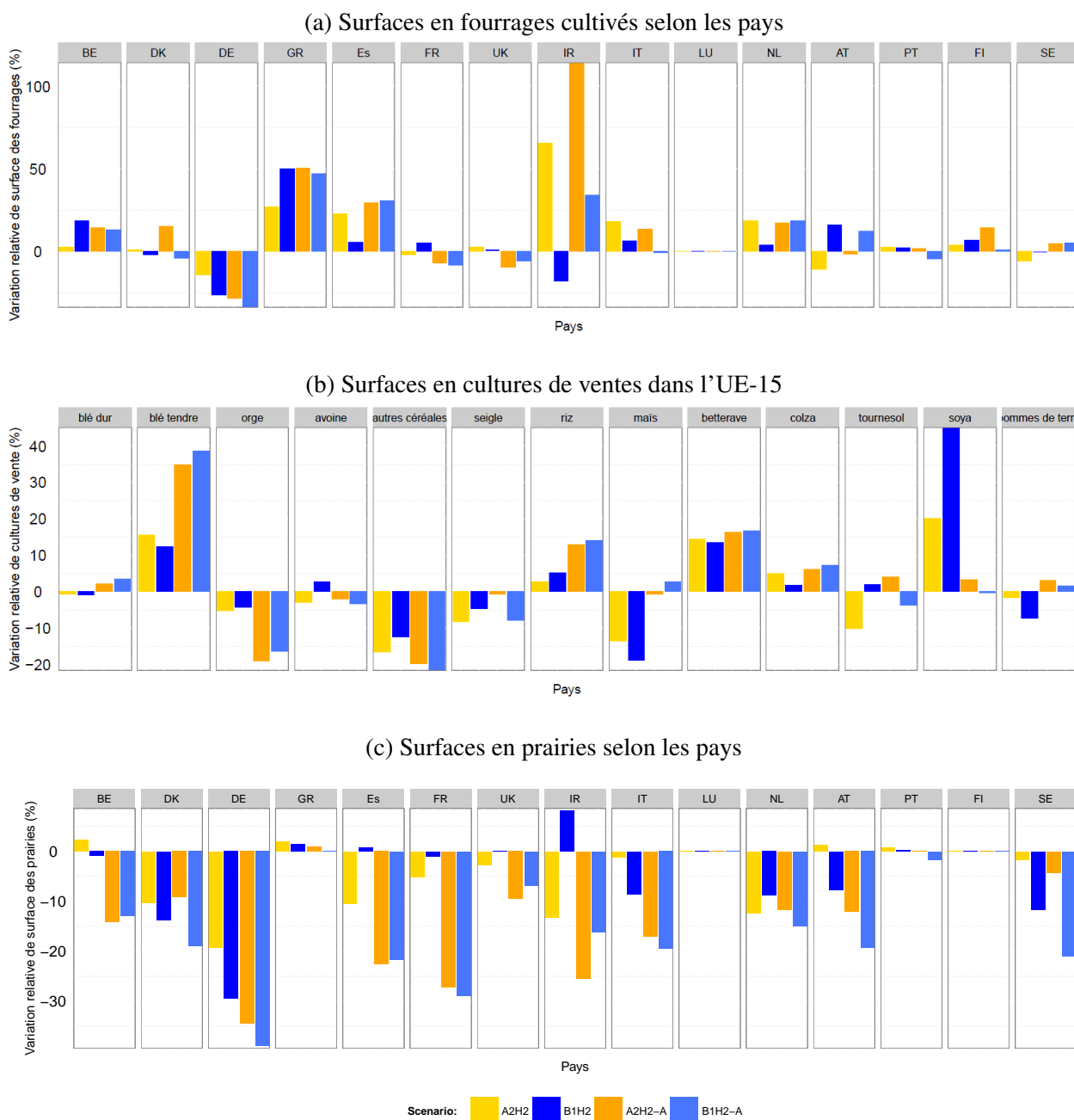


Figure 3.1: Variation relative (%) des surfaces en (a) cultures fourragères, (b) cultures de vente et (c) prairies, par rapport au scénario de référence (CTL) dans les pays de l'UE-15.

Le [Tableau 3.4](#) montre la variation des activités du modèle en rapport avec la production animale, comparée au scénario de référence. Avec un changement faible des effectifs animaux calculés à long terme en situation de changement climatique, les activités animales verraient leur produit brut évoluer faiblement (environ +1% dans la plupart des cas). La part de céréales et de fourrages produits sur l'exploitation augmenterait dans l'alimentation des animaux et les dépenses d'achats d'aliments concentrés baisseraient en moyenne de 4.2 et 1.4% sans et avec l'adaptation

3.3. RÉSULTATS À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE ET DISCUSSION

des pratiques agricoles respectivement. Rappelons que ces simulations sont réalisées par un modèle d'offre, à prix constants dans nos scénarios.

Scénario	Effectif animaux	Produit brut animal	Dépense alimentaire
A2H2	0.2	0.9	-2.4
B1H2	-0.4	-0.1	-0.3
A2H2-A	0.3	1.7	-4.2
B1H2-A	0.4	1.7	-4.2

Table 3.4: Variation relative (%) dans les secteurs de l'élevage, à l'échelle européenne, pour les scénarios de changement climatique étudiés par rapport au scénario de référence (CTL).

3.3.3 Émissions de GES

Toutes choses égales par ailleurs, le changement climatique à horizon "H2", conduirait à augmenter les émissions de protoxyde d'azote de façon significative et à diminuer faiblement les émissions de méthane. Ce résultat est simulé dans la plupart des pays, avec néanmoins des écarts importants (Figure 3.2). Cet effet serait accru par l'adaptation des pratiques agricoles et on peut l'expliquer de la façon suivante.

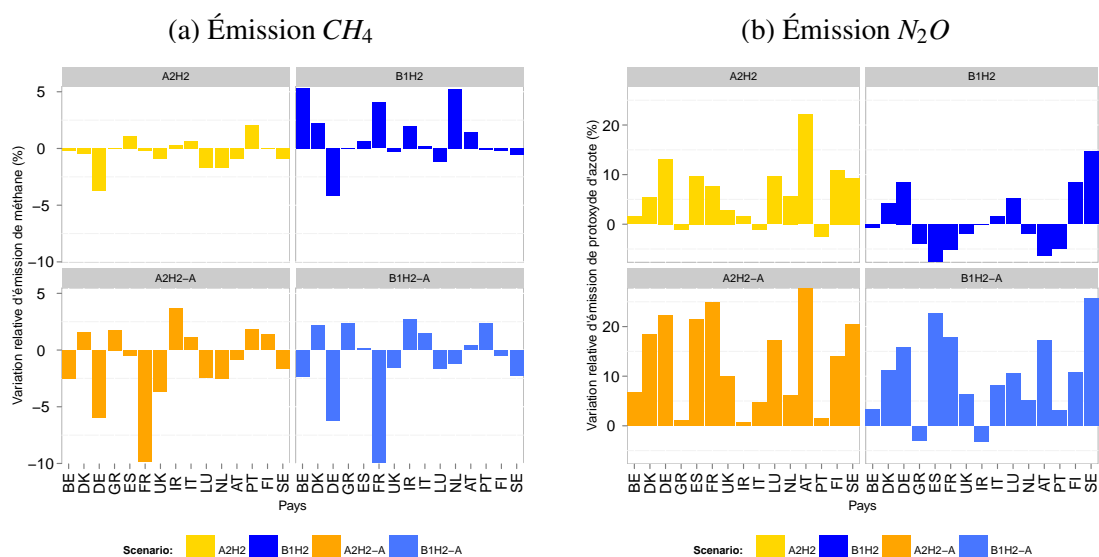


Figure 3.2: Variations relatives (%) des émissions (a) de méthane et (b) de protoxyde d'azote par rapport au scénario de référence (CTL), calculées pour les pays de l'UE-15 dans les SRES "A2" et "B1" à horizon "H2", sans et avec adaptation des pratiques agricoles.

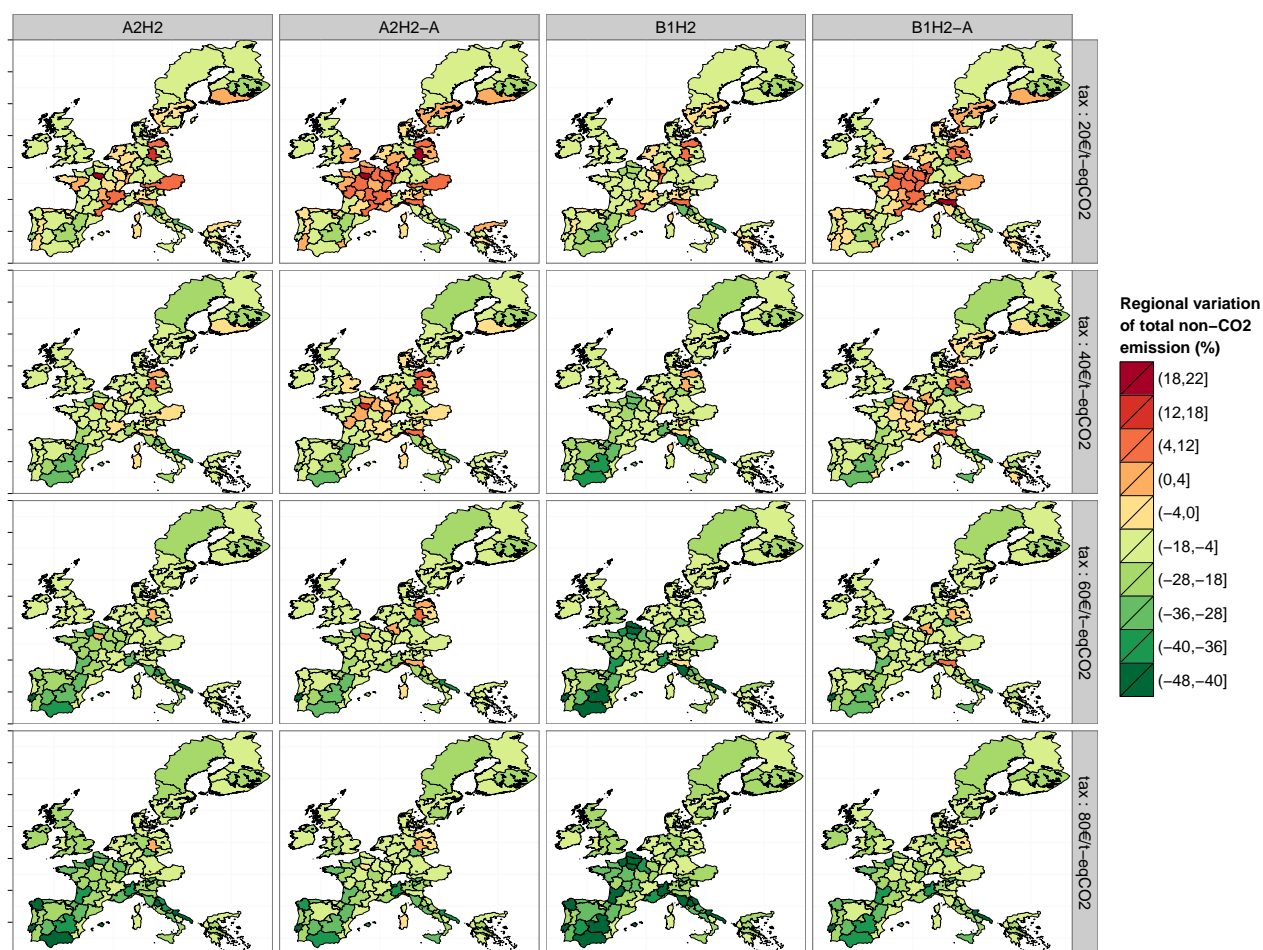
CHAPTER 3. IMPACT ÉCONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ALIMENTATION ANIMALE ET L'ÉLEVAGE DANS L'UNION EUROPÉENNE

La hausse des émissions de N_2O est liée à la consommation d'intrants azotés, qui augmente avec les rendements et une productivité marginale plus favorable. Sans variation notable des prix relatifs (prix des intrants par rapport à ceux des produits), on pourrait assister à la poursuite de la tendance observée ces dernières décennies avec une consommation mondiale d'engrais azotés multipliée par sept entre 1960 et 1995 (Tilman et al., 2002). La faible baisse simulée des émissions de CH_4 s'explique dans le modèle par le fait que les productions fourragères, en particulier les prairies, sont en baisse et sont compensées par des aliments moins méthanogènes, même si la consommation d'aliments concentrés -de plus grande efficacité énergétique- baisse. S'y ajoute la légère baisse des effectifs animaux. La hausse des productions de céréales profite aussi à l'alimentation animale "sur la ferme". Compte tenu de leurs pouvoirs radiatifs respectifs, les émissions totales de GES d'origine agricole augmenteraient significativement, d'autant plus que serait intégrée l'adaptation des systèmes vis-à-vis du changement climatique.

L'effet d'une taxe (de 0 à 80 €/t-eq CO_2) sur les émissions de GES d'origine agricole a été étudié, afin de simuler la combinaison de l'atténuation des émissions par la régulation économique, d'une part, et des capacités d'adaptation des systèmes de production agricole, d'autre part. La régulation économique prend ici la forme d'une taxe directe sur les émissions. Illustrés par les Figure 3.3, les résultats de simulation montrent que les baisses d'émissions de GES attendues suite à l'introduction de la taxe diffèrent fortement, selon le scénario, avec de surcroît des différences importantes qui peuvent se dessiner d'un pays à l'autre. Les variations moyennes européennes montrent le caractère déterminant de l'adaptation.

3.4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

(a) par région européenne



(b) pour l'UE-15

Niveau de taxe	A2H2	B1H2	A2H2-A	B1H2-A
20 (€/t-eqCO ₂)	-9,2	-9,3	-9,5	-9,5
40 (€/t-eqCO ₂)	-15,2	-14,9	-14,7	-14,8
60 (€/t-eqCO ₂)	-19,9	-19,8	-19,2	-19,3
80 (€/t-eqCO ₂)	-24,4	-24,1	-23,7	-23,5

Figure 3.3: Variations relatives (%) des émissions totales européennes de GES d'origine agricole en selon les régions européennes, par rapport au scénario de référence (CTL), en fonction de différents niveaux de taxe sur les émissions (€/t-eq CO₂) pour les quartes scénarios étudiés.

3.4 Conclusion et Perspectives

Le changement climatique affectera de manière générale le développement de l'agriculture et de l'élevage par ses effets sur la température, le rayonnement, les précipitations et la concentration

CO₂ dans l'atmosphère, ce que nous avons analysé dans le cadre de scénarios climatiques de long terme (période 2070-2100).

Le couplage entre les modèles économique AROPAj et agronomique STICS utilisés dans la présente étude permet de prendre en compte les fonctions physiologiques des plantes ainsi que le fonctionnement économique des systèmes de production agricole dans leurs capacités d'adaptation au changement climatique. L'approche est néanmoins encore insuffisamment développée pour les prairies. Nous avons donc proposé une mise en œuvre du couplage, en le complétant par un calcul statistique appliqué à des "pseudo-données" issus des résultats d'un couplage entre modèles économique et biophysique réalisé à un niveau de résolution spatiale inférieure (*i.e.* association des modèles GLOBIOM et EPIC). On obtient par régression linéaire une évolution du rendement potentiel des prairies à un horizon rapproché, évolution dont on extrapole les effets à un horizon compatible avec ce qui a été réalisé pour les cultures. En réintégrant l'impact du climat sur les prairies et fourrages, en phase avec les cultures, on espère améliorer la cohérence du modèle agro-économique d'ensemble.

En regard avec les productions animales, le principal résultat serait que l'adaptation des systèmes de production agricole accroîtrait fortement l'impact négatif du changement climatique sur la part de surface dédiée aux prairies. Cela tient à l'amélioration de la productivité marginale de la terre que le modèle de culture confère aux principales cultures de vente, laquelle induit une réallocation des terres en leur faveur. En conséquence, les émissions de GES sont fortement affectées, à la hausse. Quant aux productions animales proprement dites, sans que soient pris en compte les impacts directs du climat (dont on ne dispose pas), les effectifs animaux varieraient peu, toujours toutes choses égales par ailleurs. Mais les grands postes de l'alimentation animale seraient modifiés, avec une baisse de l'autoconsommation de fourrages, une hausse de l'autoconsommation de céréales et une baisse de l'alimentation concentrée achetée.

Remerciements

La recherche conduisant à ces résultats a été financée par le projet “VALIDATE” de l’Agence Nationale pour la Recherche (ANR/2008-2012), dans le cadre de l’accord de subvention n° ANR-07-VULN-11-011, et par le projet européen “AnimalChange” financé, dans le cadre du 7^e programme cadre de la Communauté Européenne - FP7/2007-2013, par l’accord de subvention n°266018. Cette recherche s’inscrit dans le travail de thèse de Parisa Aghajanzadeh-Darzi, financé conjointement par l’Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie (ADEME) et l’Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

Bibliography

- Aghajanzadeh-Darzi, P., Frank, S., Havlik, P., & Jayet, P.-A. (2013). Global change challenges for the EUn agricultural sector: A multi-scale model analysis. In *Congrès EAERE, Toulouse*.
- AnimalChange-FP7 (2012). *Model linkages between GLOBIOM, CAPRI and AROPAj for simulations of long-term climate change scenarios*. Technical report, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability.
- Bakkened, M., Eickhout, B., & Alkemade, R. (2006). Impacts of different climate stabilisation scenarios on plant species in Europe. *Global Envir*, 16, 19–28.
- Cantelaube, P., Jayet, P.-A., Carré, F., Zakharov, P., & Bamps, C. (2012). Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level. *Land Use Policy*, 29, 35–44.
- 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 and resource economics*, 32(4), 551–583.
- De Cara, S. & Jayet, P. (1999). Evaluation et régulation de l'effet de serre d'origine agricole. *L'Actualité Economique*, 75(4), 597–623.
- De Cara, S. & Jayet, P. (2000). Régulation de l'effet de serre d'origine agricole: puits de carbone et instruments de second rang. *Economie et Prévision*, 143-144, 37–46.
- 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.
- Fischer, G., Shah, M., & van Velthuisen, H. (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability, Special Report to the UN World Summit on Sustainable Development, Johannesburg 2002*. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis under United Nations Institutional Contract Agreement No. 1113.
- Galko, E. & Jayet, P.-A. (2011). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.

- 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.
- Hanson, J.-D. & Baker, B.-B. (1993). Comparaison of the effects of different climate change scenarios on rangeland livestock production. *Agricultural Systems*, 41, 487–502.
- Leclere, D., Jayet, P.-A., & De Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change. *Ecological Economics*, 87, 1–14.
- Moreau, J.-C. & Lorgeou, J. (2007). Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques: impacts sur les prairies, le maïs et les systèmes fourragers. *Fourrages*, 191, 285–295.
- Ruget, F., Clastre, P., Moreau, J.-C., Cloppet, E., Souverain, F., Lacroix, B., & Lorgeou, J. (2012). Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. i. estimation par modélisation et analyse critique. *Fourrages*, 210, 87–98.
- Soussana, J.-F., Tessonneyre, F., Picon-Cochard, C., Casella, E., Besle, J.-M., Lherm, M., & Loiseau, P. (2002). Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production. *Fourrages*, 169, 3–24.
- Tilman, D., Cassman, K.-G., Matson, P.-A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
- Topp Cairistiona, F.-E. & Doyle Christopher, J. (1996). Simulating the impact of global warming on milk and forage production in scotland: 1. the effects on dry-matter yield of grass and grass-white clover swards. *Agricultural Systems*, 52, 213–242.

Chapter 4 :

Valorisation économique de la production consommée sur la ferme

Ce chapitre vise à calculer les prix fictifs de productions entièrement ou partiellement consommées sur la ferme. Lorsque les produits sont utilisés dans les exploitations agricoles, aucun prix de marché n'est disponible pour évaluer leur valeur économique. Nous proposons une méthode itérative simple afin d'attribuer une valeur économique à ce type de produit.

BIBLIOGRAPHY

Chapter 4

Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on-farm source inputs and outputs

Aghajanzadeh-Darzi, P.^{a,b}, Jayet, P.A.^{a,*}, Petsakos, A.^a

^a. INRA, UMR 210 Economie Publique INRA-AgroParisTech, 78850 Grignon, France

^b. ADEME, French Environment and Energy Management Agency, 49004 Angers, France

Abstract

This paper presents a two-step process for solving nonlinear farm activity models and for estimating shadow prices inside a linear framework. Nonlinearities, originating from explicit production-output relations in the objective function are simplified by solving the first order optimality conditions under the assumption that market prices provide the “true” values of the model’s implied shadow prices. When outputs are not sold on the market or, more generally, in the case of bounds, thresholds or missing prices, the previous assumption is not justified and the derived solution is not optimal. The question raised in this paper is how to estimate the shadow prices for such outputs in order to efficiently solve the activity model using linear programming (LP) so as to avoid nonlinear algorithms that may prove unwieldy for large models. An iterative computation method is proposed which is based on the re-estimation of shadow prices in each iteration step until a converging solution is found. The method is applied to the bio-economic agricultural supply model

AROPAj which consists of a number of LP farm sub-models and covers a large range of agricultural activities over the European Union. A converging solution is obtained in two iterations for 90% of LPs producing non marketed outputs, while remaining LPs lead to periodic solutions of very low amplitude.

Keywords: Bioeconomic farm model; Mathematical programming; On-farm source products; Shadow prices

JEL Classification: Q10; Q15; Q50; Q57

4.1 Introduction

An important part of agricultural production is not sold on the market but can serve as input (intermediate products) for other farm activities or consumed in the household. The problem with inputs that are produced in the farm is that their true economic value is not defined in market terms (through a supply – demand equilibrium), but instead it is given by the opportunity cost for producing them. This opportunity cost can be interpreted as a shadow price that results from the farmer's profit (or utility) maximization problem and therefore it depends on the technological, resource and other constraints faced by the farmer.

The estimation of shadow prices for farm products that are consumed in the household has been examined in the literature of subsistence agriculture and household theory in the context of investigating the reason for certain farmers' unresponsive behaviour to price incentives, which contradicts the classical economic paradigm of utility or profit maximization. [Arslan & Taylor \(2009\)](#) identify several reasons for which such behaviour is possible, all related with the non-market values that farmers attach to their agricultural production. Examples of non-market values include transaction costs or certain social attributes of crop growing activities (e.g. maintaining a family tradition). In either case, non-market values yield shadow prices that differ from market prices and lead to market failure. Although the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions of the basic household model and its extensions provide important insights on the true value of subsistence crops (e.g. [Singh et al., 1986](#); [De Janvry et al., 1991](#); [Dyer et al., 2006](#); [Arslan, 2011](#)), market failures are farm- and not crop-specific because different farms are subject to different transaction costs and use different production technologies. In this sense, the estimation of crop shadow prices requires a mathematical programming approach where the household model is analytically solved with all its constraints (e.g. [Taylor & Adelman, 2003](#)).

Missing market prices also apply for agricultural by-products that can influence production costs and the environmental impacts of farming when they are used as inputs for other activities. A typical example is animal manure which represents not only a source of pollution (e.g. nitrates)

but also a valuable nutrient source for plant growth. Although it can replace, to a certain extent, the use of mineral fertilizers and therefore reduce variable costs, its excessive use may result in additional abatement costs (shadow price) that decrease farm economic efficiency. For this reason the investigation of shadow prices for undesirable outputs has received much attention in studies focusing on efficiency measurements of farm productivity. The procedure for estimating shadow prices of undesirable outputs in efficiency studies relies on the principles of duality theory and the relation between the output (input) distance function and the revenue (cost) function. More specifically, shadow prices are usually derived by applying duality relations (e.g. Shepherd's lemma) to input or output distance functions which in turn can be estimated using either econometric or mathematical programming methods (e.g. [Färe et al., 1989, 1993](#); [Piot-Lepetit & Vermersch, 1998](#); [Shaik et al., 2002](#)).

Although shadow prices play an important role to economic analyses, in this article we look into the problem of shadow price estimation from the perspective of an analyst who seeks to find an optimal solution to a complex mixed integer nonlinear programming (MINLP) model, such as the agricultural supply model AROPAj. Although many efficient MINLP solvers are available, the size of the model (32 crop and pasture activities and 31 animal categories) and the integer variables related to animal activities form a problem that is difficult to solve. For this reason a two-step solving procedure has been developed that "linearizes" the model but relies heavily on the use of the first order optimality conditions and on the a priori knowledge of a set of shadow prices. This requirement is obviously problematic since shadow prices depend not only on the technology and resource constraints of the producing farm but are also implicitly defined as a function of other primal decision variables; quantities and prices are both variables of the problem and the market seldom provides the correct value that farmers attribute to their activities. A second inconvenience is that the shadow prices corresponding to intermediate products have not received the proper attention in the literature, unlike undesirable outputs and goods that are consumed in the household. As a result, there are no estimations of shadow prices that can serve as reliable proxies for model solving and nonlinear programming algorithms are required.

In this paper we identify the conditions under which the two-step "linearization" procedure can indeed return an optimal solution to a farm model if intermediate products and agricultural by-products are included as decision variables. When these conditions are not met, we propose a computational method based on iterative model solving which begins with replacing the shadow prices by market price proxies and solving the optimality conditions with respect to each decision variable. The method leads to the re-estimation of shadow prices after each iteration which are then re-used for solving the first order conditions in the next iteration. The procedure ends when a converging solution is reached. We argue that the computational method can serve as an efficient means of shadow price estimation and for solving a nonlinear optimization model inside a simple linear framework, especially in cases where a market does not exist.

In the next section we detail the describe the model AROPAj and examine the shadow prices

inside a general modeling framework where crop and animal outputs may be subject to production quotas and can be used partially or entirely by the same producing farm. In [Section 4.3](#) we test the proposed methodology on the model AROPAj and look into the behaviour of the iterative system and the final converging solution. The paper ends with a short discussion section where we summarize and identify possible extensions of the proposed methodology.

4.2 Methodological framerwork

4.2.1 The agricultural supply model AROPAj

AROPAJ is a short-term agricultural supply model based on linear and mixed-integer programming. It has been widely used for policy analyses at the sub-regional level in the European Union (EU), either as stand-alone for the assessment of the various Common Agricultural Policy reforms (e.g. [Jayet & Labonne, 2005](#); [Galko & Jayet, 2011](#)), or coupled with a crop model for addressing important environmental challenges such as greenhouse gas emissions (e.g. [De Cara et al., 2005](#); [De Cara & Jayet, 2011](#)) and nitrogen losses from agriculture ([Jayet & Petsakos, 2013](#)). AROPAj has also been used to demonstrate the importance of farmers' adaptation to climate change ([Leclère et al., 2013](#)) and to evaluate the economic impacts ozone on agricultural production ([Humblot et al., 2013](#)). AROPAj consists of a set of mathematical programming sub-models, each of them associated to a farm-type (FT) which is produced by clustering individual representative farms at the regional NUTS-2 level from the European Farm Accountancy Data Network (FADN). The clustering procedure concerns all European holdings included in FADN and is based on three farm characteristics: (i) *Altitude*, which corresponds to the average altitude of holdings (<300 m, 300–600 m, >600 m), (ii) *economic size*, expressed in terms of European Size Units (ESU) which is a function of farm gross margin, and (iii) *type of farming*, i.e. production orientation according to FADN nomenclature.

The model maximizes gross margin for each FT by finding its optimal annual supply choices in terms of crop area and production, land allocation, animal numbers, on-farm consumption (fodders and cereals) or/and purchased animal feed under a set of constraints which represent existing production technology (e.g., rotations and nutriment requirements), resource availability and restrictions related to agricultural policy measures. The generic model for the k -th farm type can be written as follows:

$$\begin{aligned} \max \quad & \pi_k = \mathbf{g}_k \cdot \mathbf{x}_k \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{M}_k \mathbf{x}_k \leq \mathbf{z}_k \\ & \mathbf{x}_k \geq 0 \end{aligned}$$

where π_k is the gross margin (scalar), \mathbf{x}_k is the vector of decision variables, \mathbf{g}_k is the vector of activity gross margins, \mathbf{M}_k is the matrix of technical coefficients and \mathbf{z}_k is the vector of available resources.

AROPAj includes a bio-technical block based on nitrogen-yield response functions for a large number of crops. These functions have been calibrated for all FTs in the model and take into account purchased mineral fertilizers and organic nitrogen produced on-farm as a livestock by-product (Godard et al., 2008; Leclère et al., 2013). When they are activated, the initially linear programming model becomes nonlinear since the amount of nitrogen used in each crop also becomes a decision variable. In order to preserve linearity and ensure a global optimum, model solving is performed in two steps. The first step invokes the first order optimality conditions with respect to mineral nitrogen, that is, the amount of nitrogen purchased from the market. Given the (calibrated) parameter set of the response functions and the prices for crops and nitrogen, which are considered exogenous, the optimal amount of nitrogen and the resulting yield are calculated by the first order conditions for each modeled crop. The second step of the procedure calls for the usual linear program which uses the optimal values for yield and nitrogen from the first step.

Although this procedure is valid when all nitrogen is bought from the market, a problem arises when the corresponding nutrient requirements are fully covered by organic nitrogen (manure) that is produced on-farm. In this case, the use of nitrogen market price in order to “linearize” the model may lead to a sub-optimal solution since the decision problem also includes opportunity costs that derive from the constraints related to the use of organic nitrogen. The problem becomes even more complicated when the feeding requirements of the animals themselves are fully satisfied from the crops produced on-farm because, as in subsistence agriculture, the market price is no longer representative of the value that farmers assign to their crops.

This discussion accentuates the structural complexity of the farming business since the farmer must take decisions for simultaneously producing and consuming inputs and outputs; the crop grower part of the farm should evaluate the option of supplying the breeder part with feed stuff rather than selling crops on the market. On the other hand, the breeder part of the farm may prefer to use crop produced on-farm rather than buying animal feed. Such a double-sided economic choice is frequently encountered in many agricultural regions of the EU.

4.2.2 Analytical model formulation

In this section we describe the general stylized mathematical formulation of the maximization program in order to present the constraints and the variables which are related to outputs that are re-used as inputs in other activities. The model variables include the land allocated to the j -th crop, S_j (in ha), its total marketed output, Y_j (tons), the quantity of mineral nitrogen purchased,

4.2. METHODOLOGICAL FRAMERWORK

N_j^{min} (tons), the amount of organic nitrogen used originating from the i -th animal activity, N_{ij}^{org} (tons), the total amount of nitrogen used per hectare, n_j (tons/ha), the quantity of output j used as feed for the i -th animal activity, C_{ij} (tons), the animal capital, A_i (Livestock Units – LU), the total animal output, G_i (tons), and the quantity of feed purchased, B_i (tons). A summary of all primal and dual variables is given in the appendix.

$$\max \quad \pi = \sum_j (p_j Y_j - w_N N_j^{min} - w_j S_j) + \sum_i (v_i G_i - w_B B_i)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_j S_j \leq L \quad [\lambda] \quad (4.1)$$

$$\forall j : \quad S_j n_j - N_j^{min} - \sum_i d_{ij} N_{ij}^{org} \leq 0 \quad [\xi_j] \quad (4.2)$$

$$\forall j : \quad Y_j + \sum_i C_{ij} - r_j(n_j) S_j \leq 0 \quad [\rho_j] \quad (4.3)$$

$$\forall i : \quad \sum_j N_{ij}^{org} - a_i A_i \leq 0 \quad [\eta_i] \quad (4.4)$$

$$\forall i : \quad f_i A_i - \sum_j C_{ij} c_{ij} - b_i B_i \leq 0 \quad [\gamma_i] \quad (4.5)$$

$$\forall i : \quad G_i - g_i(f_i) A_i \leq 0 \quad [\alpha_i] \quad (4.6)$$

$$\forall j : \quad Y_j \leq Q_j^Y \quad [\psi_j^Y] \quad (4.7)$$

$$\forall i : \quad G_i \leq Q_i^A \quad [\psi_i^A] \quad (4.8)$$

$$\forall j : \quad \sum_i N_{ij}^{org} - e_j S_j \leq 0 \quad [\varepsilon_j] \quad (4.9)$$

$$\forall j : \quad S_j - s_j \sum_j S_j \leq 0 \quad [\sigma_j] \quad (4.10)$$

$$\forall i : \quad A_i \leq (1+z) A_i^0 \quad [\delta_i^+] \quad (4.11)$$

$$\forall i : \quad A_i \geq (1-z) A_i^0 \quad [\delta_i^-] \quad (4.12)$$

$$\text{any variable} \quad X_m^Y \geq 0 \quad [\beta_m^{X^Y}] \quad (4.13)$$

where p_j is the price of crop j (in €/ton), w_N is the market price of mineral nitrogen (€/kg), w_j expresses variable costs for inputs other than fertilizer (€/ha), v_i represents the unitary value of the i -th animal product (€/ton), and w_B is the market price of animal feed (€/ton).

Inequality (4.1) represents a land constraint and L denotes the available land (ha) in each farm-type. According to constraint (4.2) the total amount of nitrogen in each farm-type (given by the land allocated to crop j , times the total nitrogen per hectare, n_j) should be less or equal to the total amount of mineral nitrogen used/purchased, plus the mineral nitrogen–equivalent from animal manure (expressed N_{ij}^{org} times a transformation coefficient d_{ij}). Using similar reasoning, constraint (4.3) states that the marketed output of crop j , plus the quantity used as feed for i -th animal activity should be less or equal to the total amount produced on farm, that is, the yield given by the response function $r_j(n_j)$ multiplied by the land allocated to the j -th crop. According to constraint (4.4) the total amount of organic nitrogen from animal activity i that is used as input

in different crops should not surpass the total amount of organic nitrogen produced by the same animal activity. Constraint (4.5) states that the i -th feeding requirements (calculated as the product of the feeding requirement per LU, f_i , and the animal capital A_i) should be satisfied by feed purchased from the market (parameter b_i stands for the nutriment content of the feed for the i -th type of animal activity), and/or by feed coming from crop j . The latter is calculated as the product $\sum_i C_{ij}c_{ij}$, where c_{ij} is the nutrient that crop j offers to animal i and is measured in tons/LU. Inequality (4.6) defines the production relation for the i -th animal activity (transformation function), where $g_i(f_i)$ is the feed-production correspondence¹. Constraints (4.7) and (4.8) refer to policy restrictions, i.e. possible production quotas for crops and animals (expressed as the right hand side parameters Q_j^Y and Q_i^A respectively). Constraint (4.9) represents limitations on manure spreading due to environmental regulation (parameter e_j expresses the limit of manure spread per hectare). Rotational restrictions are expressed by constraint (4.10). This means that land allocated to a given crop j cannot surpass a percentage s_j of total cultivated land. Constraints (4.11) and (4.12) limit the variation of the animal capital (considered as quasi-fix in the model) inside a predefined $[-z, +z]$ interval around the reference (observed) level A_i^0 . Finally, inequality (4.13) corresponds to positivity constraints for all model variables which are generally denoted by X_m^Y . For example, the animal capital A_i , the final output, G_i , and the feeding requirements f_i are strictly positive so that the corresponding dual variables β_i^A , β_i^G and β_i^f are zero.

4.2.3 Optimality conditions for non-marketed activities

We identify those cases where the two-step procedure for solving the model may lead to sub-optimal solutions. In what follows the Lagrangean function will be denoted by \mathcal{L} and its derivative with respect to any of its arguments X_m^Y will be denoted by $\mathcal{L}_{X_m^Y}$. The derivatives of the functions r_j and g_i will be written as r'_j and g'_i respectively. When it exists, the optimal solution must satisfy the KKT conditions, which means that $\mathcal{L}_{X_m^Y} = 0$ and $X_m^Y \beta_m^Y = 0$.

¹ AROPAj does not explicitly integrate a production function for animal activities and thus the feed-production correspondence presented in (4.6) is a simple linear representation of the (constant) feeding requirements per unit of animal activity i . We nevertheless opted for presenting the constraint in a general production function form because (i) it is technically feasible to introduce such a relationship in the model and (ii) it shows that the discussion on the two-step solving method can be implemented to all activities with specific input-output relations.

4.2.3.1 The crop side

Lets consider the optimality equations for the variables Y_j , C_{ij} , n_j and N_j^{min} that are related to crop production and affect the optimal solution derived from the two-step solving procedure:

$$\mathcal{L}_{n_j} = [r'_j(n_j) \rho_j - \xi_j] S_j + \beta_j^n = 0 \quad (4.14)$$

$$\mathcal{L}_{N_j^{min}} = -w_N + \xi_j + \beta_j^{N^{min}} = 0 \quad (4.15)$$

$$\mathcal{L}_{Y_j} = p_j - \rho_j - \psi_j^Y + \beta_j^Y = 0 \quad (4.16)$$

$$\forall i \quad \mathcal{L}_{C_{ij}} = -\rho_j + c_{ij} \gamma_i + \beta_{ij}^C = 0 \quad (4.17)$$

Since n_j is positive (thus $\beta_j^n = 0$), the first step of the “linearization” procedure derives from equation (4.14):

$$r'_j(n_j) = \frac{\xi_j}{\rho_j} \quad (4.18)$$

From (4.15) and for a strictly positive amount of mineral nitrogen (i.e. $\beta_j^{N^{min}} = 0$) we obtain $w_N = \xi_j$. On the contrary, when nitrogen is entirely provided by manure then its shadow price is lower than its market price: $\xi_j = w_N - \beta_j^{N^{min}}$. Additionally, when there is no crop production quota ($\psi_j^Y = 0$) and a positive amount of the j -th crop is sold on the market ($Y_j > 0$ and $\beta_j^Y = 0$) then from equation (4.16) it can be seen that the dual value ρ_j is equal to the market price p_j and that the shadow price γ_i of the constraint related to the feeding requirements for animal activity i can be calculated from equation (4.17) as $\gamma_i = \rho_j / c_{ij} = p_j / c_{ij}$. In this case the first step in the “linearization” procedure can return the optimal level of crop productivity by substituting the shadow prices in equation (4.18) with the corresponding market prices and solving for the amount of n_j . However, when the output of the j -th crop is entirely consumed on farm ($Y_j = 0$ and $\beta_j^Y > 0$), equation (4.16) solves for $\rho_j = p_j + \beta_j^Y$ and the shadow price γ_i is now equal to $\gamma_i = (p_j + \beta_j^Y) / c_{ij}$. This result implies that crop j is now more valued on the farm than on the market and by substituting ρ_j with p_j in (4.18) will return a non-optimal solution for crop productivity in the first step. The previous results can be summarized as:

$$\rho_j \geq p_j \quad \text{and} \quad \gamma_i \geq \frac{p_j}{c_{ij}} \quad \text{and} \quad \xi_j \leq w_N$$

and from (4.18) we obtain:

$$\frac{\xi_j}{\rho_j} \leq \frac{w_N}{p_j} \quad (4.19)$$

which shows that the marginal productivity of nitrogen for crop j is not necessarily equal to the ratio of the market prices for nitrogen and output and thus the two-step procedure for solving the nonlinear model will fail to return an optimal solution when market values are used as proxies for the corresponding shadow prices of the farm model.

It can be easily shown that the introduction of a crop production quota may reverse or maintain the previous inequalities. More precisely, ψ_j^Y is positive if production is bounded by a quota and thus $\rho_j = p_j - \psi_j^Y$, which means that the market price of crop j is higher than its marginal production value ($\rho_j < p_j$). Therefore when crop j is not used as animal feed ($C_{ij} = 0$), equation (4.17) results in $\gamma_i = (p_j - \psi_j^Y + \beta_{ij}^C)/c_{ij}$. However, when $C_{ij} > 0$ and the quota is still binding we obtain $\gamma_i = (p_j - \psi_j^Y)/c_{ij}$. These results imply that the previous inequalities can change towards any direction and γ_i can be greater, lower or equal to p_j/c_{ij} , depending on the numerical values of the shadow prices ψ_j^Y and β_{ij}^C . Note that for the quota constraint to be binding Y_j must be strictly positive. Therefore the results regarding the case in which crop j is used entirely as an intermediate product remain unaffected, i.e. $\gamma_i = (p_j + \beta_j^Y)/c_{ij}$ and $\rho_j > p_j$. This means that inequality (4.19) can also change towards any direction since $w_N \leq \xi_j$ but $\rho_j \gtrless p_j$.

4.2.3.2 The livestock side

The two-step procedure can also be utilized in the case of an animal production function, although AROPAj does not currently integrate such a representation. The following section is thus included not only for completeness, but also for demonstrating the symmetry with the crop supply side and the difficulties that arise when the farmer is at the same time animal and crop producer and must value his output with respect to its different uses (sold on the market or re-used in the farm). The optimality equations for the variables G_i , B_i , and f_i that are related to animal production are written as:

$$\mathcal{L}_{f_i} = [g'_i(f_i) \alpha_i - \gamma_i] A_i + \beta_i^f = 0 \quad (4.20)$$

$$\mathcal{L}_{G_i} = v_i - \alpha_i - \psi_i^A = 0 \quad (4.21)$$

$$\mathcal{L}_{B_i} = -w_B + b_i \gamma_i + \beta_i^B = 0 \quad (4.22)$$

By assuming that A_i is positive and since f_i is by definition positive (so the dual β_i^f is zero), equation (4.20) can be solved for

$$g'_j(f_i) = \frac{\gamma_i}{\alpha_i} \quad (4.23)$$

As before, we initially focus on the case of no production quota (ψ_i^A undefined) and from equation (4.21) we obtain $\alpha_i = v_i$, that is, the shadow price of animal production equals the corresponding market price. When feed is bought from the market ($B_i > 0$ and $\beta_i^B = 0$) the shadow price γ_i can be calculated from equation (4.22) as $\gamma_i = w_B/b_i$. These results show that the two-step procedure can be applied to the livestock supply side and yield an optimal solution as long as there is no quota and B_i is positive; in this case the optimal amount of animal nutrient and the corresponding production level can be determined by equation (4.23), since α_i is equal to v_i and the dual value γ_i can be calculated as the ratio of parameters w_B and b_i which are known a priori. On the contrary,

4.2. METHODOLOGICAL FRAMERWORK

when $B_i = 0$ (and $\beta_i^B > 0$) animal feed originates exclusively from on-farm produced crops and thus from equation (4.22) we obtain $\gamma_i = (w_B - \beta_i^B)/b_i$. The above results can be more succinctly written as:

$$\alpha_i = v_i \quad \text{and} \quad \gamma_i \leq \frac{w_B}{b_i}$$

From the optimality condition (4.23) the previous relations lead to:

$$g'_j(f_i) = \frac{\gamma_i}{\alpha_i} \leq \frac{w_B}{b_i v_i}$$

In the case of a quota ($\psi_i^A > 0$), the shadow price of animal production is lower than the market price ($\alpha_i < v_i$) and since $\gamma_i \leq w_B/b_i$, the direction of inequality (4.23) is undefined. The qualitative results presented in Sections 4.2.3.1 and 4.2.3.2 are summarized in Table 4.1.

	Bounded animal or crop production quota	Crop j is partially consumed on farm and feed is bought	Crop j is entirely consumed on farm and feed is not bought
Crop j	$\frac{\xi_j}{\rho_j} \leq \frac{w_N}{p_j}$	$\frac{\xi_j}{\rho_j} = \frac{w_N}{p_j}$	$\frac{\xi_j}{\rho_j} < \frac{w_N}{p_j}$
Animal i	$\frac{\gamma_i}{\alpha_i} \leq \frac{w_B}{b_i v_i}$	$\frac{\gamma_i}{\alpha_i} = \frac{w_B}{b_i v_i}$	$\frac{\gamma_i}{\alpha_i} < \frac{w_B}{b_i v_i}$

Table 4.1: Comparison of the ratio of shadow and market prices for crop and animal production.

A further postulate of the above analysis is that when no quota applies on either crop or animal production, the interval in which the numerical value of γ_i is found can be defined as a function of model parameters:

$$\frac{p_j}{c_{ij}} \leq \gamma_i \leq \frac{w_B}{b_i}$$

The γ_i shadow price reflects the marginal value of one additional nutrient unit for the i -th animal activity that is better supplied by feed produced on-farm than by feed purchased ($\gamma_i \leq w_B/b_i$). At the same time, when no quota applies, the farmer assigns a higher marginal value to crop j when it is used as an intermediate product than if it was sold on the market ($C_{ij} > 0$ and $\gamma_i \geq p_j/c_{ij}$).

4.2.4 Numerical method for estimating shadow prices

The previous discussion reveals that the two-step process for solving the nonlinear model leads to the optimal solution when (i) there is no production quota, (ii) crop output is entirely or partly sold on the market and (iii) nitrogen originates partly or entirely from marketed mineral fertilizers. When these conditions do not hold, the shadow price ratios ξ_j/ρ_j and γ_i/α_i may differ from the

market price ratios w_N/p_j and $w_B/(b_i v_i)$ respectively. Focusing on the crop production side, this result reveals that the calculation of nitrogen input and the derived yield according to equation (4.18) may lead to non-optimal values, initially at the plot level, and consequently at the farm level when the basic LP model is solved. Therefore two types of cumulative distorting effects can be identified, namely the intensive effect due to non-optimal yield and input use, and the extensive effect due to the “wrong” land allocation as a consequence of non-optimal results regarding crop profitability.

In order to solve the optimization program without resorting to nonlinear algorithms, which may lead to numerical problems in large models like AROPAj, we propose the following iterative process:

1. We initiate the numerical process by using crop and nitrogen market values p_j and w_N as a proxy measure of the model’s “true” shadow prices ρ_j and ξ_j respectively. From equation (4.18) we can solve for the optimal input use n_j^0 which leads to a yield of r_j^0 for every crop j . By replacing n_j^0 and r_j^0 in the final model we can use linear programming to obtain the optimal solution (gross margin $-\pi^0$) and the shadow prices ρ_j^0 and ξ_j^0 .
2. We repeat the process by inserting ρ_j^0 and ξ_j^0 in equation (4.18) which results in nitrogen use n_j^1 and yield r_j^1 . We then solve the model with the estimated n_j^1 and r_j^1 parameters and obtain π^1 , ρ_j^1 and ξ_j^1 .
3. At iteration t we solve equation (4.18) for every crop j using the shadow prices ρ_j and ξ_j that were produced from iteration $t - 1$. The resulting n_j^t and r_j^t parameters are then introduced in the model which returns an optimal solution π^t and a new set of shadow prices ρ_j^t and ξ_j^t .
4. The iterative process ends when a converging solution is reached. We give two ad hoc definitions of a converging solution. The first is that the objective function (gross margin) remains unchanged in two consecutive iterations, that is, $|\pi^t - \pi^{t-1}| < \varepsilon$, where ε is an arbitrarily small number. The second definition is that the objective function exhibits periodicity: $|\pi^{t+P} - \pi^{t-1}| < \varepsilon$, for all $P \in \mathbb{N}$.

4.3 Results

The computational method which was described in the previous section has been applied to the 1074 farm-types in AROPAj (1074 independent LP sub-models) that cover the European Union².

² For the present study we used FADN data for the year 2002, for which the model includes 101 NUTS-2 regions containing a total of 1074 farm groups at the EU-15 level. NUTS stands for “Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques”. It is the hierarchical classification of European regions used by the EU.

4.3. RESULTS

This version of the model benefits from a large set of N -yield response functions produced by [Leclère et al. \(2013\)](#) with the crop model STICS; a total of 3853 response functions have been estimated and calibrated in each AROPAj farm-type. The modeled crops include soft wheat, durum wheat, corn, barley, sugar beet, potatoes, rapeseed, sunflower and soja.

Preliminary simulations reveal that in many cases the cereals which are produced on the farm also serve as intermediate products, i.e. animal feed. On the contrary, farm-types for which animal manure is the unique source of crop nitrogen are very few. Following the qualitative results on [Section 4.2.3.1](#) we therefore assume that the equation $w_N = \xi_j$ holds for all AROPAj sub-models and focus on the shadow prices ρ_j related to crop production.

[Table 4.2](#) presents the number of farm-types whose gross margin changes between two successive iterations. The optimal (converging) solution is achieved at the first iteration for 692 FTs; for these FTs the market price ratio is sufficient for obtaining an optimal solution since they meet the conditions described in [Sections 4.2.3.1](#) and [4.2.3.2](#). Most of the remaining FTs reach the optimal solution at the second iteration. Finally, only five FTs have not converged after seven runs.

Iteration step	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$	$t=6$	$t=7$
Converging LPs	692	1050	1067	1068	1069	1069	1069
Non converging LPs	382	24	7	6	5	5	5

Table 4.2: Number of farm types for which LP solution changes when $t - 1$ step shadow prices replace market prices at step t ($1 \leq t \leq 7$).

The results in [Table 4.2](#) are also illustrated in the charts of [Figure 4.1](#). More precisely, each chart presents the frequency distribution of the deviations in average gross margin per hectare at each iteration step for all 1074 FTs in AROPAj. For example, after the initial iteration (that is, passing from $t = 0$ to $t = 1$) the frequency distribution of the deviations for the 382 FTs that do not converge is right skewed with a mode which is positive and close to zero. The gross margin deviations are also numerically large, amounting at almost 60 €/ha for individual FTs, which corresponds to about 6% of the average European gross margin of 1000 €/ha. After two steps, the gross margin of most FTs is stable except for 24 LPs, whereas only 7 LPs remain unstable after 3 iteration steps. The gross margin deviations are now quite low (lower than 1 €/ha) except for one LP with a deviation of 7 €/ha. After four steps the process evolves towards an oscillatory system for 5 LPs.

For more information see Regulation (EC) No 1059/2003.

CHAPTER 4. IMPROVEMENT OF A BIO-ECONOMIC MATHEMATICAL PROGRAMMING MODEL IN THE CASE OF ON-FARM SOURCE INPUTS AND OUTPUTS

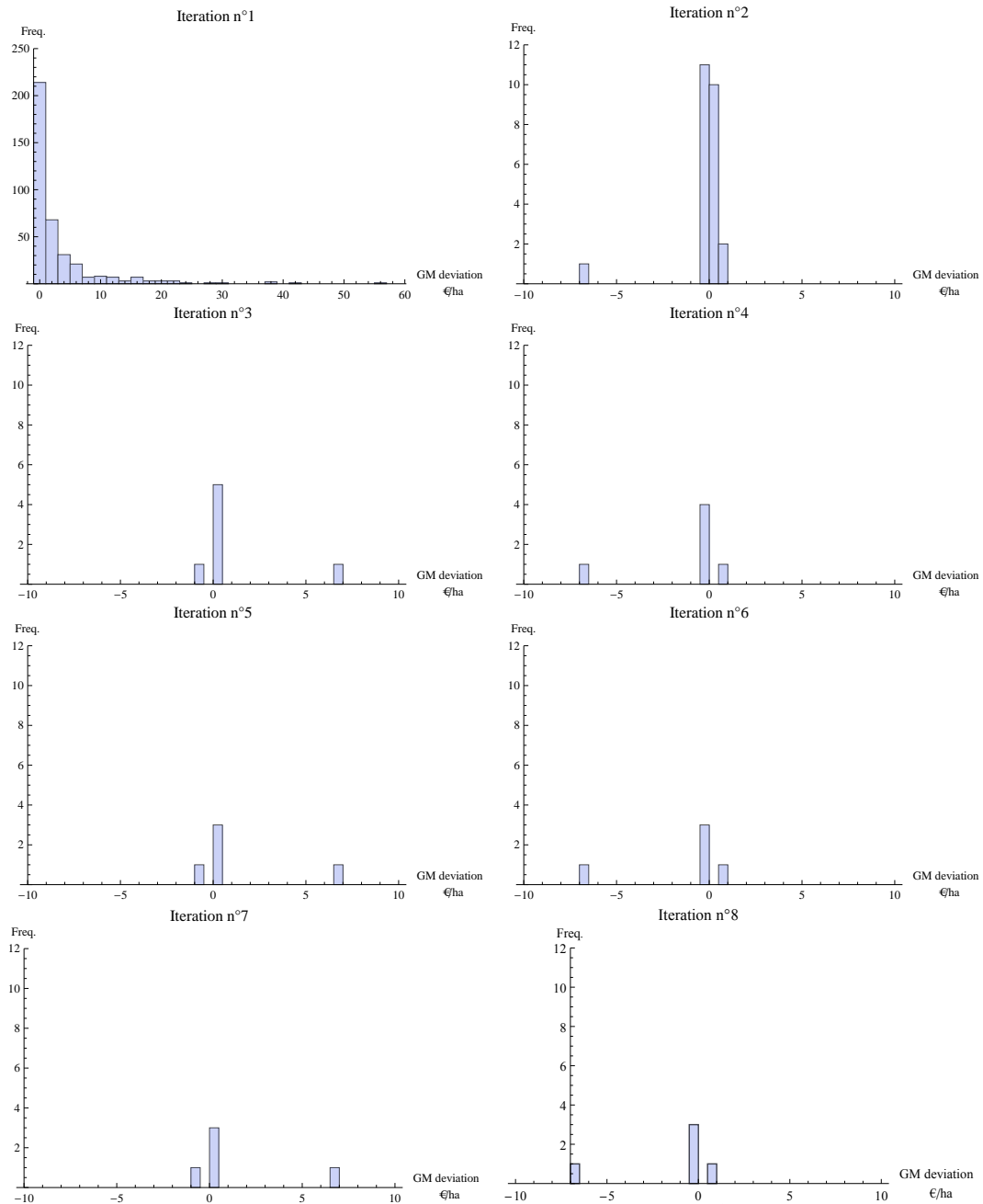


Figure 4.1: Frequency distribution of gross margin deviation Δ^t at iteration step t among the 1074 AROPAj FT s ($\Delta^t = GM_k^t - GM_k^{t-1}$, when k denotes the FT).

4.3. RESULTS

The iterative process of solving the model using the calculated shadow prices from the previous step implies a numerical difference between the initially calculated gross margin (at $t = 0$) and the optimal solution achieved when the objective value remains unchanged between two iterations. Although the average gross margin difference between $t = 0$ and $t = 7$ amounts only at 0.07%, this small value hides significant deviations for a number of FTs, as shown in [Figure 4.2](#).

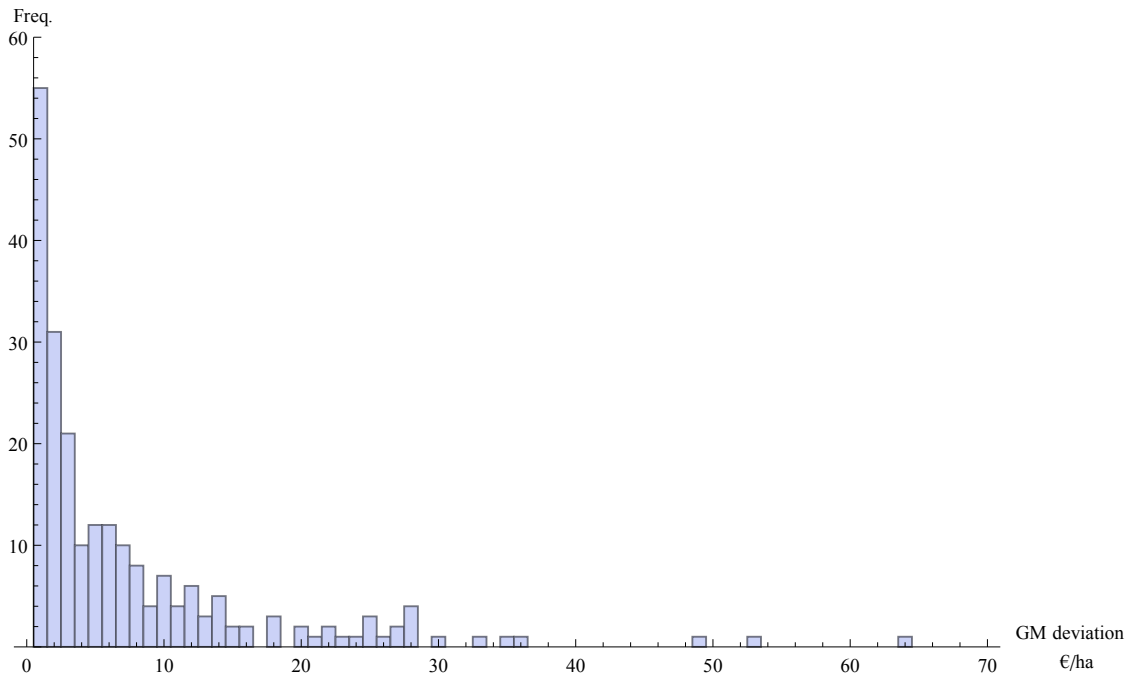


Figure 4.2: Distribution of gross margin differences between preliminary simulations ($t = 0$) and simulations at $t = 7$.

Looking further into the iterative process it is interesting to examine the variations in agricultural output in each step. [Figure 4.3](#) presents the output variations for cereals that can be used on-farm as animal feed and shows that only the first iteration produces a significant aggregate output change with respect to the previous optimal solution. Indeed, the aggregate difference in animal feed expenses between iterations $t = 0$ and $t = 1$ decrease by 0.7%, as a result of an increase in the production of durum wheat by 2.1%, of soft wheat by 3.8%, of barley by 3.0% and of grain corn by 1.5%. Additionally, after the fourth iteration there is no oscillatory change in production. This specific result reveals that the gross margin variations depicted in [Figure 4.1](#) result from changes in crop use (on-farm use versus sold on the market, consequently leading to changes of monetary costs for buying animal feed).

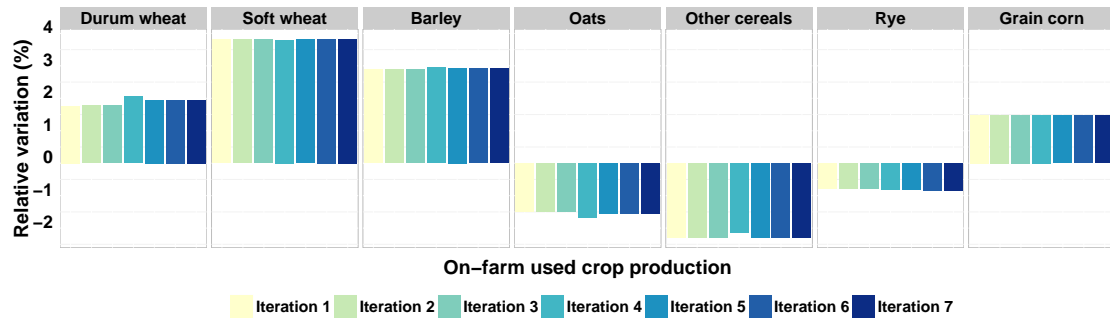


Figure 4.3: Relative variation of the European on-farm used cereals production compared to the initial estimates ($t = 0$).

Figure 4.4 presents the cross-matching of market and shadow prices for soft wheat and barley for all AROPA_j farm types across the EU (soft wheat and barley is cultivated by 693 FTs and 674 FTs respectively). It demonstrates that shadow price is always greater than market prices ($\rho_j > p_j$) when crop j is totally or partly used on-farm as an intermediate product (209 and 292 farm types for soft wheat and barley). For the remaining farm types, shadow prices are equal to market prices ($\rho_j = p_j$) which means that crop j is entirely sold on the market (403 and 382 FTs for soft wheat and barley respectively).

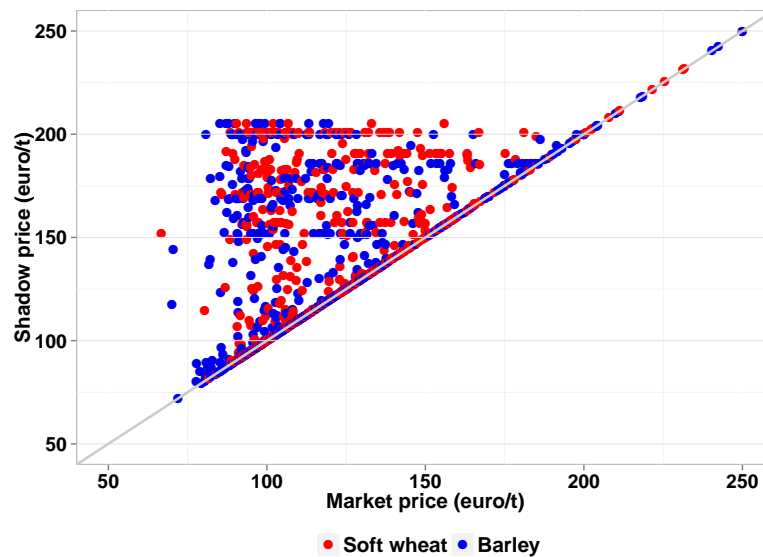


Figure 4.4: Comparison of market and shadow prices of soft wheat and barley in AROPA_j farm types.

4.4 Conclusion and perspectives

A computational method is developed for finding the optimal solution to the European agricultural supply model AROPAj which is a complex farm-based optimization model that integrates nonlinear representations of decision variables. The computational method relies on the estimation the model's "true" shadow prices and is in effect an extension of a two-step procedure for finding an optimal solution to nonlinear farm activity models. This two-step procedure involves, initially, the estimation of the optimal input use, and then the optimal production level of each activity, and, although it facilitates model solving by maintaining a linear programming framework, it also has some serious shortcomings that the proposed computational method attempts to overcome.

In order to identify when the two-step procedure returns an optimal solution, we analyze the optimality conditions for a general farm model that includes representations of crop and livestock production and distinguishes between mineral and organic nitrogen input for crops, as well as between on-farm produced feed and feed bought from the market. We show that when the market provides the "correct" value for shadow prices of agricultural by-products and on-farm recycled outputs, the optimal productivity level for every animal or crop activity can be calculated as a ratio of model parameters, namely market prices for inputs and outputs. However, when crop output is entirely re-used as feed, or when manure is the only source of nitrogen input for the farm's crops, the parameter ratios cannot provide an optimal solution since the first order conditions related to the optimal productivity level also include the shadow prices of certain constraints. The same problem arises when a quota applies for either crop or animal production.

The proposed method thus involves an iterative process of solving the model and re-estimating those shadow prices until a converging solution is found. More precisely, at the iteration step $t + 1$ we use the shadow prices estimated at iteration t in order to re-initiate the two-step solving procedure. The case study involving the AROPAj model shows that the iterative method is operational in the sense that (i) it runs, (ii) it reaches a converging solution after only a few runs for almost all farm-types included in the model, and (iii) when the process converges towards oscillating solutions, the deviation amplitude is numerically small. We should note that even if the case study was limited to the crop supply side, the method can be applied to all nonlinear economic representations in a farm activity model, for example in animal production functions.

Although the iterative procedure primarily aims at solving a nonlinear optimization model, it also provides an interesting and efficient method for the estimation of the "true" shadow prices of agricultural inputs and outputs, especially for emblematic products like cereals. A straightforward extension of the proposed methodology is the estimation of shadow prices of fodders and pastures for which no market, and consequently, no price exists. The estimation procedure in this case can be initiated by assuming any arbitrary parameter ratio for the first iteration. An interesting question that arises is whether different initial points affect the convergence of the objective function.

Preliminary results from on-going research on fodders and pastures affirm that a single converging solution is attained after a number of iterations that seems to be a function of the euclidean distance between the initial point from the optimal shadow price ratio. Thus, when starting from a zero price, a converging solution requires a larger number of iterations than in the case of marketed crops.

Acknowledgments

The first author is supported by the French agency ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) and the French public research institute INRA (Institut national de la recherche agronomique). The research leading to these results has been conducted as part of the AnimalChange project which received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n° 266018. The authors would like to gratefully acknowledge the financial support brought by the European Community's Seventh Framework Programme. This research is part of the thesis work of Parisa AGHAJANZADEH-DARZI, who acknowledges financial support by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) and the National Institute for Agricultural Research (INRA).

Appendix: List of model variables and parameters

Indices :

i animal

j crop

Primal variables :

S_j crop and fodder area of crop j (ha)

Y_j marketed part of the crop production of crop j (t)

n_j generic nitrogen input related to crop j (t/ha)

n_j^{min} bought mineral nitrogen used by crop j per area unit (tN^{min}/ha)

n_{ij}^{org} organic nitrogen from animal i and used by crop j (tN^{org}/ha)

N_j^{min} bought mineral nitrogen used by the j -crop (tN^{min})

N_{ij}^{org} organic nitrogen per area unit originating from animal i and used by crop j (tN^{org})

A_i quasi-fix livestock (LU)

B_i bought feed for the i -th animal activity (t)

C_{ij} on-farm use of crop j as feed for the i -th animal activity (t)

f_i generic feed requirement per LU (t/LU)

G_i animal production (t)

Dual variables :

λ land allocation limited by the UAA (k€/ha)

ρ_j crop product use (k€/t)

ξ_j minimal nitrogen requirement for crops (k€/tN^{min})

η_i organic N-availability due to livestock (k€/tN^{org})

γ_i feed requirement (k€/LU)

α_i use hold by production (k€/t)

ψ_j^C crop production quota (k€/t)

ψ_i^A animal production quota (k€/t)

ε_j manure spreading limit (k€/ha)

σ_j area limit for rotation (k€/ha)

δ^+, δ^+ range of variation of livestock (k€/LU)

β^X generic dual variable related to the generic X primal variable (k€/unit_X)

Parameters and functions :

$r_j(n)$	nitrogen-yield function (t/ha)
$g_i(f)$	feed-product function (t/LU)
L	Utilized Agricultural Area (ha)
p_j	crop prices (k €/t)
w_N	nitrogen price (k€/tN)
x_j	other variable charges (k€/ha)
v_i	animal product value (k€/LU)
w_B	feed price (k€/t)
c_{ij}	feed nutrient content of crop (t/LU)
b_i	bought feed nutriment (t/LU)
a_i	nitrogen output per livestock unit (tN ^{org} /LU)
Q_j^C	crop production quota (t)
Q_i^A	animal production quota (t)
s_j	crop area limit (%)
e_j	manure spread limit (tN ^{org} /ha)
z	livestock adjustment ratio (%)
A_i^0	reference livestock (LU)
d_{ij}	N-mineral equivalent of organic N (-)

4.4. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Bibliography

- Arslan, A. (2011). Shadow vs. market prices in explaining land allocation: Subsistence maize cultivation in rural Mexico. *Food Policy*, 36, 606–614.
- Arslan, A. & Taylor, J. E. (2009). Farmers' Subjective Valuation of Subsistence Crops: The Case of Traditional Maize in Mexico. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(4), 956–972.
- 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 and 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.
- De Janvry, A., Fafchamps, M., & Sadoulet, E. (1991). Peasant Household Behavior with Missing Markets: Some Paradoxes Explained. *The Economic Journal*, 101(409), 1400–1417.
- Dyer, G. A., Boucher, S., & Taylor, J. E. (2006). Subsistence Response to Market Shocks. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(2), 279–291.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90–98.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Yaisawarng, S. (1993). Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. *The Review of Economics and Statistics*, 75(2), 374–380.
- Galko, E. & Jayet, P. A. (2011). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.
- 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(1-2), 68–82.

- Humblot, P., Leconte-Demarsy, D., Clerino, P., Szopa, S., Castell, J. F., & Jayet, P. A. (2013). Assessment of ozone impacts on farming systems: A bio-economic modeling approach applied to the widely diverse French case. *Ecological Economics*, 85, 50–58.
- Jayet, P. A. & Labonne, J. (2005). Impact d' une réforme de la Politique Agricole Commune par le découplage. *Économie et Prévision*, 167(1), 101–116.
- Jayet, P. A. & Petsakos, A. (2013). Evaluating the efficiency of a uniform N-input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling and Assessment*, 18(1), 57–72.
- Leclère, D., Jayet, P. A., & de Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level Autonomous Adaptation of European Agricultural Supply to Climate Change. *Ecological Economics*, 87, 1–14.
- Piot-Lepetit, I. & Vermersch, D. (1998). Pricing Organic Nitrogen Under The Weak Disposability Assumption: An Application to the French Pig Sector. *Journal of Agricultural Economics*, 49(1), 85–99.
- Shaik, S., Helmers, G. A., & Langemeier, M. R. (2002). Direct and indirect shadow price and cost estimates of nitrogen pollution abatement. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 27(2), 420–432.
- Singh, I., Squire, L., & Strauss, J. (1986). The Basic Model: Theory, Empirical Results, and Policy Conclusions. In I. Singh, L. Squire, & J. Strauss (Eds.), *Agricultural Household Models: Extensions, Application and Policy* chapter 1, (pp. 17–47). Baltimore MD: The Johns Hopkins University Press.
- Taylor, J. E. & Adelman, I. (2003). Agricultural Household Models: Genesis, Evolution, and Extensions. *Review of Economics of the Household*, 1, 33–58.

Chapter 5 :

Valorisation économique des prairies et fourrages sous l'effet du changement climatique

Ce travail a pour but la valorisation économique des prairies et des fourrages et la prise en compte des interactions entre ces systèmes et le changement climatique. La méthodologie porte sur le couplage d'un modèle économique de l'offre agricole européenne (AROPAj) avec un modèle mécaniste biogéochimique de simulation d'un écosystème prairial géré (PaSim).

BIBLIOGRAPHY

Chapter 5

Potential effects of climate change on the European grassland production: Impact assessment of far future

Aghajanzadeh-Darzi, P.^{a,b,*}, Laperche, S.^c, Martin, R.^c, Jayet, P.A.^a

^a. INRA, UMR 210 Economie Publique INRA-AgroParisTech, 78850 Grignon, France

^b. ADEME, French Environment and Energy Management Agency, 49004 Angers, France

^c. INRA - UR0874, Grassland Ecosystem Research Unit, Clermont-Ferrand, France

Abstract

Forage systems and more widely grasslands are highly complex and missing basic information on market prices and productivity which is subject to large variability; it will thus be more difficult to estimate their economic value. This work is intended to estimate the economic value of grass and to assess the impact of climatic variations on grassland-livestock production systems, taking into account the various environmental and climatic factors. To do so, the grassland bio-geochemical model PaSim has been used to simulate grass yield responses to nitrogen input and then has been coupled with the economic farm type supply model AROPAj, aims at estimating the monetary value for grass. This methodology allowed us to better predict and identify the effects of climatic variability on grassland and farm systems as well. This approach has been used at the European scale under for two extreme IPCC-AR4 climate scenarios (A2 and B1). Results show a significant increase in grassland cover overtime, when taking grass simulated production functions into account. Accordingly, due to decreases in feed expenses, farmers have the possibility to increase their livestock numbers, which affects negatively the overall GHG emissions for all climate change

scenarios considered.

Keywords : Climate change; Grass economic value; Bioeconomic farm model; Mathematical programming; Biogeochemical grassland model; Shadow prices

Abbreviations : FADN: Farm Accountancy Data Network; AROPAj: agro-economic farm model; PaSim: biogeochemical grassland model; EU: European Union; GHG: Greenhouse gas emissions; IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; SRES: Special Report on Emissions Scenarios; AR4: IPCC Fourth Assessment Report on Climate Change

5.1 Introduction

This study focuses on two agricultural sub-sectors namely grassland and livestock systems. At the European scale, an important part of the agricultural area is devoted to mown grassland and pasture -covering almost 40% of the total agricultural land (OCDE, 2011). The role of grassland as an important economic and environmental assets has been well documented in many studies (*e.g.* Carlier et al., 2009; Hopkins et al., 2008). Grassland systems have essential functions on ecosystem service as well as supply and animal feed (OCDE, 2011; Smit et al., 2008; Gilmanov et al., 2007; Soussana & Luscher, 2007; Calanca & Fuhrer, 2005). Livestock system production as well is a key factor of the agricultural economy and its land use, through the grasslands, the production of fodder crops and other feedstuffs (FAO, 2002). Livestock production accounts for 41% of the value of the European agricultural output and represents 1.2% of the European gross domestic product (GDP) (Leip et al., 2010).

Agricultural systems has been affected and will continue to be affected by interacting factors such as climatic change which is one of the main challenges to socioeconomic and natural systems (Soussana & Luscher, 2007; Luscher et al., 2005; Stampfli & Zeiter, 2004). Livestock production is an important source of greenhouse gases (GHG) through the emission of nitrous oxide (N_2O) from manure and methane (CH_4) mostly from enteric fermentation, but concurrently, it is affected by global warming. Climate change impacts directly livestock systems by affecting animal health and growth and indirectly by modifying production of animal feed and the productivity of forages (Rotter, 1999). Grassland systems are as well affected by climate change specially through an increase of temperature combined with an decline in summer rainfall level, which lead to reduce soil moisture and consequently grass production (Brisson & Levrault, 2010), while grassland systems have been reported to compensate greenhouse gas (GHG) emissions from livestock and agriculture sectors, through the carbon sequestration (*e.g.* Soussana et al., 2004; FAO, 2010; Soussana et al., 2010). The impacts of climate change on agricultural systems vary widely depending on the region. In Northern Europe, climate change will result in increasing crop yield and developing the production of new crop varieties. On the contrary, severe droughts and extreme meteorological

events in Southern Europe will affect negatively the agricultural systems (Olesen & Bindi, 2002). Reviews of the literature show that applying some mitigation and adaptation practices could decrease climate change damage to grass (Soussana et al., 2002; Cairistiona & Christopher, 1996) and agricultural systems (Olesen & Bindi, 2002; Tubiello & Fischer, 2007; Reidsma et al., 2009; Verchot et al., 2007; Bryan et al., 2011; Leclère et al., 2013) and could also provide opportunities to increase the resilience of agricultural systems.

From an economic perspective, grass production is still not a traded commodity and no information exists on market prices and on the effects of climate on grassland production, although it is widely used as feedingstuffs for livestock and can thus affect farm costs. In this paper, we intend to estimate the monetary value for grassland and study how will this affect the farming system economy. To our knowledge, few published studies were performed on this problem. Some studies have ascribed the economic value of grass production and their effects on ruminant production systems (e.g. Doyle & Elliott, 1983), while their effects on greenhouse gases emissions and land use change at both farm and the EU level have not been considered. Furthermore, as the value of grass production may vary markedly under different climatic conditions, some studies estimate the agronomic climate change impacts on grassland systems (e.g. Graux et al., 2013), without taking into account the monetary value of these products and their economic and environmental impacts on farming systems. To overcome these issues, the economic value of grass production has been calculated, thanks to the AROPAj economic model, and has been used to address the future challenges for grassland systems facing the global climatic change and its impacts on land use change, farm profitability and greenhouse gases emissions. Furthermore, the present study challenges the effect of other on-farm used cereal production on global warming and assess their effects on farming systems, at the regional scale across the fifteen Member States of the European Union (hereafter referred to as EU-15).

5.2 Material and methods

This study aims at completing the methodology developed by Godard et al. (2008) which models the nitrogen-yield functions for major agricultural crops in the EU (soft wheat, durum wheat, barley, sunflower, sugar beet, potatoes, corn and rapeseed) by linking STICS crop model to the AROPAj model. The basic methodology has been applied in several studies (e.g. Humblot et al., 2013; Leclère et al., 2013), has not yet been applied to grasslands, mainly because of lack of data related to grass market prices and yields. In order to integrate and to quantify the potential impacts of climate change on the grassland-breeding systems, we develop grass productivity database by linking the PaSim grassland model to the AROPAj agro-economic model. A brief description of these models and of the modelling framework are provided in the following section.

5.2.1 Underlying models description

5.2.1.1 The AROPAj economic model

The [AROPAj](#) model is an agro-economic European agricultural supply side model based on mathematical programming tools. It represents a wide range of farm type categories and covers a broad variety of agricultural activities. Each modelled farm type is able to respond to the agricultural policy instruments as well as the EU's Common Agricultural Policy (CAP). For a given economic situation (*i.e.* a set of prices, taxes, policy measures, etc.), it provides an assessment of the type and amount of the both marketed and intermediate agricultural productions at different scales from the farm to the EU level (for model description and CAP implementation see [Galko & Jayet \(2011\)](#); for application related to the environment, see [De Cara et al. \(2005\)](#); [Durandeu et al. \(2010\)](#); [De Cara & Jayet \(2011\)](#); [Petsakos & Jayet \(2013\)](#); [Humblot et al. \(2013\)](#); [Leclère et al. \(2013\)](#)).

The Farm Accountancy Data Network (FADN)¹ is the main data source of the AROPAj model, which collects economic information based on a sample of thousands of farmers across the European Union. Among others, the AROPAj variables include the crop area, the animal stocking rates per animal type, the quantity of meat, milk, grains or other crop products, the quantity of animal feed purchased, and the opportunity cost of quasi fixed factors (land, livestock, milk and sugar beet quotas, etc.). The FADN delivers few information about product destination (poorly differentiating on-farm recycled and marketed outputs). Major estimates of aggregated outputs are correctly delivered by the model. AROPAj model includes also a greenhouse gases calculation module, based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1 guidelines ([Houghton et al., 1996](#)), inventorying around twenty sources of CH_4 and N_2O from livestock and arable farming. Methane is mostly produced by enteric fermentation of mono-gastric livestock, manure management, rice cultivation and nitrous oxide is mostly produced by agricultural soils as a result of mineral nitrogen fertilizer application, manure application as well as soil incorporation of crop residues.

AROPAj calibration uses estimated crop yields and leads to estimate grass yields. Regarding crop yields, micro economic information exists in the FADN database. When products are mainly used on-farm by farmers (*e.g.* grass), there is lack of information concerning the crop productivity and final monetary value. The AROPAj calibration process leads to estimate fodder/meadow yields (at the representative farm type level). In addition, as mentioned above, nitrogen to yield functions are calibrated for a large set of “crop-farm group” couples (several thousand at the EU level, see [Leclère et al. \(2013\)](#)). Correlated *N*-losses are simultaneously estimated (using STICS crop model outputs). The work presented here reports the development of nitrogen to yield functions for grass

¹http://ec.europa.eu/agriculture/rica/index_en.cfm., FADN is still the only representative and reproducible source of micro-economic data covering EU farming systems, even if costs and goals are widely questionable and discussed ([Vrolijk et al., 2004](#)).

in Europe. The AROPAj version used in the study is based on the FADN census data related to 2002, which covers 101 FADN regions of the EU-15 and includes 1074 modelled farm groups.

5.2.1.2 The PaSim grassland biogeochemical model

The Pasture Simulation model (PaSim) is a process-based biogeochemical grassland model, which simulates fluxes of carbon, nitrogen, water and energy at the soil-plant-animal-atmosphere interface for managed grasslands at the plot scale and net primary productivity and forage intake by domestic herbivores (Riedo et al., 1998, 1999, 2000).

Plant sub-model of PaSim is based on the Hurley Pasture Model (Thornley & Verberne, 1989). PaSim was developed to simulate the meat and milk production of cattle in response to different climate condition and management. It has been used to simulate the impact of climate change on grasslands across a range of soil-climate situation and grazing managements. A fixed legume fraction in the grasslands is assumed in PaSim model, in which vegetation is represented by a mixed sward, grasses and legumes co-existing. Animal processes are simulated at pasture (not in the barn). PaSim has been used to simulate greenhouse gas fluxes over grasslands and to examine the role of grasslands in the European greenhouse gas Budget (Schmid et al., 2001; Vuichard et al., 2007a,b). The version 5.3 of model has been used in this study and the model was driven by hourly means for temperature, precipitation, global radiation at the EU-15 scale.

5.2.2 Introduction of grass yield function in the AROPAj model

The crop yield function methodology has been extended to grass and fodders, and PaSim sourced functions related to these production are implemented in the AROPAj model. This allows to improve the AROPAj outcomes sensitivity to the economic value of grass production. In order to reach this goal, a grass data base is built up at the European scale, thanks to the PaSim model which provides input data for economic model.

The PaSim model was run with taking account of different type of information in line with the nitrogen (*N*) management, climate data and vegetation type (Table 5.1): (i) *soil properties database*, in which a medium soil is extracted from the Harmonized World Soil Database, with the 0.25 deg mean percent sand/silt/clay/organic/gravel, USDA (US Dpt of Agriculture) soil texture class, pH and bulk density of topsoil and subsoil based on the Harmonized World Soil Database (1/120 deg); (ii) three types of *nitrogen management* which is generated by the CAPRI model² and relying on three nitrogen intensity levels (low, medium, high) which is region dependent; (iii) *climate*

²The Common Agricultural Policy Regional Impact Analysis (CAPRI) model is an EU-wide agricultural sector model.

5.2. MATERIAL AND METHODS

data, based on an interpretation of the two extreme marker story-lines: “A2” and “B1” of the Fourth Assessment Report (AR4) of the IPCC. The baseline year was fixed at 1976-2005 (hereafter referred to as “CTL”), under historical CO_2 concentration of 352 ppm. Two futures scenarios were constructed for the far future (“ H_2 ”) time slice (2071-2100), with CO_2 concentrations of 724 ppm for the most extreme (“A2”) scenario, and with CO_2 concentrations of 533 ppm for the other one (“B1”)(Leclère, 2012); and (iv) concerning *vegetation type*, the basic settings of PaSim has been used, which was originally obtained for a productive grassland intensively managed rye-grass/white clover mixture. The model represents average vegetation consists of a set of species.

Input variable	Definition
Grassland type	Permanent and temporary, mixture of rye-grass/white clover
Climate data	Three IPCC SRES emissions scenarios: CTL, A2H2 et B1H2
Soil characterization	Based on FAO database
Quantity and type of nitrogen inputs	Three levels of nitrogen inputs: low, medium, high; two nitrogen sources: mineral and organic

Table 5.1: Description of input variables of PaSim model.

The PaSim model provides the grass yield expressed as dry matter for each geographical grid unit of the European union, differently from the AROPAj model in which crop yields are used and expressed as row material content units. The PaSim sourced dose-yield functions of nitrogen replace the previously calibrated yield values for fodder beet, fodder maize, permanent grassland, temporary grassland and other meadows.

This methodology is considered as a real innovation in terms of calculation, which extends and enhances the work done in Aghajanzadeh-Darzi et al. (2012). The iterative two-step computational process developed by Aghajanzadeh-Darzi et al. (2012) (see also Chapter 4 of thesis) for crops is now extended for fodder and grass productions. This process was previously developed for the case of totally on-farm recycling of a crop output (typically the case of a cereal totally used on-farm for feeding farm animals). In this case, the optimal solution leads the output shadow price³ to replace the market price in the calculation of the yield and of the nitrogen amount. The linear programming model provides such shadow prices, while these shadow prices are requested as inputs for the yield and nitrogen-amount calculation. The iterative part of the process leads to use at any iteration shadow prices delivered at the previous one. We start this iterative process by market prices in place of shadow prices.

At last, let us briefly recall the two step process: it is first devoted to the yield and nitrogen-input calculation referring to optimal first order condition (when the optimal nitrogen amount is strictly positive, the nitrogen to yield productivity equals the price ratio), and secondly the use of yields and inputs, which are now assumed to be optimal at the plot level, allows the linear programming

³Opportunity cost of grass production for a farm, computed where no market price is available.

model to provide the general optimal solution.

Implementation of PaSim sourced response functions consists in a two-side extension of what was realized with STICS crop model sourced functions related to marketed crops: (1) at the first iteration, when no market price exists, fodder prices are taken as zero-value; (2) the addition of many response functions and the complex interaction between farming and breeding activities might lead linear program solutions to be unstable. Finally, the application to the entire AROPAj model appears satisfying in the sense that convergence is obtained, but after a number of iterations greater than was requested when only marketed crop response functions were implemented in the model.

Yield functions are then provided for all AROPAj farm types. More than 5000 yield functions are estimated for the 1074 AROPAj farm types. Runs of the AROPAj models are based on the iterative process explained above. Therefore the AROPAj economic model was fed with agronomic information related to grass by the PaSim model, in which grass yields are not calibrated in the AROPAj model and are produced by PaSim model. That is different from the coupling of STICS with AROPAj model (*e.g.* Godard et al., 2008; Leclère et al., 2013) in which crop yields, provided by the STICS model, are calibrated in AROPAj and the N -yield response function selection depends on the biophysical and economic properties of each crop on every farm type.

The AROPAj model was run for the preset climate as well as for two IPCC far future climate scenarios, to study the impact of climate change on grassland systems. Two added assumptions have been considered for all scenarios: (i) we implement the CAP reform agreed in 2003 and applied after 2005; (ii) livestock may be optimally adjusted within the range of $\pm 15\%$ of the reference level (providing the possibility of farmers to adjust their livestock-related capital number in response to policy and climate changes). Table 6.2.3 lists the scenarios studied.

Name	Grass N -yield functions	Climate scenario	Year	CO_2 concentration (ppm)
CTL	✓	Current climate scenario	1976-2005	352
A2H2	✓	Far future pessimistic scenario	2071-2100	724
B1H2	✓	Far future optimistic scenario	2071-2100	533

Table 5.2: Overview of applied scenarios.

5.3 Results and discussion

This section focused on the results of applying grass nitrogen-yield functions into AROPAj model. We first analyze the simulated shadow prices and yields related to forage, as outcomes of sim-

ulations based on the AROPAj-PaSim model. Then, we present their effects on the European agricultural systems in terms of environmental and economic impacts.

5.3.0.1 Grass monetary value and yield sensitivity to climate evolution

The shadow value related to grass production has been provided for the five types of grass and fodders implemented in the AROPAj model and existing in the farming systems across the EU-15. Estimates of such prices can be used as valuation indicator of such products which are not commonly marketed. Grass shadow prices -like other crop prices- may significantly change and depend on climatic trends (Table 5.3). We estimate that permanent grass shadow prices will increase more than the other types of grass, by 5.6% and 13% increases respectively for A2H2 and B1H2 scenarios compared to present (CTL) value.

Grass variety	Shadow price (€/t)			Difference(%)	
	CTL	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2
Beet forage	9.5	8.5	9.9	-10.4	4.2
Maize forage	28.8	32.4	24.0	12.3	-16.8
Permanent grassland	24.7	26.1	27.9	5.6	13.0
Temporary grassland	9.1	9.0	7.6	-1.2	-16.6
Other meadows	22.4	20.2	19.3	-9.9	-13.9

Table 5.3: Economic value of five varieties of grass under different climatic scenarios (value expressed in €/t) and relative shadow price difference between two future climate scenarios compared to present (CTL) scenario (expressed in %).

Projected increases in atmospheric CO_2 concentrations in far futures lead to increasing grass yield. Figure 5.1 illustrates the European grass yield and total nitrogen input under different climatic scenarios, when grass nitrogen-yield functions are taken into account.

These results are consistent with results provided by other studies (e.g. Kimball et al., 2002; Sousana et al., 2002) reporting higher grass productivity under rising CO_2 concentrations; provided that precipitation does not drastically decrease. We predict that grass yield increases more significantly under the B1H2 scenario with modest rises in temperature and higher amounts of precipitation, compared to A2H2. However, the average nitrogen fertilizer use per hectare has increased in both future scenarios (by 5.9% and 6.8% standing respectively for A2H2 and B1H2) compared to CTL. Future climate conditions seems to be more favorable for fodder beet, permanent and temporary grasslands (see Figure 5.1).

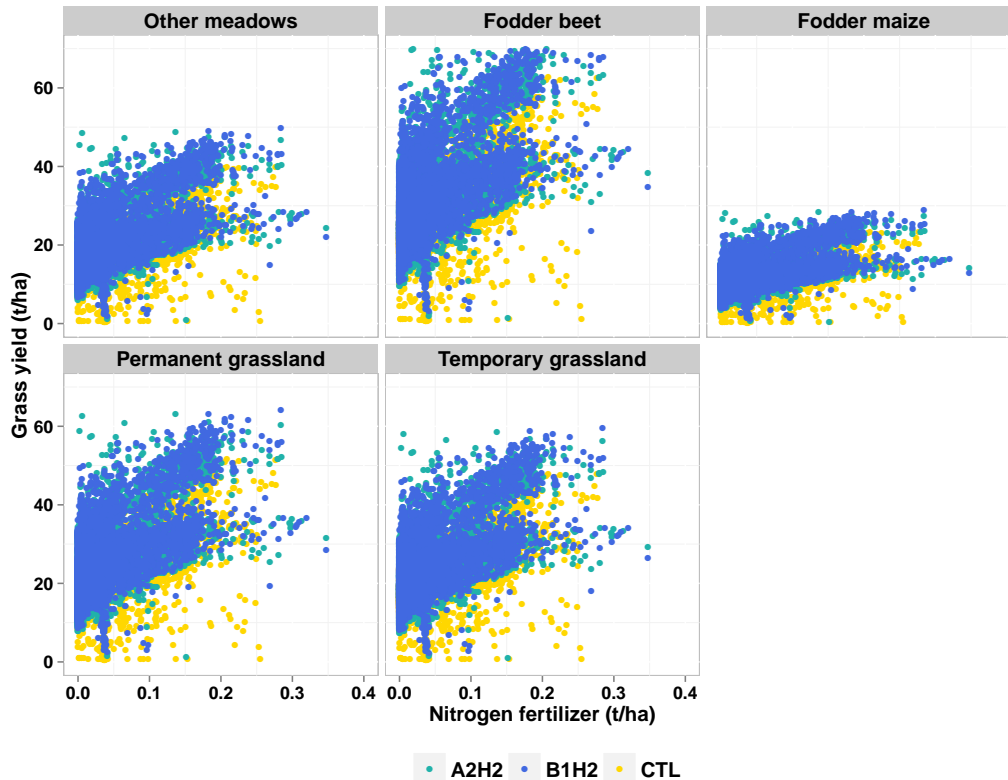


Figure 5.1: European average distributions of changes in grass yield (row material in tonnes per hectare) under different climatic scenarios.

5.3.1 Land cover change across European regions

Grass holds an important part of land use in Europe. Estimated economic value of grass productivity and grass *N*-yield functions lead us to better assess the part of the agricultural land devoted to grass production.

Figure 5.2 presents the detailed relative distributions of land use per EU member State under future climatic scenarios compared to present scenarios (CTL). A significant change in land use is registered in far future. B1H2 scenario seems to be more favorable for grass cover, in which grassland is expected to increase at the expense of crop land. According to our results these changes are less marked at European level (0.9% increase in grassland with a 0.6% decrease in crop cover), while, at the country level more significant changes are observed specially in Austria, Germany, Greece and Luxembourg.

5.3. RESULTS AND DISCUSSION

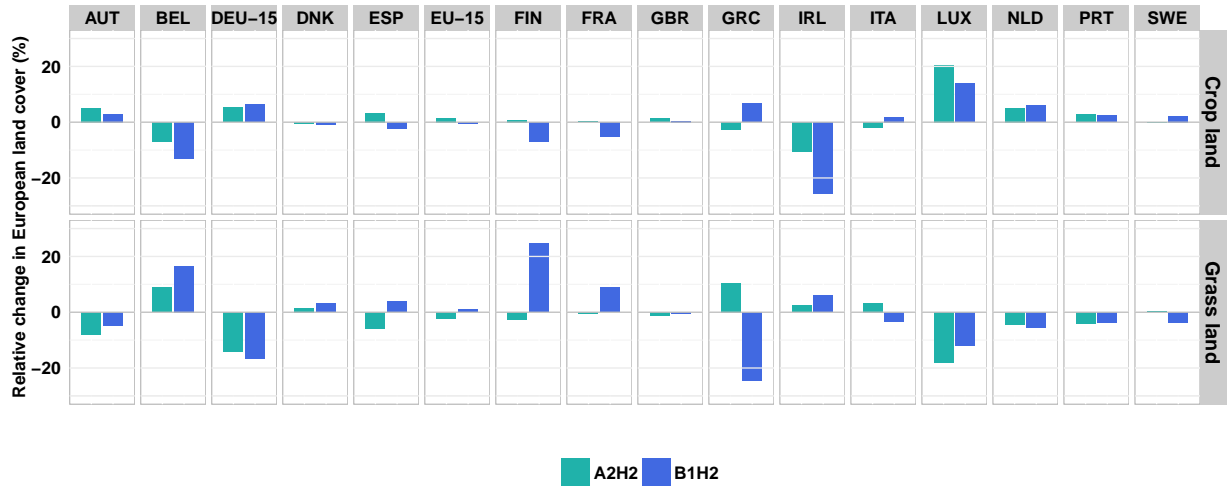


Figure 5.2: European cropland and grassland cover relative changes in future scenarios compared to present (CTL)].

5.3.2 Agricultural productions and farm financial terms

According to our results, grass productivity increases markedly in far future. With an increase of productivity (by respectively 18.7% and 23.5% in A2H2 and B1H2 scenarios at EU level) and area related to grass specially in B1H2 scenario (0.9% en average at EU level), animals have more access to natural grazing and the share of grass in animal feed increases in far future. As a consequence of these changes, animal feed expenditure decreases significantly (respectively by 0.5% and 11.5% in A2H2 et B1H2 scenarios, see [Table 5.5](#)) and the import share of cereals which was previously used as animal feed can be sold on the market (especially for grain corn, durum wheat, see [Table 5.4](#)). Farmers will have the possibility to significantly increase their livestock numbers (LU) in far future respectively by 0.6% and 2.3% in A2H2 et B1H2 scenarios, compared to present (CTL) scenario.

CHAPTER 5. POTENTIAL EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON THE EUROPEAN
GRASSLAND PRODUCTION: IMPACT ASSESSMENT OF FAR FUTURE

Member states	Durum wheat		Soft wheat		Barely		Rye		Corn		Oats	
	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2
BEL	0	0	-23.7	-11.4	-17.1	-14.2	-30.6	-31.8	-13.1	-75.0	-47.5	-70.9
DNK	0	0	78.4	97.9	-52.3	-69.2	8.8	12.5	0	0	86.5	99.0
DEU	0	0	31.2	32.3	10.7	-0.6	-2.6	6.7	27.6	40.8	1.7	-16.7
GRC	22.0	-68.1	-4.2	-78.2	15.1	-25.6	-4.9	-32.6	-38.7	-49.3	0	-100
ESP	56.6	-82.7	100	-17.3	35.4	2.0	21.3	7.6	-4.6	-30.1	8.8	-12.4
FRA	-86.2	-81.5	34.7	-22.7	24.3	8.2	34.8	12.5	-21.0	-63.5	-59.2	-31.5
GBR	0	0	14.6	-28.2	-8.5	-2.7	-3.3	-2.5	0	0	-13.0	-5.6
IRL	0	0	6.7	-10.2	100	17.5	0	0	0	0	0.8	11.0
ITA	-30.4	9.0	40.9	63.9	-4.6	-10.3	-37.3	-24.5	-24.8	-21.8	4.8	-13.0
LUX	0	0	100	0.4	100	-3.7	-58.8	-59.3	15.2	68.2	0	0
NLD	0	0	94.2	64.5	27.4	11.2	-97.1	-31.6	54.4	5.8	44.3	0
AUT	-99.2	4.7	26.8	19.8	-21.3	-45.2	-28.6	-48.1	-14.0	-80.6	0	-4.1
PRT	100	-34.1	84.6	22.0	-55.5	-35.8	-40.7	-23.8	92.9	-25.1	39.5	0
FIN	0	0	100	86.0	23.8	-35.0	100	81.9	0	0	39.5	-9.3
SWE	0	0	34.9	66.7	-38.4	-38.6	-58.2	-85.5	-23.5	-18.3	1.8	35.5
EU-15	-11.0	-46.5	36.3	9.9	0.1	-17.4	-5.3	-1.8	-9.8	-30.3	8.6	-4.6

Table 5.4: Per country detailed change on-farm used crop production expressed in percentages in future scenarios compared to present (CTL).

These changes will concretely affect the profitability of the European farm sector and give rise to farm gross margin per hectare ranging from 1.7% in B1H2 and 3.3% A2H2 compared to CTL. The gross margin of most of European countries change within a range between 3% to 10% (Table 5.5).

Member states	Δ GM (%)		Δ BF (%)		Δ LU (%)	
	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2	A2H2	B1H2
BEL	-1.2	-6.1	-3.1	-6.8	0.9	1.3
DNK	8.0	13.3	-17.2	-22.0	0.3	0.5
DEU	7.4	9.8	-4.3	-5.7	-1.0	-1.2
GRC	-6.5	18.1	4.4	-51.9	0.0	4.4
ESP	-4.0	-11.7	20.3	-4.8	-1.7	1.3
FRA	4.1	-1.4	-11.0	-16.4	2.7	6.2
GBR	1.5	3.6	-13.7	-22.0	0.5	2.0
IRL	-4.5	-6.7	100	100	-7.3	-4.6
ITA	0.0	2.4	-11.5	-12.0	2.2	2.6
LUX	5.5	4.5	-3.1	-2.9	-0.2	0.0
NLD	10.3	-3.4	-3.6	-4.7	0.1	0.0
AUT	31.8	-1.1	-17.6	-17.1	8.3	7.7
PRT	6.2	-4.0	-6.5	-5.7	0.2	1.1
FIN	3.3	11.0	25.8	-20.0	-3.1	3.0
SWE	7.0	11.3	27.9	-30.4	8.3	8.3
EU-15	3.3	1.7	-0.5	-11.5	0.6	2.3

Table 5.5: Per country detailed change in variation of gross margin per hectare (GM), bought feed expenditure (BF) and livestock number (LU) expressed in percentages in future scenarios compared to present (CTL).

5.3.3 Greenhouse gas fluxes related to grassland changes

As provided by our simulations, as a result of increasing the share of fresh grass in animal feed in far future, animal feed expenditure decreases significantly, which in turn promotes farmers to increase livestock number. This should result in a significant rise in the European methane emissions (see [Figures 5.3](#)) -which are proportional to animal numbers- varying from 0.2% in A2H2 scenario to 5.9% in B1H2, compared to the present (CTL) scenario.

The relative increases of N_2O emissions in far future (see [Figures 5.4](#)) can be explained by two factors: nitrogen inputs and livestock production. Consequently, total GHG emissions increases dramatically in both futures scenarios (respectively by 2.9% and 2.5% in A2H2 and B1H2) compared to the present (CTL) scenario ([Figures 5.5](#)).

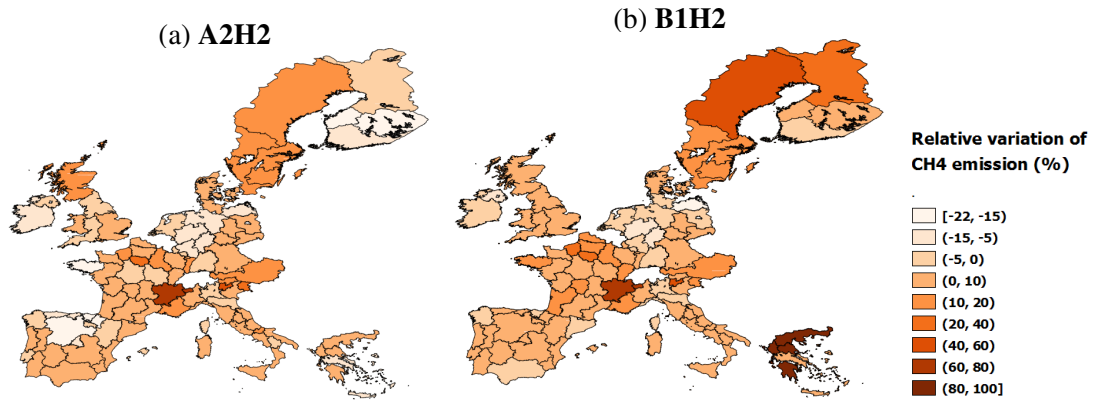


Figure 5.3: European relative change in methane greenhouse (%) in far future scenarios compared to present (CTL).

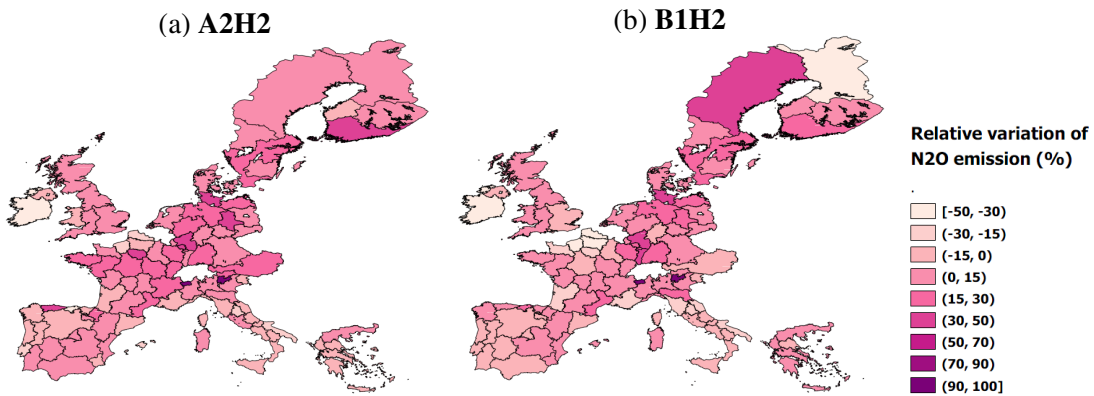


Figure 5.4: European relative change in nitrous oxide emission (%) in far future scenarios compared to present (CTL) .

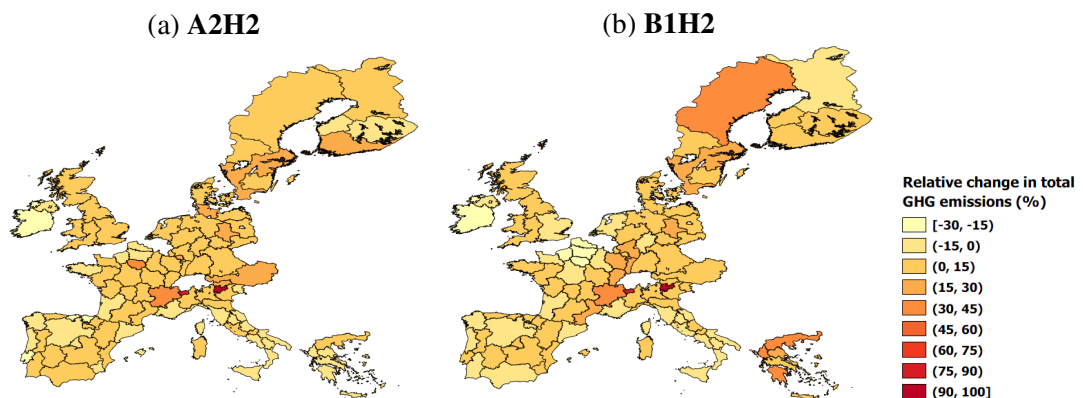


Figure 5.5: European relative change in total greenhouse emission (%) in future scenarios compared to present (CTL).

5.4 Concluding Remarks

This paper is based on a real innovation in terms of calculation which aims at estimating grass production in quantity and in monetary value while it is mostly used-on farm as animal feed and hence no market prices are available to reflect its economic value. Likewise, this study provides detailed information on grass impacts on the agricultural systems across the former 15 Member European Union. Furthermore, analysis in the framework of three SRES-IPCC scenarios allows for representing the long term of climate change effects on grassland systems and *vice versa*. This study draws on various data sources regarding agricultural data (yield, soil compaction) and prediction of far future climatic conditions and relies on a modeling framework coupling the PaSim grassland model to the AROPAj agro-economic model of the European agricultural supply. Our approach integrates fodder yields sourced by the PaSim model and crops yields sourced by the STICS model to the economic AROPAj model. It provides a useful tool to better assess the behavior of European farming systems facing different agro-economic and climatic conditions.

Our results prove that the implementation of grass nitrogen to yield functions induce a positive grassland variation, leads to revisit our previous estimates of land use, livestock adjustment and nitrogen inputs. Indeed one of the most striking results is a sharp decline in animal bought feed expenses, due to higher share of grass in animal feed, which leads farmers to increase their livestock numbers and consequently leads to change in GHG emission estimates at present time and more significantly on the long run GHG emissions levels until 2100. The preliminary results highlight the importance of more assessment of input-output relationship regarding grass and fodder productions. That may lead to significantly impact both economic and environmental valuation of European farming systems.

Acknowledgments

The first author is supported by the French agency ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) and the French public research institute INRA (Institut national de la recherche agronomique). The research leading to these results has been conducted as part of the AnimalChange project which received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n° 266018. This research is part of the thesis work of Parisa AGHAJANZADEH-DARZI, who acknowledges financial support by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) and the National Institute for Agricultural Research (INRA). The authors would also like to thank Pierre Humblot, INRA-UMR Economie Publique, for his helpful collaboration and remarks.

Bibliography

- Aghajanzadeh-Darzi, P., Jayet, P.-A., & Petsakos, A. (2012). Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on-farm source inputs and outputs. 28th ICAE - International Conference of Agricultural Economists, Foz do Iguacu, Brazil.
- Brisson, N. & Levrault, F. (2010). *Changement Climatique, Agriculture et Forêt en France : simulation d'impacts sur les principales espèces. Livre Vert de projet CLIMATOR (2007-2010)*. ADEME.
- Bryan, E., Ringler, C., Okoba, B., Koo, J., Herrero, M., & Silvestri, S. (2011). *Agricultural Management for Climate Change Adaptation, Greenhouse Gas Mitigation, and Agricultural Productivity*. Technical report, International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Cairistiona, F.-E. T. & Christopher, J. D. (1996). Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland: 2. the effects on milk yields and grazing management of dairy herds. *Agricultural Systems*, 52, 243–270.
- Calanca, P. & Fuhrer, J. (2005). *Swiss Agriculture in a Changing Climate: Grassland Production and its Economic Value*. Springer Netherlands.
- Carlier, L., Rotar, I., Vlahova, M., & Vidican, R. (2009). Importance and functions of grasslands. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 1, 25–30.
- 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 and resource economics*, 32(4), 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.
- Doyle, C.-J. & Elliott, J.-G. (1983). Putting an economic value on increases in grass production. *Grass and Forage Science*, 38, 169–177.
- Durandea, S., Gabrielle, B., Godard, C., Jayet, P.-A., & Le Bas, C. (2010). Coupling biophysical and microeconomic models to assess the effect of mitigation measures on greenhouse gas emissions from agriculture. *Climatic Change*, 98, 51–73.

BIBLIOGRAPHY

- FAO (2002). *Agriculture mondiale: horizon 2015-2030*. Technical report, Food and Agriculture organization of the United Nations.
- FAO (2010). *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems; A technical report on grassland management and climate change mitigation*. Technical report, Food and Agriculture organization of the United Nations.
- Galko, E. & Jayet, P.-A. (2011). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the eu. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.
- Gilmanov, T., Soussana, J.-F., Aires, L., Allard, V., Ammann, C., Balzarolo, M., Barcza, Z., Bernhofer, C., Campbell, C.-L., Cernusca, A., Cescatti, A., Clifton-Brown, J., Dirks, B.-O.-M., Dore, S., Eugster, W., Fuhrer, J., Gimeno, C., Gruenwald, T., Haszpra, L., Hensen, A., Ibrom, A., Jacobs, A.-F.-G., Jones, M.-B., Lanigan, G., Laurila, T., Lohila, A., Manca, G., Marcolla, B., Nagy, Z., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Raschi, A., Rogiers, N., Sanz, M.-J., Stefani, P., Sutton, M., Tuba, Z., Valentini, R., Williams, M.-L., & Wohlfahrt, G. (2007). Partitioning european grassland net ecosystem co₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 93–120.
- 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.
- Graux, A., Bellocchi, G., Lardy, R., & Soussana, J.-F. (2013). Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in france. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 114–131.
- Hopkins, A., Gustafsson, T., Bertilsson, J., Dalin, G., Nilsson-Linde, N., & Sporndly, E. (2008). *Biodiversity and Animal Feed: Future challenges for grassland production*. Technical report, European Grassland Federation.
- Houghton, J., Meira Filho, L., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D., & Callender, B. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Humblot, P., Leconte-Demarsy, D., Clerino, P., Szopa, S., Castell, J.-F., & Jayet, P.-A. (2013). Assessment of ozone impacts on farming systems: A bio-economic modeling approach applied to the widely diverse french case. *Ecological Economics*, 85, 50–58.
- Kimball, B.-A., Kobayashi, K., & Bindi, M. (2002). Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 77, 293–368.
- Leclère, D. (2012). *Offre agricole Européenne et changement climatique : une exploration régionale des enjeux liés aux changements d'échelle par la modélisation intégrée*. PhD thesis, ABIES.

- Leclère, D., Jayet, P.-A., & de Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level autonomous adaptation of european agricultural supply to climate change. *Ecological Economics*, 87, 1–14.
- Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, P., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S., & Biala, K. (2010). *Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS)*. Technical report, European Commission, Joint Research Centre.
- Luscher, A., Fuhrer, J., & P.-C.-D, N. (2005). *Grassland - a global resource*, chapter Global atmospheric change and its effect on managed grassland systems, (pp. 251–264). Wageningen Academic Publishers.
- OCDE (2011). *Évaluation des réformes des politiques agricoles de l'Union européenne*. Technical report, OCDE (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264112148-fr>).
- 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.
- Petsakos, A. & Jayet, P.-J. (2013). Evaluating the efficiency of a uniform *N*-input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling and Assessment*, 18, 57–72. Submitted, 2012.
- Reidsma, P., Ewert, F., Oude Lansink, A., & Leemans, R. (2009). Vulnerability and adaptation of European farmers: a multi-level analysis of yield and income responses to climate variability. *Regional Environmental Change*, 9, 25–40.
- Riedo, M., Grub, A., Rosset, M., & Futher, J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105, 141–183.
- Riedo, M., Gyalistras, D., Fischlin, A., & Fuhrer, J. (1999). Using and ecosystems model linked to GCM-derived local wheather scenarios to analyse effects of climate change and elevated co2 on dry matter production and partitioning, and water use in temperate managed grasslands. *Global change biology*, 5, 213–223.
- Riedo, M., Gyalistras, D., & Fuhrer, J. (2000). Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: simulation of site-specific sensitivity to an increase in atmospheric co2 and to climate change. *Ecological Modelling*, 134, 207–227.
- Rotter, R. (1999). Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climatic Change*, 43, 651–681.
- Schmid, M., Neftel, A., Riedo, M., & Fuhrer, J. (2001). Process-based modelling of nitrous oxide emissions from different nitrogen sources in mown grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 177–187.
- Smit, H., Metzger, M., & Ewert, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe agricultural. *Agricultural Systems*, 98, 208–219.

BIBLIOGRAPHY

- Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 20, 219–230.
- Soussana, J.-F. & Luscher, A. (2007). Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass Forage Science*, 62, 127–134.
- Soussana, J.-F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4, 334–350.
- Soussana, J.-F., Tessonneyre, F., Picon-Cochard, C., Casella, E., Besle, J.-M., Lherm, M., & Loiseau, P. (2002). Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production. *Fourrages*, 169, 3–24.
- Stampfli, A. & Zeiter, M. (2004). Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern switzerland. *Journal of Ecology*, 92, 568–576.
- Thornley, J.-H.-M. & Verberne, E.-L.-J. (1989). A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell and Environment*, 12, 863–886.
- Tubiello, F. & Fischer, G. (2007). Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000–2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 1030–1056.
- Verchot, L. V., Noordwijk, M. V., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackensen, J., Bantilan, C., Anupama, K. V., & Palm, C. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 901–918.
- Vrolijk, H.-C.-J., Meier, B., Kleinhanb, W., & Poppe, K.-J. (2004). FADN: Buttress for farm policy or a resource for economic analysis? *EuroChoices*, 3, 32–36.
- Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., P., C., & Soussana, J.-F. (2007a). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 2. simulations at the continental level. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–13.
- Vuichard, N., Soussana, J.-F. AND Ciais, P., Viovy, N., Ammann, C., P., C., Clifton-Brown, J., Fuhrer, J., Jones, M., & Martin, C. (2007b). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 1. model evaluation from in situ measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–14.

Chapter 6 :

Vulnérabilité des marchés agricoles européennes aux évolutions socio-économiques

L'objectif de ce chapitre est de quantifier l'avenir des marchés agricoles européens sous l'effet d'évaluations socio-économiques. Pour se faire, nous avons travaillé sur le couplage multi-échelles d'un modèle économique de l'offre agricole européenne (AROPAj) avec un modèle global d'équilibre partiel (GLOBIOM). Les deux scénarios extrêmes de SRES du GIEC : "SSP1" et "SSP3" ont été utilisés pour la période 2000-2050. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet AnimalChange.

BIBLIOGRAPHY

Chapter 6

Global change challenges for the EU agricultural sector : A multi-scale model analysis

Aghajanzadeh-Darzi, P.^{a,b,*}, Frank, S.^c, Havlik, P.^{c,d}, Jayet, P.A.^a

^a. INRA, UMR 210 Economie Publique INRA-AgroParisTech, 78850 Grignon, France

^b. ADEME, French Environment and Energy Management Agency, 49004 Angers, France

^c. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria

^d. International Livestock Research Institute (ILRI), Kenya

Abstract

The future of agricultural sector depends on different socio-economic and climatic factors. Regarding the future challenges of agriculture, numerous scenarios are regularly proposed for different time horizons by international panels. Although, economic modeling tools are used at different scales to quantify the impacts of these macro scenarios, it is usually difficult to combine accuracy of estimates at high geographical resolution levels and global scale. The aim of this paper is to quantify a potential medium term future and identify economic and environmental challenges for the European agricultural sector. This paper provides first results of coupling two different models, one related to a detailed analysis of the European agricultural supply side (AROPAj), the other being a global partial equilibrium model (GLOBIOM-EU). Coupling steps are explicitly developed mainly involving future yields and price trends. We develop two IPCC scenarios based on different macroeconomic assumptions (SSP1 and SSP3 implement) in order to quantify the economic and environmental impact on the European agricultural sector as well as potential leakage effects

outside the European Union going to 2050.

Keywords: Agriculture system; Medium-term challenges; Future price and yield developments; Socioeconomic scenarios

Abbreviations: EU: European Union; ROW: Rest of the world (excluding EU-24); SSP: Shared Socioeconomic Pathways; AROPAj: Annual economic farm model; GLOBIOM: Global biosphere management model; FADN: Farm Accountancy Data Network; IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; GHG: Greenhouse gas; FG: Farm-group

6.1 Introduction

Agriculture is a developing sector with an important growth potential due to the rapidly increasing demand for agricultural products in developing regions such as in Asia, Africa or Latin America. Main drivers of increasing demand are population and income growth as well as changing food diets (Tilman et al., 2011; Van Vuuren et al., 2012). As the world population is expected to rise to 9 billion people by 2050, and as the income per capita is increasing as well, agricultural production will have to increase significantly in order to meet future human food demand (FAO, 2009; Godfray et al., 2010). Although these changes will mostly affect agricultural sectors in developing regions following dynamic demand patterns, the agricultural supply in developed regions will be affected too as regional food markets are interconnected through international trade (Laborde, 2011). European farmers may indeed benefit from an increasing demand from the rest of the world, which would allow them to produce more and to sell their production to a higher price. At the same time, they may suffer from increased competition for intermediate inputs such as feeds. In particular, these changes in production patterns will likely trigger important changes in land use patterns. Furthermore, all these changes will not have only economic impacts as environmental outcomes are to be expected too. The agricultural sector is indeed a major emitter of greenhouse gases, on the global scale it represents 10-12% (5.1 to 6.1 Gt CO_2 -eq/yr) of the total anthropogenic GHG emissions and about 60% of nitrous oxide (N_2O) and about 50% of methane (CH_4) including land-use change (IPCC, 2007).

This study relates to three main issues : (i) prospects in food demand and production, international trade and competitiveness, (ii) land use change, and (iii) greenhouse gases emissions and agriculture. There are many studies in the literature which focus on one or several of these issues, some of them show particularly relevant relative to our analysis. At first, the literature is rich with studies dealing with the impact of the European biofuel policy on the agricultural sector and on international trade, among others there are Havlik et al. (2011); Al-Riffai et al. (2010); Banse et al. (2011); Laborde (2011); Hellmann & Verburg (2010); Eggers et al. (2009). This issue presents interesting similarities to the one addressed in this chapter in the sense that it focuses on the effect

of an additional demand on production patterns, and in particular on land-use change. In these papers, the additional demand for agricultural products originates from biofuel policies whereas in the present one, it originates from the expansion of the demand for food in developed regions, but the methodological approaches should be in line. The literature is also rich in climate change studies, which can be of two main types (and sometimes twofold): i) the studies dealing with the impact of climate change on the agricultural sector, and ii) the contribution of the agricultural sector in emitting greenhouse gases. The first type includes inter alia studies focusing on abatement cost (De Cara & Jayet, 2006; De Cara et al., 2005; De Cara & Jayet, 2011). The second type of works is mostly based on the introduction of a productivity shock on the supply side, often determined in link with crop modeling approaches. While the first type is more directly linked to the work presented here, the economic tools used for the second type remain relevant.

Literature sources shows that economic tools and models used on these topics are numerous and diverse. In particular, they are run on different geographical scales, either global or regional, in most cases, and at different spatial and sectorial resolutions. The strong point of the global approach is that interregional trade, which is an important driver of evolution in regional food production patterns, is represented. On the other hand, Europe-specific economic models are in general able to represent with further refinement regional or local specificities of the agricultural sector, for example on the technical and the political side. This greater level of detail in regional European-specific models can be explained by several reasons but the main one is that the availability of detailed data bases on the structure of the agricultural sector in Europe has no equivalent on the global scale (even though they also exist in some other regions of the world). For example, the AROPAj model used in this analysis (cf. Section 6.2.2) is based on the FADN database¹, which provides detailed and consistent data on the farm level throughout the whole EU. Although the reconciliation between these two approaches is likely to bring interesting outcome, the literature remains scarce in consistent multi-level analysis of this nature. The recent work of Britz & Hertel (2011), focusing on the coupling between GTAP², a global computable general equilibrium model, and CAPRI³, an economic modeling framework of the European agriculture, constitutes one noteworthy exception. In this case, this approach was applied to quantify the environmental impacts of the EU biofuel policy.

The approach developed in this study follows the same idea but is based on different models and is applied to the trade and competitiveness topic described in the first paragraph. The new modeling framework is developed by linking two well established bottom-up models : (i) the economic supply model AROPAj previously mentioned and (ii) the global partial equilibrium model GLOBIOM. This approach allows us to represent on the global scale all major land based sectors, land-use changes and its direct and indirect drivers, as well as international trade flows and leakage

¹FADN: Farm Accounting Data Network, cf. <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/database/database-en.cfm>

²GTAP : Global Trade Analysis Project, cf. <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>

³CAPRI : Common Agricultural Policy Regionalized Impact modeling system, cf. <http://www.capri-model.org/dokuwiki/doku.php?id=start>

effects while at the same time representing the EU agricultural sector with greater detail, providing in particular information on spatial and technological features. This detailed representation enables, *inter alia*, to model in a more relevant way sector -specific policies on the European level as these policies (as the CAP for example) often depend on farms' technological specificities. At the horizon 2050, we implement in the modeling framework two Shared Socioeconomic Pathways (SSP), which are macro-economic scenarios developed under the aegis of the IPCC (*cf.* [Section 6.2.3](#)). The model cluster delivers results in four areas that are of interest for us : (1) agricultural markets - supply and demand- of agricultural commodities on the global scale ; (2) farm-group-specific results on the European scale ; (3) land use and land use change, on the global scale, and (4) greenhouse gas emissions (GHG), on the global scale but with more refinement for Europe. The following [Section 6.2](#) describes the modeling framework as well as the scenarios. Then, the main results are discussed in [Section 6.3](#). A summary of the results and concluding remarks are presented in [Section 6.4](#).

6.2 Modeling framework

6.2.1 GLOBIOM-EU

GLOBIOM-EU is a partial equilibrium land use model based on GLOBIOM⁴ ([Havlik et al., 2011](#)). For regions outside Europe, GLOBIOM and GLOBIOM-EU are identical regarding datasets used and modeling approach, while it has been enhanced to allow for a more detailed representation of the EU-28 member countries. GLOBIOM-EU is a global recursive dynamic partial equilibrium bottom-up model integrating the agricultural, bioenergy and forestry sectors. Demand and international trade are represented on a regional level, the world being divided into 53 regions (the 28 EU member countries and 25 aggregated regions). The demand for agricultural Commodities is determined independently for each crop following income and price elasticity mechanisms. Income elasticities are calculated after the trends observed in the FAO food balance sheet⁵ and price elasticities are mostly taken from [Muhammad et al. \(2011\)](#).

In GLOBIOM, the global agricultural and forest market equilibrium is computed by choosing land use and processing activities to maximize the sum of producer and consumer surpluses subject to resource, technological and policy constraints. There are 6 possible land covers in GLOBIOM : cropland, grassland, short rotation tree plantation, managed forests, natural forests and other natural land. On top of that, there are 18 crops represented in the model which compete for cropland. The land allocation between the different covers and uses is carried out on a low geographical scale

⁴For more information : <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/modelsData/GLOBIOM/GLOBIOM.en.html>

⁵Cf. http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/FB/*/E

(i.e. the relative land shares of the different covers and uses are determined on a low geographical scale). Outside Europe, the supply side of the model is based on a detailed disaggregation of land into Simulation Units (SimUs) - clusters of 5 arcmin pixels belonging to the same country, altitude, slope and soil class, and to the same 30 arcmin pixel (Skalsky et al., 2008). For the EU (except Croatia, Cyprus and Malta), a new SimU architecture (Balkovic et al., 2009) has been implemented. The concept of the EU-SimUs is identical with the global one however it differs in many details. The basic spatial unit is a 1x1 km pixel instead of 10x10 km. The higher spatial boundary is in this case represented by the NUTS2 regions boundaries while a 50x50 km grid was used in the global version. Further determinants of a SimU are slope, altitude and soil, like in the global version, although here the soil parameter is decomposed in three dimensions - texture, soil depth, soil stoniness. Land cover category, presence of irrigation equipment and river catchments are additional dimensions of the European SimUs. Information on land cover is now based on CORINE land cover map (CLC2000) instead of the product used globally - GLC2000 (Global Land Cover).

Land allocation is based on yield levels (which hold the land productivity information) that are SimU-specific. Yields are partly exogenous, partly endogenous. Indeed yield levels are exogenous (but not constant since they are subject to an exogenous increasing trend) in GLOBIOM and determined ahead by the bio-physical process based model EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) (Izaurre et al., 2006; Williams, 1995). However, yields are determined for 4 different management systems (irrigated, high input - rainfed, low input - rainfed and subsistence) and switches between these systems are endogenous though constrained. For the European crop sector EPIC, simulations with detailed representation of management systems (3 tillage systems - conventional, reduced and minimum tillage and 2 fertilizer and irrigation systems), crop rotations and additional crops (compared to the global version) have been implemented. As far as forestry is concerned, parameters for primary forest production such as mean annual increment, maximum share of saw logs in harvested biomass and harvesting costs are provided by the G4M model (Kindermann et al., 2006).

As a consequence of these characteristics, in GLOBIOM changes in demand and changes in relative profitability between the different land based activities and between the different SimUs are the major determinants of land use change in GLOBIOM. For a more detailed description of the global model version see Havlik et al. (2011).

6.2.2 AROPAj

AROPAJ⁶ is a mathematical programming model of European agricultural supply dedicated to simulating the EU farming systems behavior facing change in economics issues (CAP, European

⁶For more information: <http://www.grignon.inra.fr/economie-publique/MIRAJE/model/detail.htm>

directives regarding environment, climate change and bio-energy). For a given economic situation (e.g. set of prices, taxes and policy measures, etc.), it provides an assessment of the type and amount of the agricultural products delivered on the markets at different scales from the farm to the EU level. The general structure of the AROPAj model and last developments are presented in detail in [Galko & Jayet \(2011\)](#), [De Cara & Jayet \(2011\)](#) and [Petsakos & Jayet \(2013\)](#).

AROPAJ represents a large part of the used agricultural area devoted to “main crops” (thirty-two crop producing activities including : soft wheat, durum wheat, barley, corn, rice, oats, rye, other cereals, rapeseed, sunflower, soy, potatoes, sugar beet, peas, other proteins), forages (maize, beets) and grasslands, and major animal productions (thirty-one animal categories : twenty-seven for cattle , and four categories for sheep, goats, swine and poultry). Crop production can be sold at the market price or used on-farm for animal feeding purposes (feed grains, forage, and pastures). The bovine activities are particularly disaggregated (twenty-seven activities related to milk or meat products, ages, gender). On the GHG emission side, AROPAj represents about twenty sources of nitrous oxide and methane sources emissions based on the IPCC Tier 1 guidelines ([Houghton et al., 1996](#)).

Data are mainly provided by the Farm Accountancy Data Network (FADN⁷), which contains a sample of representative farms for each administrative region at national level that collects economic information (animal numbers, crop yields, prices, areas, etc.) based on a sample of thousands of farmers across the EU. The variables taken into account in AROPAj include: the area of each crop, forage and grassland, as well as the livestock size per animal type, the quantity of meat, milk, grains or other crop products, the quantity of animal feed purchased, the quantity of on-farm cereals utilized for feed, the quantity of bought fertilizer and the opportunity cost of quasi fixed factors (land, livestock, milk and sugar beet quotas, etc.). The FADN dataset does not supply information about product destination (e.g. it does not distinguish between animals slaughtered and animals sold), but the optimizing model can provide estimates through internal activities, leading us to deliver estimates of the slaughter premium. Major estimates of aggregated outputs are correctly delivered by the model. The model version used in this paper focuses on the 24 European member which takes into account the EU without Bulgaria, Croatia, Malta, and Romania (hereafter referred to as EU-24), which completely encompasses the FADN data calibrated according to 2004 and consists of 119 regions and 1307 farm-groups.

6.2.3 Scenario development

A new set of socio-economic scenarios has been developed by the Integrated Assessment Modeling (IAM), as well as the Impacts, Adaptation and Vulnerability (IAV) communities. These sce-

⁷FADN is still the only representative and reproducible source of micro-economic data covering EU farming systems, even if costs and goals are widely questionable and discussed ([Vrolijk et al., 2004](#))

narios are called Shared Socioeconomic Pathways (SSP)⁸. Five SSP have been assembled along the axes of challenges for climate change mitigation and challenges for climate change adaptation. Besides the narratives, they are also attributed with quantitative and semi-quantitative elements. Quantitative information on population and gross domestic product (GDP) trajectories is provided up to 2100 on the national level. Semi-quantitative information about relative differences between the scenarios is provided for a wide range of parameters going from education to energy intensity of the economy.

For the joint implementation in AROPAj and GLOBIOM-EU, two opposite SSP were chosen : the SSP1 which is characterized by relatively fast GDP growth, slow population growth and fast technological change, and the SSP3 which on the contrary has slow GDP growth, relatively fast population growth, and slow technological progress. The SSP1 can qualify as a “sustainable scenario” while the SSP3 can qualify as the “worst case” scenario. Besides, it was decided to use three parameters of the SSP database : GDP, population and technological progress. In order to maintain relevance for agricultural policy design, we focus on medium term analysis going up to 2050. GDP and population data were available directly from the SSP database. For technological change, we converted the semi-quantitative information into crop and livestock productivity growth rates.

GDP and population data were available directly from the SSP database. For technological change we converted the semi-quantitative information into crop and livestock productivity growth rates. Crop productivities have been estimated using econometric analysis. Yield response functions to GDP per capita have been estimated for 18 crops using a fixed effects model with panel data. The response to GDP per capita was differentiated over four income groups oriented at World Bank’s income classification system (<1.500, 1.500-4.000, 4.000-10.000, >10.000 USD GDP per capita). Country level yield data was provided from FAOSTAT while GDP per capita was based on World Bank data (1980-2009).

For the livestock sector, efficiency increases for five livestock products (ruminant, pig, poultry meat, milk and eggs) are based on Bouwman et al. (2005) outside Europe and on CAPRI (quote) for the EU. An average productivity shifter over all crop productivities per tonne of dry matter has been calculated showing the deviation of SPP1 and SSP3 from SSP2 (moderate “business as usual” scenario). This shifter is then applied to the livestock efficiencies to estimate SSP1 and SSP3 livestock productivities. In addition, we assumed for SSP1 a shift to more sustainable diets than in SSP3 which is based on the FAO baseline which results in less animal calorie consumption.

⁸Detailed description and relevant references can be found at of relative difference between the scenarios <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>

6.2.4 AROPAj-GLOBIOM-EU coupling

The modeling framework developed for this study relies on the “soft” coupling of AROPAj and GLOBIOM-EU. Price and yield developments in the crop and livestock sectors have been harmonized in order to align the two models and to consistently forecast future developments in the European agricultural sector. The coupling is based on the introduction of GLOBIOM-EU relative price and crop yield developments (compared to the base year 2000) in AROPAj model.

AROPAJ is a farm level model which does not explicitly represent livestock products (except for milk) but only animal numbers since in reality, living animals and not products are being sold at the farm level. Hence, we compare animal numbers to ensure consistency between the models. Absolute differences in animal numbers for ruminant and non-ruminants in the base year result from the use of different data sources in the models (AROPAJ : FADN; GLOBIOM-EU: FAO). Over time, milk production develops reasonably close in the models. However, animals number for non-ruminants deviate, even though the overall trends of SSP1 and SSP3 are consistent across models.

GLOBIOM model does not provide information concerning feedstuffs prices. To overcome this drawback, we made an assumption to calculate the price of feedstuffs in AROPAj model. It is thus assumed that cereals form 80% of animal feed and the other 20% contain protein crops. We then take into account cereals and protein crops prices to calculate the feed prices development overtime, which is expressed in the following equations:

$$\mathcal{F}_{(pays,n+1)} = \left[0.8 \times \frac{\sum_j Col_C(j,n) \times S_C(j,n+1)}{\sum_j Col_C(j,n) \times S_C(j,n)} \right] + \left[0.2 \times \frac{\sum_j Col_P(j,n) \times S_P(j,n+1)}{\sum_j Col_P(j,n) \times S_P(j,n)} \right]$$

In the above equation, F represents the feed price variation, n is the reference year (2000) and $n + 1$ includes future years from 2010 to 2050. Col_C stands for marketed cereals (M t), and S_C is the price of cereals. Marketed protein crops (Mt) and their prices are denoted by Col_P and S_P . Thus, feed price variation has been calculated and taken into account in AROPAj model.

Accordingly, the combination of two assumptions has been analyzed in this study (Table 6.1) : (i) forecast future yields and prices variations from 2000 to 2050, estimated for two SSP scenarios -SSP1 and SSP3- thanks to the AR5 IPCC report; (ii) six different levels of livestock adjustment development from 0% in 2000 to 75% in 2050 (by 15% step every ten years), which defines the possibility for farmers to modify their livestock in the medium run.

Scenario	Year	Yield and price variations	AROPAj livestock adjustment
Baseline	2000	-	0%
	2010	SSP1 and SSP3	15%
	2020	SSP1 and SSP3	30%
Future	2030	SSP1 and SSP3	45%
	2040	SSP1 and SSP3	60%
	2050	SSP1 and SSP3	75%

Table 6.1: The scenarios studied.

6.3 Results and discussion

This section presents the simulation results in and outside Europe obtained respectively from AROPAj (noted EU) and from GLOBIOM (noted ROW) for the SSP1 and SSP3 scenarios. The output described consist of the agricultural production, the demand and prices both inside and outside Europe, followed by impacts on environmental parameters such as land use change, deforestation and GHG emissions.

6.3.1 European farm financial terms

Socio-economic impacts on agricultural supply can be illustrated by changes in farm's gross margin. [Figure 6.1](#) shows the European countries detailed gross margin variation (expressed in %) under two SSP scenarios until 2050 compared to baseline scenario in 2000 (provided by AROPAj model). Overall socioeconomics developments lead to an average gross margin increase varying between 7.6% in 2010 and 24.5% in 2050 at the European level.

At farm level, the important differences in farm gross margin depend on farm characteristics such as production type, size of the farm, level of intensity, etc., as expected widespread gross margin variation have been observed in countries with high level of intensive farms. For most European countries, the increase in gross profit margin stays within a range of +4% to +26% variation between 2010 and 2050. It is observed that livestock adjustment and both socio-economic scenarios result in an increase in the gross farm income. However, over time, this increase is greater (4.3% in 2050 for the EU-24) under SSP1 scenario, due to the lower animal food expenditures (-2.1% in 2050), as an inevitable consequence of lower cereals and oilseed prices (-10% in 2050).

6.3. RESULTS AND DISCUSSION

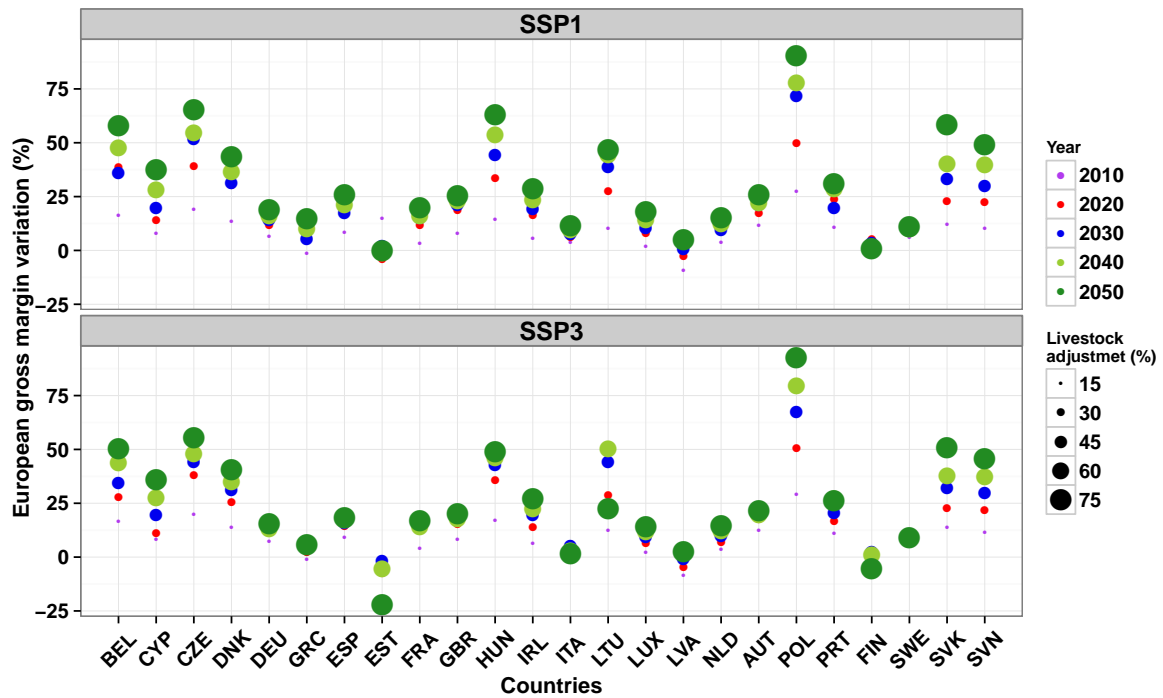


Figure 6.1: European country detailed gross margins variation (%) following two socio-economic scenarios until 2050, compared to 2000 (provided by AROPAj model).

6.3.2 Land allocation and land use change

The [Figure 6.2](#) depicts results for land use changes on the European level and for two SSP scenarios between 2000 and 2050. The fast economic growth in SSP1 leads to a higher increase in European cropland area by 2.2% (especially sugar beet, wheat, rye, corn, rapeseed). Accordingly forage and meadows drop is higher in SSP1 (-2.9%) until 2050. Indeed, in GLOBIOM, forest areas are kept constant for the European Union on the macro-region level (the EU being divided into 5 regions), which means that within macro-regions, forest areas can be converted to other types of land cover including cropland but the total area per macro-region must remain constant over time. This constraint is justified by the fact that in reality, there is little deforestation observed and expected in Europe for a few reasons, including the fact that deforestation is subject to strong regulation in Europe. The tradeoff in land use change in Europe as projected by GLOBIOM concerns primarily cropland and grassland.

At the country level, important changes occur in land allocation. For most of the EU member states, the cropland area increase offsets decline in grassland area under SSP scenarios over time, except for Estonia where soft wheat area disappears in the SSP3 scenario, with a significant drop in rye area (-87%) which leads to an increase in grassland cover (+32.5%). The same case is observed in Ireland that potatoes and oats areas disappear in both SSP scenarios compared to the baseline scenario with a simultaneous decrease in soft wheat area (from -9 to -27% for SSP1 and

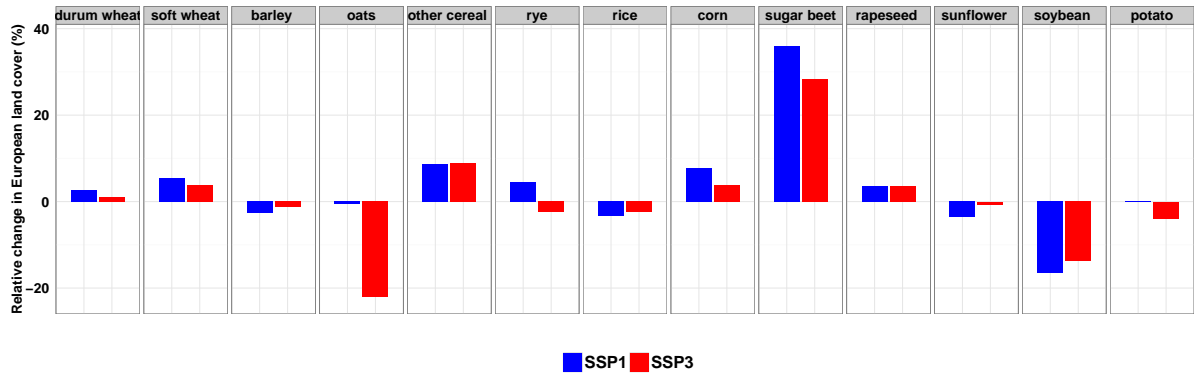


Figure 6.2: Relative land use change (%) on the European level for a few main crops between 2000 and 2050

SSP3 scenarios), which consequently lead to a decline in cropland (-21%). The decline in crop cover in Luxembourg is related to the large decrease in winter barely area (respectively -6.7% and -89.1% for SSP1 and SSP3). In Latvia, potato, sugar beet and rapeseed areas will disappear overtimes which leads to expand grassland area by respectively 17.1% and 15.6% in SSP1 and SSP3 (Figure 6.3).

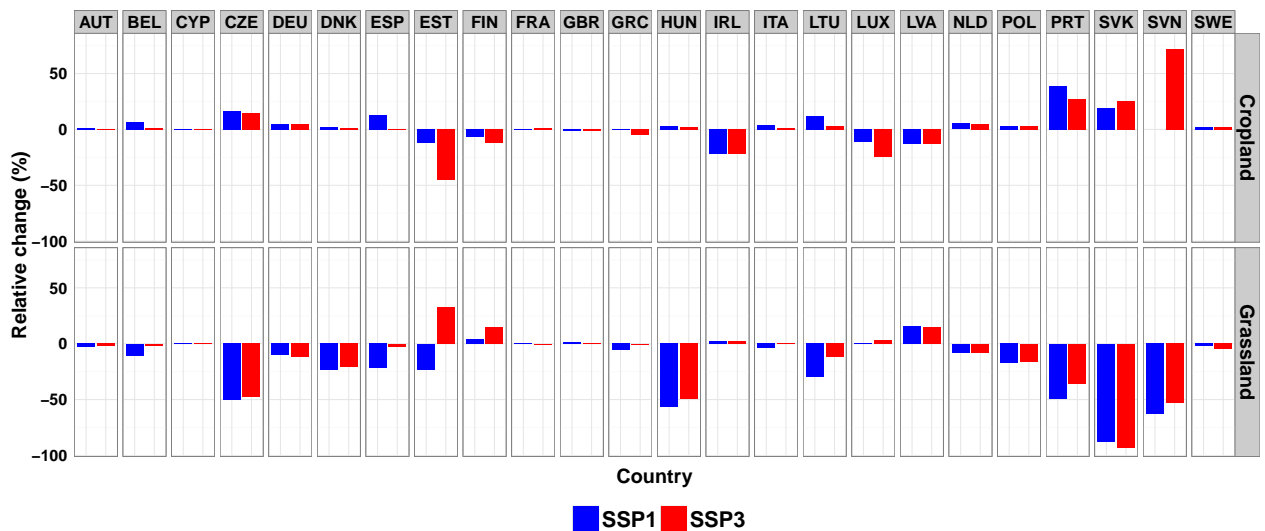


Figure 6.3: European countries detailed relative change in cropland and grassland cover in 2050 compared to 2000 (based on AROPAj results).

As for the rest of the world, substantial differences in land cover and land use change are observed over time and across scenarios in GLOBIOM-EU. In SSP1, low increases in population and high technological change leads respectively to a (relatively) low increase in demand and to a (relatively) high increase in agricultural intensification. This has a mitigating effect on deforestation and loss of other natural vegetation due to a reduced need for cropland and grassland expansion.

The Figure 6.4 presents the relative changes in land cover between 2000 and 2050 for both scenar-

6.3. RESULTS AND DISCUSSION

ios and for both the EU and the rest of the world (ROW). Overall cropland and grassland expands until 2050 at the expense of forest and other natural vegetation. More specifically, the results show that globally deforestation is decreased by 19% in 2050 in SSP1 compared to SSP3. In particular, in Latin America deforestation is reduced by 35%. High technological change, less population growth and a shift to less meat based diets result also in a more modest demand growth in SSP1 and hence cropland area can be reduced by 33% in SSP1 while grassland area remains rather constant. Main regions with sparing of cropland expansion are Latin America (-45%) and Sub-Saharan Africa (-13%). Moreover, loss of other natural vegetation can be decreased by 6% in the ROW. Figure 3 presents the relative change in a specific land cover in 2050 compared to 2000.

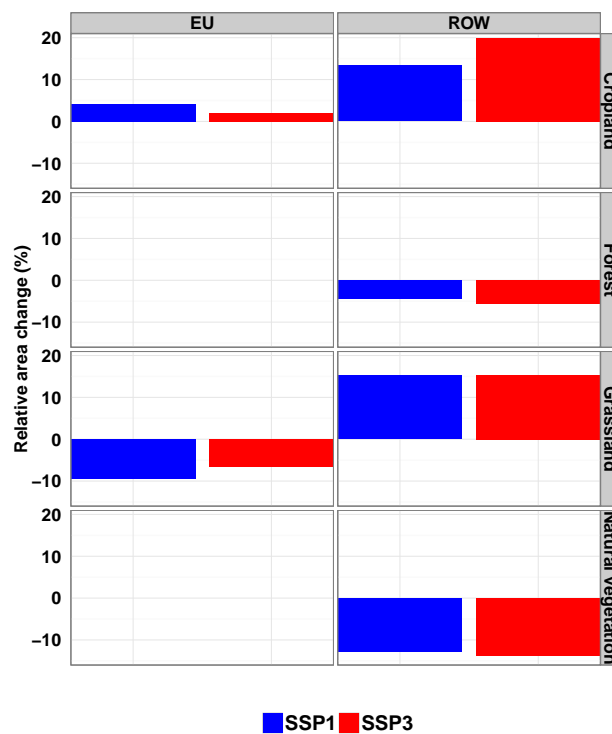
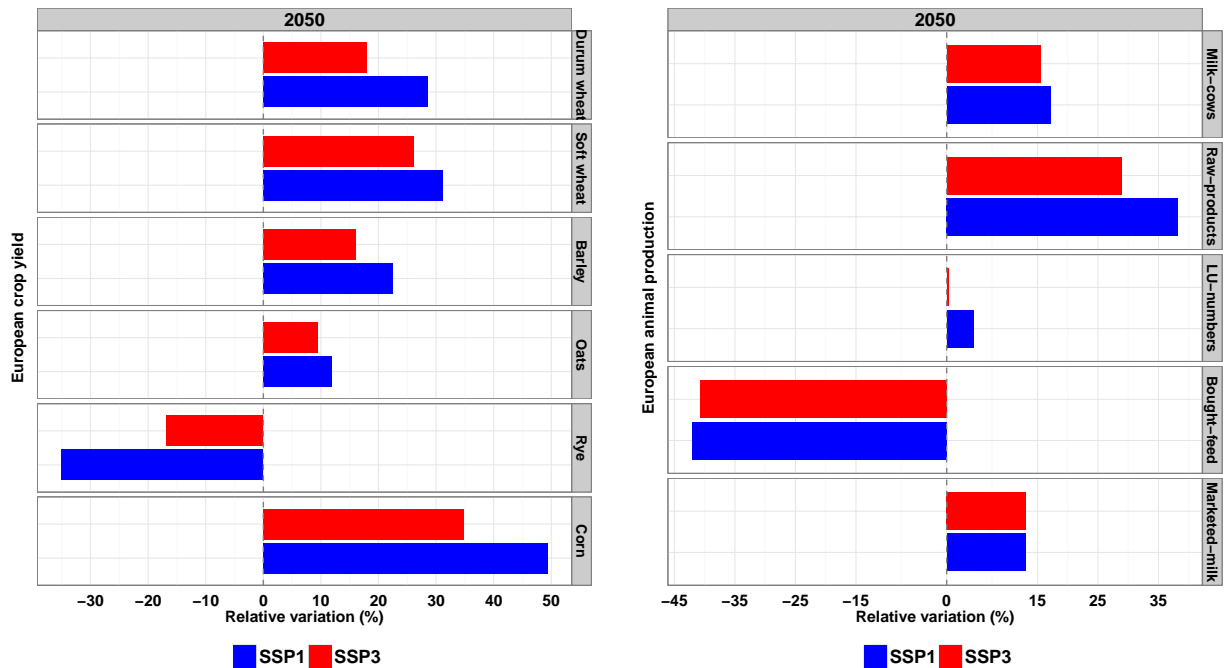


Figure 6.4: Relative changes (%) in land cover between 2000 and 2050 for the EU-24 and the rest of the world (ROW).

6.3.3 Agricultural production

The Figure 6.5a depicts yield changes of major crops in Europe between 2000 and 2050. Yield trajectories are determined by GLOBIOM-EU and their evolution is driven by both an exogenous time trend based on FAO data and an endogenous mechanism based on land reallocation (cf. Section 6.2.1). The figure shows that as expected, yields are increasing more importantly in SSP1 than in SSP3, exogenous yield increases being higher in SSP1 (cf. Section 6.2.3). These yield increases are most significant for corn (ranging from +49.3% in SSP1 to +34.8% in SSP3 relative to 2000) and wheat (+30.3% and +23.3% for SSP1 and SSP3 respectively). By contrast, rye yield

decreases in both SSP scenarios (-35.1% in SSP1 and -16.8% in SSP3) until 2050. This is due to the reallocation of rye crops to less productive land areas (endogenous mechanism). This could be explained by the fact that rye competitiveness relative to the other crops is decreasing by 2050 and that it is not competitive enough for being allocated to the most productive land areas. In turn, this decrease in competitiveness could be explained by a relative decrease in price in comparison to other crops.



(a) European crop yield

(b) European animal production

Figure 6.5: European crop yield (a) and animal production (b) variation (%) under two scenarios outlined when comparing 2050 to 2000

AROPAj results for animal production are presented in Figure 6.5b. It shows that animal production increases significantly in both scenarios by 2050. However in the SSP1 scenario, livestock production grows at a higher rate (+7.2%) than in SSP3, as a result of the fast technological change in SSP1. The decline in animal concentrated feeding-stuff expenses in both SSP scenarios results from higher on-farm used of cereals (+44.8% for durum wheat, +2.9% for soft wheat, +11.5% for oats, +29% for rye and +25.5% for corn, relative to 2000), which compensates the reduced proportion of fresh grass in animal feeding-stuff (due to the grassland area drop (-8%) by 2050). However, the number of dairy cattle and the quantity of milk produced stabilizes as a result of the milk quotas.

In the rest of the world, agricultural production increases in both scenarios until 2050 significantly in GLOBIOM-EU. Drivers are different GDP and population assumptions underlying the SSP resulting in an overall higher demand for agricultural products but also endogenous demand responses due to decreasing prices related to technological change and different diets. Table 6.2

6.3. RESULTS AND DISCUSSION

			SSP1	SSP3
Crop sector	ROW	Price	1.00	1.15
		Productivity	1.82	1.53
	EU-24	Price	0.91	0.96
		Productivity	1.32	1.24
Livestock sector	ROW	Price	1.04	1.10
		Productivity	1.10	1.08
	EU-24	Price	0.90	0.88
		Productivity	1.18	1.16
Macroeconomic drivers	ROW	Population	1.41	1.75
		GDPpCAP	4.24	2.02
	EU-24	Population	1.10	0.86
		GDPpCAP	2.16	1.77

Table 6.2: Global population, GDP, price and productivity multipliers between 2000 and 2050 as input or projected by GLOBIOM-EU for the SSP1 and the SSP3 scenarios.

shows aggregated relative population, gross domestic product per capita (GDPpCAP), productivity and price changes in 2050 compared to 2000 for the different scenarios. Productivity growth represents exogenous technological change and is based on the SSP. In addition to the exogenous productivity growth, endogenous productivity growth can be achieved by e.g. change in management system or reallocation of production to more productive areas.

In the crop and livestock sector outside the EU, production rises in SSP1 in 2050 compared to SSP3 due to fast technological change. Total meat production increases by 13%, milk and meat by 4% compared to SSP3. Similarly, crop production rises significantly for oilseeds (+12%) while cereals and other crops remain at constant levels across both scenarios.

Technological change as well as other drivers on the demand side such as population, GDP growth and consumer preferences impact prices in ROW and cause prices to decrease for the different crop and livestock products. Overall, prices for crop products decrease on average by around 13% in SSP1 compared to SSP3, while decrease by 5% for livestock products.

In SSP1 farmers in the ROW become more competitive due to high technological change and as a consequence exports to EU from ROW increase substantially for oilseeds. Imports from Europe can be halved for cereals as domestic production increases. Imports for livestock products (meat, milk and eggs) can be reduced as well.

6.3.4 GHG emission trends and projections

AROPAj presumes that the most important factors behind GHG emissions are livestock activities (for CH_4 and N_2O) and nitrogen fertilizer use (for N_2O) (De Cara et al., 2005). According to results presented in Figure 6.6a, nitrous oxide emission levels increase substantially in most European countries and for both SSP scenarios, due to the higher emissions from vegetal based activities. Methane emission which is directly emitted from livestock digestive processes, decreases considerably for most European countries, except for Cyprus, Greece, Estonia, France and Ireland with a significant increase in the number of animals overtime, due to overall developments on the demand side (e.g. population, GDP growth). When comparing SSP1 to SSP3, total emissions are increased by 3.4% at the European level. This rise is largely due to three factors : (i) grassland area drop, (ii) widespread crop land development and (iii) sustainable crop productivity increase in SSP1 from 2000 to 2050.

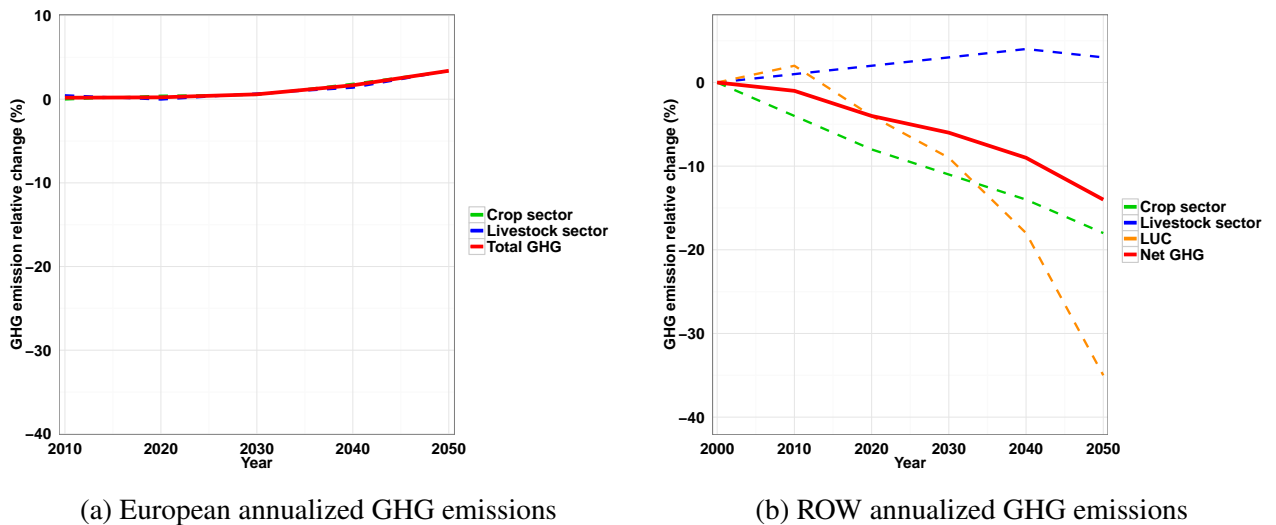


Figure 6.6: Difference in (a) European and (b) ROW annualized GHG emissions (%) comparing SSP1 to SSP3 over time

The results show that total emissions are lower outside the EU-24 in SSP1 than in SSP3, by 15% in 2050 (Figure 6.6b). In particular, emissions from the crop sector (-18%) and from the land use change (-35%) decline substantially. Emissions from the livestock sector increase slightly (+3%) when comparing SSP1 to SSP3. Even though net emissions can be reduced by 14% in SSP1 compared to SSP3, overall emissions in SSP1 still increase by around 50% compared to 2000 due to overall macroeconomic developments (e.g. population, GDP growth etc.).

6.4 Concluding remarks

This paper seeks to identify key challenges for the EU agricultural sector and quantify the economic and environmental impacts under two IPCC alternative future storylines (SSP1, SSP3). The paper illustrates the interest in coupling a global partial equilibrium model (GLOBIOM) with a detailed European supply model (AROPAj) in order to account for global impacts and interactions as well as a detailed representation of the European agricultural sector.

We conclude that although SSP1 scenario represents a sustainable world with rapid technological progress towards more environment friendly processes, it will lead to negative consequences on European grass cover and greenhouse gases emissions in the near future, due to overall developments on agricultural yield and on the demand side (*i.e.* increases in population and GDP). It seems that lower agriculture products prices in SSP1 lead farmer to increase cropland in order to reach higher income. However, despite these environmental impacts inside the EU, the SSP1 scenario allows for farming systems in developing regions to get closer to EU productivity levels, and thus further reducing the competitiveness of EU exports on the global markets. Besides the positive economic impacts inside and outside the EU, SSP1 may help mitigating climate change and reaching emission targets by reducing land use change emissions by 35% and net GHG emissions by 14% until 2050 compared to SSP3.

We conclude that linking a detailed regional supply model with a global land use model seems a promising method when analyzing complex problems. It allows on the one hand to capture global relationships and interdependencies such as leakage or indirect land use change effects but still being able to analyze regional impacts in great detail.

In view of the nature of these results, there now appears every reason to pointed to several potential challenges facing the EU agricultural policy design in the future. We therefore believe that the proposed framework can be in a next step used also for further analysis of specific EU policy instruments designed to steer the future developments. Nevertheless, more research is needed to examine the feedback of European agriculture sector outside the EU, which could provide useful information to evaluate the far future of agricultural system capacities and policy design.

Acknowledgments

The first author is supported by the French agency ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) and the French public research institute INRA (Institut national de la recherche agronomique). The research leading to these results has been conducted as part of the AnimalChange project which received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n° 266018. The authors would like to gratefully acknowledge the financial support brought by the European Community's Seventh Framework Programme. The authors would also like to thank Gaspard Dumollard, for helpful remarks. This research is part of the thesis work of Parisa AGHAJANZADEH-DARZI, who acknowledges financial support by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) and the National Institute for Agricultural Research (INRA).

6.4. CONCLUDING REMARKS

Bibliography

- Al-Riffai, P., Dimaranan, B., & Laborde, D. (2010). *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate*. Technical report, International Food Policy Research Institute.
- Balkovic, J., Skalsky, R., Schmid, E., Tarasovicova, Z., & Jurani, B. (2009). *D2100 of the CC-TAME project: Database and data strategy report*. Technical report, .
- Banse, M., Van Meijl, H., Tabeau, A., Woltjer, G., Hellmann, F., & Verburg, P. (2011). Impact of EU biofuel policies on world agricultural production and land use. *Biomass and Bioenergy*, 35, 2385–2390.
- Bouwman, A., Van Der Hoek, K., Eickhout, B., & Soenario, I. (2005). Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, 84, 121–153.
- Britz, W. & Hertel, T. (2011). Impacts of eu biofuels directives on global markets and EU environmental quality: An integrated PE, global CGE analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142, 102–109.
- De Cara, S., Houzé, M., & Jayet, P. (2005). Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs. *Environmental and resource economics*, 32(4), 551–583.
- De Cara, S. & Jayet, P. (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions in EU agriculture: An assessment of the costs of reducing agricultural emissions and enhancing carbon sinks in agricultural soils. In *INSEA Report SSP1-CT-2003-503614-Final*, European Commission, INSEA, IIASA, Laxenburg, Austria.
- De Cara, S. & Jayet, P. (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.
- Eggers, J., Troeltsch, K., Falcucci, A., Maiorano, L., Verburg, P., Framstad, E., Louette, G., Maes, D., Nagy, S., Ozinga, W., & Delbaere, B. (2009). Is biofuel policy harming biodiversity in Europe? *GCB Bioenergy*, 1, 18–34.
- FAO (2009). *How to Feed the World in 2050*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

BIBLIOGRAPHY

- Galko, E. & Jayet, P. (2011). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.
- Godfray, H. J., Beddington, J., Crute, I., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–818.
- Havlik, P., Schneider, U., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalsky, R., Aoki, K., Cara, S., 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.
- Hellmann, F. & Verburg, P. (2010). Impact assessment of the European biofuel directive on land use and biodiversity. *Journal of Environmental Management*, 91, 1389–1396.
- Houghton, J., Meira Filho, L., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D., & Callender, B. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC (2007). *Climate Change 2007 : Mitigation of climate change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Izaurrealde, R., Williams, J. R., McGill, W., Rosenberg, N. J., & Jakas, M. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192, 362–384.
- Kindermann, G., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., & Mccallum, I. (2006). Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices. *Carbon Balance and Management*, 1, 15.
- Laborde, D. (2011). *Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies*. Technical report, Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies.
- Muhammad, A., Seale, J., Meade, B., & Regmi, A. (2011). *International Evidence on Food Consumption Patterns: An Update Using 2005 International Comparison Program Data*. Technical report, The U.S. Department of Agriculture (1929) USDA-ERS.
- Petsakos, T. & Jayet, P. (2013). Evaluating the efficiency of a uniform N -input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling & Assessment*, 18, 57–72. Submitted, 2012.
- Skalsky, R., Tarasovicova, Z., Balkovic, J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G., & Scholtz, P. (2008). *GEO-BENE global database for bio-physical modeling v. 1.0 - concepts, methodologies and data*. The GEO-BENE database report 58 pp, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria.

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & B.L., B. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20260–20264.
- Van Vuuren, D., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S. K., & Arnell, N. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22, 21–35.
- Vrolijk, H.-C.-J., Meier, B., Kleinhanß, W., & Poppe, K.-J. (2004). FADN: buttress for farm policy or a resource for economic analysis? *EuroChoices*, 3, 32–37.
- Williams, J. R. (1995). The epic model. V.P. Singh (ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 909–1000.

BIBLIOGRAPHY

Chapter 7

Conclusion

7.1 Chapitre 7: Conclusion et Perspective

Les travaux présentés dans cette thèse avaient à l'origine pour objet d'étudier le fonctionnement de système de "prairies-élevage" Européen face aux défis futurs, notamment dans le contexte de l'évolution du climat. Une revue de littérature a révélé l'importance du système de prairie-élevage (*cf.* [Chapitre 1](#)) au travers des services environnementaux et économiques qu'il apporte sur la production agricole, changement d'affectation des terres et les émissions de GES. La combinaison des modèles en jeu ainsi que la présentation et la justification de la méthodologie utilisée ont été présentées dans le [Chapitre 2](#), elle constitue un instrument utile permettant de mieux évaluer l'avenir du système agricole et plus particulièrement celui du système prairie-élevage.

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes principalement appuyés sur le modèle quantitatif de l'offre agricole européenne d'AROPAj. Ce modèle a été identifié comme le modèle bien adapté aux problématiques que nous avons abordées dans la thèse, pour sa richesse en termes de typologie détaillée des exploitants agricoles européens (1074 groupes-types dans la version 2 du modèle représentant l'UE-15 et 1307 groupes-types dans la version 3 pour l'UE-24). Notre méthodologie est basé sur le couplage du modèle AROPAj, avec trois différents modèles : un modèle de culture (STICS), un modèle biogéochimique de simulation d'un écosystème prairial (PaSim) et un modèle d'équilibre partiel (GLOBIOM). Cela permet de façon pertinente différents scénarios climatiques et socioéconomiques. Ce cadre de travail a permis d'analyser finement les interactions entre le système de culture, les prairies et l'élevage avec les conséquences à venir des changements climatique et socioéconomique. À cette fin, deux types différents de scénario ont été utilisés : (i) les scénarios futurs de changement climatique "A2H2" et "B2H2" (couvrant la période de 1950-2100) proviennent du 4ème Rapport spécial de l'IPCC (AR4) sur les scénarios d'émissions (SRES) et (ii) les scénarios extrêmes d'évolution socio-économique de l'IPCC-AR5 "SSP1" et "SSP3" évaluant des politiques sur le changement climatique à l'horizon 2000-2050.

Une première analyse agro-économique montre que le changement climatique influence fortement la réallocation des terres agricoles en Europe. Le climat future ne semble pas être favorable aux surfaces agricoles dédiées aux prairies. Ces effets étaient encore plus prononcés dans les scénarios futurs avec l'adaptation des pratiques agricoles au changement climatique (quand les systèmes agricoles ont la possibilité de s'adapter en sélectionnant la culture précédente, la gestion du cycle des cultures et la disponibilité de l'eau d'irrigation), ce qui contribue à orienter la réallocation de terres agricoles vers les principales cultures de vente et les fourrages (*cf.* [Chapitre 3](#)). L'ensemble de ces changements

provoque des effets négatifs sur les émissions de gaz à effet de serre par l'augmentation de protoxyde d'azote liée à la consommation d'intrants azotés. Nous avons montré dans quelle mesure l'introduction d'une taxe sur les émissions de GES d'origine agricole, contribuera à mieux maîtriser les émissions de GES futur.

Les acquis de la thèse sont donc l'extension de la méthodologie développée par [Godard et al. \(2008\)](#) envers les productions végétales associées aux systèmes d'élevage (prairies). Pour ce faire, la valeur économique (estimée via les prix fictifs) des produits agricoles entièrement/ partiellement consommés sur la ferme a été calculés dans un premier temps à l'aide du modèle AROPAj (*cf.* [Chapitre 4](#)). La richesse de ce modèle résidant dans la présentation d'un grand ensemble d'exploitations agricoles européennes, nous a permis de faire un calcul détaillé à l'échelle de l'Europe entière. La méthode a été ensuite utilisée pour calculer les prix fictifs des prairies et fourrages qui ne sont pas commercialisés (*cf.* [Chapitre 5](#)). Ces prix fictifs ont ensuite servi pour construire les courbes de réponse à l'azote des prairies issues du modèle PaSim, qui estime le rendement des prairies gérées sous différentes conditions techniques et climatiques. L'un des apports de la thèse est donc d'intégrer la réponse du rendement des prairies à l'azote, alors qu'il s'agit d'un système multifonctionnel complexe qui manque notamment d'information sur sa valeur économique et sa productivité sujette à une grande variabilité. La prise en compte des fonctions dose-réponse des prairies, conduit à revoir nos estimations précédentes de l'utilisation des terres, l'ajustement de l'élevage et des apports d'azote.

Enfin, le futur des systèmes agricoles au travers de l'évolution des prix et des rendements agricoles a été étudié (*cf.* [Chapitre 6](#)) dans le cadre de deux scénarios contrastés de l'IPCC ("SSP1" et "SSP3") fondés sur des hypothèses macroéconomiques différentes concernant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Cette étude qui repose sur le couplage AROPAj-GLOBIOM nous permet d'analyser les systèmes agricoles en Europe et dans le reste du monde. Les résultats obtenus montrent que dans tous les scénarios, les surfaces des prairies européennes chutent fortement. Tandis que les surfaces de l'ensemble des terres cultivées et des pâturages en dehors de l'Europe augmentent au détriment des forêts et des autres végétations naturelles. En conséquence, les émissions de GES augmentent légèrement en Europe, et elles diminuent considérablement dans les autres régions hors d'Europe.

Ce travail a rencontré des difficultés pratiques, telles que l'accès à des données d'ARTIX (associant les modèles économique AROPAj et agronomique STICS, à la fois base de données et applications informatiques développées dans le cadre d'un travail présenté par [Leclere et al. \(2013\)](#)). L'acquisition et l'accès aux données nécessaires et l'élaboration d'une base de données complétant à l'ARTIX pour les prairies et fourrages étaient dif-

faciles à réaliser et donc nous avons abandonné l'idée d'améliorer et de compléter cette bases de données. Nous nous sommes tourné vers d'autres méthodes afin d'obtenir les fonction dose-réponse des prairies et d'analyser les effets économiques du changement climatique sur ces systèmes (Couplage AROPAj-PaSim, cf. [Chapitre 5](#)).

Une autre limite concernant cette thèse réside dans le fait que la question de l'effet des événements extrêmes n'a pas été traitée dans ce travail. Le modèle n'est pas encore développé pour prendre en compte les événements climatiques d'ampleur exceptionnelle comme la canicule européenne de 2003. Enfin, cette étude ne prend pas en compte les effets des ravageurs, les maladies ou les mauvaises herbes qui peuvent agir pour affecter les systèmes agricoles.

Parmi les perspectives offertes à ce travail, Je décline en trois axes particuliers méritent d'être approfondis:

I. *Les effets de l'irrigation sur le système agricole.*

L'eau et l'irrigation n'ont pas été explicitement intégrées dans ce travail. L'eau peut être un facteur limitant pour les systèmes agricoles. Les précédentes études (*e.g.* [Godard, 2005](#); [Galko, 2007](#); [Leclere et al., 2013](#)) ont considéré que l'eau était le plus souvent disponible sans stress hydrique dans les simulations réalisées avec le modèle STICS. Cette hypothèse est actuellement remise en cause dans les travaux de l'équipe (INRA- UMR Economie Publique).

II. *Le changement dans l'alimentation animale et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.*

L'alimentation animale, par sa composition et la présence d'additifs, peut conduire à réduire les émissions de méthane. Cet aspect n'a pas été développé dans cette thèse. Cependant, une revue de littérature montre que le changement de régime alimentaire des animaux peut contribuer à diminuer les émissions de méthane des ruminants. Certains auteurs mettent l'accent sur les probiotiques, un supplément alimentaire, qui peuvent aider à réduire les émissions de méthane provenant de bovins laitiers (*e.g.* [Frumholtz et al., 1989](#); [Mutsvangwa et al., 1992](#)). Compte tenu du paramétrage des fonctions d'alimentation animale (élaborées initialement avec des zootechniciens), le modèle AROPAj pourrait sans doute intégrer cet aspect.

III. *Les conséquences des changements dans les systèmes et les marchés agricoles européens sur le reste du monde agricole.*

Les effets des changements climatique et socio-économique varient selon les régions. Tous ces changements, en particulier avec l'augmentation de la population

dans les pays en développement, influencent indirectement la marché agricole européen par les échanges internationaux et l'évolution des prix. Dans cette thèse cette question n'a pas été véritablement abordée, même si le couplage des modèles AROPAj et GLOBIOM s'avère prometteur.

Bibliography

- Frumholtz, P.-P., Newbold, C.-J., & Wallace, R.-J. (1989). Influence of *aspergillus oryzae* fermentation extract on the fermentation of a basal ration in the rumen simulation technique (Rusitec). *Journal of Agricultural Science*, 113, 169–172.
- Galko, E. (2007). *Modélisation de l'offre agricole européenne face à de nouveaux enjeux : réformes politiques, effet de serre et changement climatique*. PhD thesis, ABIES.
- Godard, C. (2005). *Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle Européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique*. PhD thesis, ABIES.
- 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.
- Leclere, D., Jayet, P.-A., & De Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change. *Ecological Economics*, 87, 1–14.
- Mutsvangwa, T., Edwards, I.-E., Topps, J.-H., & Paterson, G.-F.-M. (1992). The effect of dietary inclusion of yeast culture (yea-sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Animal Production*, 55, 35–40.

BIBLIOGRAPHY

Chapter 8

Bibliography

8.1 Bibliography

Bibliography

- AAC (2006). *Le biodiésel*. Technical report, Agriculture et Agroalimentaire Canada. <http://publications.gc.ca/collections/Collection/A27-18-19-15F.pdf>.
- Aghajanzadeh-Darzi, P., Frank, S., Havlik, P., & Jayet, P.-A. (2013). Global change challenges for the EU agricultural sector: A multi-scale model analysis. In *Congrès EAERE, Toulouse*.
- Aghajanzadeh-Darzi, P., Jayet, P.-A., & Petsakos, A. (2012). Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on-farm source inputs and outputs. 28th ICAE - International Conference of Agricultural Economists, Foz do Iguaçu, Brazil.
- Agrest (2013). *Les cultures fourragères et les prairies dans les moyennes et grandes exploitations*. Technical report, Agreste.
- Al-Riffai, P., Dimaranan, B., & Laborde, D. (2010). *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate*. Technical report, International Food Policy Research Institute.
- Andersen, J.-H., Conley, D.-J., & Hedal, S. (2004). Palaeoecology, reference conditions and classification of ecological status: the EU water framework directive in practice. *Marine Pollution Bulletin*, 49, 283–290.
- AnimalChange-FP7 (2012). *Model linkages between GLOBIOM, CAPRI and AROPAj for simulations of long-term climate change scenarios*. Technical report, Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability.
- Arslan, A. (2011). Shadow vs. market prices in explaining land allocation: Subsistence maize cultivation in rural Mexico. *Food Policy*, 36, 606–614.
- Arslan, A. & Taylor, J. E. (2009). Farmers' subjective valuation of subsistence crops: The case of traditional maize in Mexico. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(4), 956–972.

- Bakkened, M., Eickhout, B., & Alkemade, R. (2006). Impacts of different climate stabilisation scenarios on plant species in Europe. *Global Envir*, 16, 19–28.
- Bakker, M.-M., Hatna, E. Kuhlman, T., & Mùcher, C.-A. (2011). Changing environmental characteristics of European cropland. *Agricultural Systems*, 104, 522–532.
- Balkovic, J., Skalsky, R., Schmid, E., Tarasovicova, Z., & Jurani, B. (2009). *D2100 of the cc-tame project: Database and data strategy report*. Technical report, .
- Bamière, L., Godard, C., Debove, E., De Cara, S., Jayet, P.-A., & Niang, B. (2005). Interface between agriculture and the environment: integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture. In *Modelling agricultural policies: State of the Art and New Challenges, Proceedings of the 89th European Association of Agricultural Economists, Parma, Italy, Feb. 3-5, 2005*.
- Banse, M., Van Meijl, H., Tabeau, A., Woltjer, G., Hellmann, F., & Verburg, P. (2011). Impact of EU biofuel policies on world agricultural production and land use. *Biomass and Bioenergy*, 35, 2385–2390.
- Bard, E. (2004). Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *C. R. Geoscience*, 336, 603–638.
- Bates, J. (2001). *Economic Evaluation of Emission Reductions of Nitrous Oxides and Methane in Agriculture in the EU*. Technical report, AEA Technology Environment.
- Behrens, A., Georgiev, A., & Carraro, M. (2010). *Future Impacts of Climate Change across Europe*. Technical report, Centre for European Policy Studies (CEPS).
- Bernués, A., Ruiz, R., Olaizola, A., Villalba, D., & Casasus, E. (2011). Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European mediterranean context: Synergies and trade-offs. *Livestock Science*, 3, 1–14.
- Bouma, J., Varallyay, G., & Batjes, N.-H. (1998). Principal land use changes anticipated in Europe. *Agriculture, E*, 67, 103–119.
- Bouwman, A., Van Der Hoek, K., Eickhout, B., & Soenario, I. (2005). Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, 84, 121–153.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., B., M., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.-M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.-P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., & Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309–332.

- Brisson, N. & Levrault, F. (2007-2010b). *Livre Vert de projet CLIMATOR, Changement Climatique, Agriculture et Forêt en France: simulation d'impacts sur les principales espèces*. ADEME.
- Brisson, N. & Levrault, F. (2010a). *Changement Climatique, Agriculture et Forêt en France : simulation d'impacts sur les principales espèces. Livre Vert de projet CLIMATOR (2007-2010)*. ADEME.
- Brisson, N. & Mary, B. (2002). *STICS versions 5.0 Notice concepts et formalismes*. Technical report, INRA.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antoinoletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., & Delecolle, R. (1998). Stics: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. i. theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311–346.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.-H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antoinoletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.-M., & Delecolle, R. (2008). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Up date Sciences and technologies.
- Britz, W. & Hertel, T. (2011). Impacts of EU biofuels directives on global markets and EU environmental quality: An integrated PE, global CGE analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142, 102–109.
- Britz, W. & Witzke, H.-P. (2008). *CAPRI model documentation 2008 : Version 2*. Technical report, .
- Bryan, E., Ringler, C., Okoba, B., Koo, J., Herrero, M., & Silvestri, S. (2011). *Agricultural Management for Climate Change Adaptation, Greenhouse Gas Mitigation, and Agricultural Productivity*. Technical report, International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Calanca, P. & Fuhrer, J. (2005). *Swiss Agriculture in a Changing Climate: Grassland Production and its Economic Value*. Springer Netherlands.
- Calanca, P., Vuichard, N., Campbell, C., Viovy, N., Cozic, A., Fuhere, J., & Soussana, J. (2007). Simulating the fluxes of CO_2 and N_2O in European grasslands with the pasture simulation model (pasim). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 164–174.

- Caldeira, K. & Wickett, M.-E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425, 365.
- Cannell, E.-M. & Thornely, J.-H.-M. (1998). N-poor ecosystems may respond more to elevated CO_2 than n-rich ones in the long term. a model analysis of grassland. *Global Change*, 4, 431–42.
- Cantelaube, P., Jayet, P.-A., Carré, F., Zakharov, P., & Bamps, C. (2012). Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level. *Land Use Policy*, 29, 35–44.
- Carlier, L., Rotar, I., Vlahova, M., & Vidican, R. (2009). Importance and functions of grasslands. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 1, 25–30.
- Casey, J.-W. & Holden, N.-M. (2005). Analysis of greenhouse gas emissions from the average Irish milk production system. *Agricultural Systems*, 86, 97–114.
- Chase, L. E. (2007). Climate change impacts on dairy cattle. .
- Ciais, P., Peichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.-D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.-F., J.-M., S., Schulze, E.-D., Vesala, T., & Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529–533.
- Cisar, J., A., I., Feyen, L., Szaboa, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C., Huntm, A., Moreno, A., Richards, J., & Soria, A. (2011). Physical and economic consequences of climate change in Europe. *PNAS*, 108, 2678–2683.
- Comission, E. (2009). *Comission staff working document, EU 2009 Report on Policy Coherence for Development*. Technical report, Comission of the European communities.
- Cook, E.-R., Seager, R., Cane, M.-A., & Stahle, D.-W. (2007). North american drought: reconstructions, causes, and consequences. *Science Direct*, 81, 93–134.
- Corrall, A.-J. (1988). *Prediction of production from grassland*. Technical report, Information Bulletin of the FAO European Research Co-operative Network on Pastures and Field Crops, Herba 1, Agronomy Institute of the University of Florence, Italy, pp. 25-28.

- Cossée, B. (1999). La plurifonctionnalité des prairies. *AFPF*, 160, 333–343.
- Crosson, P., Shalloo, L., O'Brien, D., Lanigan, G., Foley, P.-A., Boland, T.-M., & Kenny, D.-A. (2011). A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 29–45.
- De Cara, S., Houzé, M., & Jayet, P.-A. (2005a). Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs. *Environmental and resource economics*, 32(4), 551–583.
- De Cara, S., Houzé, M., & Jayet, P. A. (2005b). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture in the EU: A Spatial Assessment of Sources and Abatement Costs. *Environmental and Resource Economics*, 32, 551–583.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (1999). Evaluation et régulation de l'effet de serre d'origine agricole. *L'Actualité Economique*, 75(4), 597–623.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2000a). Emissions of greenhouse gases from agriculture : the heterogeneity of abatement costs in france. *European Review of Agricultural Economics*, 27(3)(4), 281–303.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2000b). Régulation de l'effet de serre d'origine agricole: puits de carbone et instruments de second rang. *Economie et Prévision*, 143-144, 37–46.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions in EU agriculture: An assessment of the costs of reducing agricultural emissions and enhancing carbon sinks in agricultural soils. In *INSEA Report SSP1-CT-2003-503614-Final*, European Commission, INSEA, IIASA, Laxenburg, Austria.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2011b). 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.
- De Cara, S. & Thomas, A. (2008). *Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020*. Technical report, INRA. 192 pp.
- De Janvry, A., Fafchamps, M., & Sadoulet, E. (1991). Peasant Household Behavior with Missing Markets: Some Paradoxes Explained. *The Economic Journal*, 101(409), 1400–1417.
- De Ridder, N., Van Keulen, H., Seligman, N.-G., & Neate, P.-J.-H. (1985). *Modelling of Extensive Livestock Production Systems*. Technical report, International Livestock Centre for Africa.

- Destandau, F. & Nafi, A. (2010). What is the best distribution for pollution abatement efforts? information for optimizing the wfd programs of measures. *Environmental and Resource Economics*, 46, 337–358.
- Diegueiz Cameroni, F. (2007-2008). *Productions de viande et de lait en prairie. Effets du chargement et de la fertilisation azotée minérale sur les performances animales et sur le cycle de l'azote*. PhD thesis, Université de Liège, Faculté de médecine vétérinaire.
- Djaout, F., Le Goffe, P., & Tauber, M. (2008). *Comment appliquer la directive nitrates et à quel coût. Une modélisation spatiale du marché de l'épandage*. Technical report, UMR INRA-Agrocampus Ouest SMART (Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires) et UR INRA LERECO (Laboratoires d'Etudes et de Recherches Economiques).
- Dorin, B. & Gitz, V. (2007). Ecobilans de biocarburants: une revue des controverses et des enjeux agronomiques mondiaux. soumis à la revue Natures, Sciences, Sociétés depuis le 05/12/2007.
- Doyle, C.-J. & Elliott, J.-G. (1983). Putting an economic value on increases in grass production. *Grass and Forage Science*, 38, 169–177.
- Durandau, S., Gabrielle, B., Godard, C., Jayet, P. A., & Le Bas, C. (2010b). Coupling biophysical and microeconomic models to assess the effect of mitigation measures on greenhouse gas emissions from agriculture. *Climatic Change*, 98, 51–73.
- Dyer, G. A., Boucher, S., & Taylor, J. E. (2006). Subsistence Response to Market Shocks. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(2), 279–291.
- Eggers, J., Troltsch, K., Falcucci, A., Maiorano, L., Verburg, P., Framstad, E., Louette, G., Maes, D., Nagy, S., Ozinga, W., & Delbaere, B. (2009). Is biofuel policy harming biodiversity in Europe? *GCB Bioenergy*, 1, 18–34.
- Eichholzer, M. & Gutzwiller, F. (1998). Dietary nitrates, nitrites, and N-nitroso compounds and cancer risk: A review of the epidemiologic evidence. *Nutrition Reviews*, 56, 95–105.
- Eurostat (2011). *Projections de population 2010-2060*. Technical report, Eurostat.
- Eurostat (2012). *Agriculture, fishery and forestry statistics; Main results 2010-11*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- FAO (1997). *Le Changement Climatique, les Forêts et l'Aménagement Forestier: Aspects Généraux*. FAO.

- FAO (2002a). *Agriculture mondiale: horizon 2015-2030*. Technical report, Food and Agriculture organization of the United Nations.
- FAO (2002b). *World agriculture: towards 2015/2030*. Technical report, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- FAO (2003). *Agriculture, food and water*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO (2009a). *How to Feed the World in 2050*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2009b). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2009*. FAO.
- FAO (2009c). *The State of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2010a). *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems; A technical report on grassland management and climate change mitigation*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO (2010b). *Greenhouse gas emissions from the dairy sector-a life cycle assessment*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Animal Production and Health Division (FAO), Rome, Italy.
- FAO (2012). *FAO Statistical Yearbook, World Food and Agriculture*. Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90–98.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.-A.-K., & Yaisawarng, S. (1993). Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. *The Review of Economics and Statistics*, 75, 374–380.
- Färe, R., Grosskopf, S., & Weber, W.-L. (2006). Shadow prices and pollution costs in U.S. agriculture. *Ecological Economics*, 56, 89–103.
- Fischer, G. & Schrattenholzer, L. (2001). Global bioenergy potentials through 2050. *Biomass and Bioenergy*, 20, 151–159.

- Fischer, G., Prieler, S., Van Velthuizen, H., Berndes, G., Faaij, A., Londo, M., & De Wit, M. (2010). Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures, part ii: Land use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 34, 173–187.
- Fischer, G., Shah, M., & van Velthuizen, H. (2002). *Climate Change and Agricultural Vulnerability, Special Report to the UN World Summit on Sustainable Development, Johannesburg 2002*. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis under United Nations Institutional Contract Agreement No. 1113.
- Food & organization of the United Nations, A. (2005). *Grasslands of the World*. FAO.
- Friel, S., Dangour, A.-D., Garnett, T., Lock, K., Chalabi, Z., Roberts, L., Butler, A., Butler, C.-D., Waage, J., McMichael, A.-J., & Haines, A. (2009). Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: food and agriculture. *Lancet*, 374, 2016–2025.
- Frumholtz, P.-P., Newbold, C.-J., & Wallace, R.-J. (1989). Influence of aspergillus oryzae fermentation extract on the fermentation of a basal ration in the rumen simulation technique (rusitec). *Journal of Agricultural Science*, 113, 169–172.
- Fuquay, J.-W. (1989). Heat stress as it affects animal production. *Animal science*, 52, 164–174.
- Galko, E. (2007). *Modélisation de l'offre agricole Européenne face à de nouveaux enjeux : réformes politiques, effet de serre et changement climatique*. PhD thesis, ABIÉS.
- Galko, E. & Jayet, P. A. (2011b). Economic and environmental effects of decoupled agricultural support in the EU. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.
- Gilmanov, T.-G., Soussana, J.-F., Aires, L., Allard, V., Ammann, C., Balzarolo, M., Barcza, Z., Bernhofer, C., Campbell, C.-L., Cernusca, A., Cescatti, A., Clifton-Brown, J., Dirks, B.-O.-M., Dore, S., Eugster, W., Fuhrer, J., Gimeno, C., Gruenwald, T., Haszpra, L., Hensen, A., Ibrom, A., Jacobs, A.-F.-G., Jones, M., Lanigan, G., Laurila, T., Lohila, A., Manca, G., Marcolla, B., Nagy, Z., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Raschi, A., Rogiers, N., Sanz, M.-J., Stefani, P., Sutton, M., Tuba, Z., Valentini, R., Williams, M.-L., & Wohlfahrt, G. (2007). Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 93–120.
- Godard, C. (2005). *Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle Européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique*. PhD thesis, ABIÉS.

- Godard, C., Roger-Estrade, J., Jayet, P.-A., Brisson, N., & Le Bas, C. (2008a). 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.
- Godfray, H. J., Beddington, J., Crute, I., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–818.
- Grainger, C. & Beauchemin, K.-A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology*, 166, 308–320.
- Graux, A., Bellocchi, G., Lardy, R., & Soussana, J.-F. (2013). Ensemble modelling of climate change risks and opportunities for managed grasslands in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 114–131.
- Graux, A.-I., Gaurut, M., Agabriel, J., Baumont, R., Delagarde, R., Delaby, L., & Soussana, J.-F. (2011). Development of the pasture simulation model for assessing livestock production under climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 69–91.
- Greer, F. & Shannon, M. (2005). The committee on nutrition, and the committee on environmental health. Infant methemoglobinemia: The role of dietary nitrate in food and water. *Pediatrics*, 116, 784–786.
- Hadley, D. (1998). Estimation of shadow prices for undesirable outputs: an application to UK dairy farms. .
- Hanson, J.-D. & Baker, B.-B. (1993). Comparison of the effects of different climate change scenarios on rangeland livestock production. *Agricultural Systems*, 41, 487–502.
- Havlik, P., Schneider, U.-A., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalsky, R., Aoki, K., De Cara, S., 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.
- Hellmann, F. & Verburg, P. (2010). Impact assessment of the European biofuel directive on land use and biodiversity. *Journal of Environmental Management*, 91, 1389–1396.
- 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.
- Hopkins, A., Gustafsson, T., Bertilsson, J., Dalin, G., Nilsson-Linde, N., & Spornly, E. (2008). *Biodiversity and Animal Feed: Future challenges for grassland production*. Technical report, European Grassland Federation.
- Houghton, J., Meira Filho, L., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D., & Callender, B. (1996). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Humblot, P., Leconte-Demarsy, D., Clerino, P., Szopa, S., Castell, J.-F., & Jayet, P.-A. (2013b). Assessment of ozone impacts on farming systems: A bio-economic modeling approach applied to the widely diverse French case. *Ecological Economics*, 85, 50–58.
- Huyghe, C. (2008). La multifonctionnalité des prairies en France: I. les fonctions de productions. *Cahiers Agricultures*, 17, 427–435.
- IPCC (2000). *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2001a). *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical report, Cambridge University Press, New York.
- IPCC (2001b). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of WG II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007: Mitigation of climate change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007b). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2007c). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. IPCC Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- IPCC (2007d). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2010). *IPCC Workshop on Socio-Economic Scenarios*. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- Izaurrealde, R.-C., Williams, J.-R., McGill, W.-B., Rosenberg, N.-J., & Quiroga Jakas, M.-C. (2006). Simulating soil C dynamics with epic : Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192, 362–384.
- 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.
- Jansson, T. & Heckelei, T. (2011). Estimating a primal model of regional crop supply in the European union. *Agricultural Economics*, 62, 137–152.
- Jarrige, R. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Technical report, INRA.
- Jayet, P.-A. (2006). *Deliverable 4*. Technical report, GENEDEC project document.
- Jayet, P.-A., Birfet, A., & Hofstetter, A. (1998). Forêt paysanne et politique agricole commune : une évaluation des impacts d'une incitation au reboisement. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 48, 6–35.
- Jayet, P.-A. & Labonne, J. (2005b). Impact d'une réforme de la politique agricole commune par le découplage. *Economie et Prévision*, 167(1), 101–116.
- Jayet, P. A. & Petsakos, A. (2013). Evaluating the efficiency of a uniform N-input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling and Assessment*, 18(1), 57–72.
- Júdez, L., de Andrés, R., Ibáñez, M., de Miguel, J.-M., Miguel, J.-L., & Urzainqui, E. (2008). *Impact of the CAP reform on the Spanish agricultural sector*, chapter 11, (pp. 151–161). Ashgate Publishing Limited.
- Johnson, K.-A. & Johnson, D.-E. (1995). Methane emissions from cattle. *Animale Science*, 73, 2483–2492.
- Jouven, M. & Baumont, R. (2008). Simulating grassland utilization in beef suckler systems to investigate the trade-offs between production and floristic diversity. *Agricultural systems*, 96, 260–272.

- Key, N., Sadoulet, E., & De Janvry, A. (2000). Transaction Costs and Agricultural Household Supply Response. *American Journal of Agricultural Economics*, 82(2), 245–259.
- Kimball, B.-A., Kobayashi, K., & Bindi, M. (2002). Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 77, 293–368.
- Kindermann, G.-E., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., & I., M. (2006). Predicting the deforestation-trend under different carbon-prices. *Carbon Balance and Management*, 1, 1–17.
- Kleinjans, J.-C., Albering, H.-J., Marx, A., van Maanen, J.-M., van Agen, B., ten Hoor, F., Swaen, G.-M., & Mertens, P.-L. (1991). Nitrate contamination of drinking water: Evaluation of genotoxic risk in human populations. *Environmental Health Perspectives*, 94, 189–193.
- Laborde, D. (2011). *Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies*. Technical report, Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies.
- Leclère, D. (2012). *Offre agricole Européenne et changement climatique : une exploration régionale des enjeux liés aux changements d'échelle par la modélisation intégrée*. PhD thesis, ABIES.
- Leclère, D., Jayet, P.-A., & de Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change. *Ecological Economics*, 87, 1–14.
- Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, P., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S., & Biala, K. (2010). *Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS)*. Technical report, European Commission, Joint Research Centre.
- Leterme, P. & Menasseri, S. (2006). Azote, colza et exploitations laitières. *OCL*, 13, 419–425.
- Li, C.-S. (2000). Modelling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58, 259–276.
- Luscher, A., Fuhrer, J., & P.-C.-D, N. (2005). *Grassland - a global resource*, chapter Global atmospheric change and its effect on managed grassland systems, (pp. 251–264). Wageningen Academic Publishers.

- Martin, J., Henrichs, T., Pirc-Velkavrh, A., Volkery, A., Jarosinska, D., Csagoly, P., & Hoogeveen, Y. (2010). *The European environment - state and outlook 2010: synthesis*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- Martin, R., Gaurut, M., Lardy, R., Carrère, P., Graux, A.-I., Drouet, J., Fiorelli, J.-L., Blanfort, V., Capitaine, M., Duret, S., Gabrielle, B., Cellier, P., & Soussana, J.-F. (2011). Des modèles pour comprendre la réponse des écosystèmes prairiaux au changement climatique. *Innovations Agronomiques*, 12, 97–108.
- Mathis, P. (2009). Nourriture ou biocarburants: Faudra-t-il choisir? *Cah Agric*, 18, 447–452.
- McCown, R.-L., Hammer, G.-L., Hargreaves, J.-N.-G., Holzworth, D.-P., & Freebairn, D.-M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50, 255–271.
- Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R., & Meyer, L.
- Meybeck, A., Gitz, V., Azzu, N., Batello, C., Chaya, M., De Young, C., Friedrich, T., Gerber, P., Henderson, B., Osborn, T., Sessa, R., Soto, D., Yirenyki, S., & Martinez, D. (2012). *Greening the economy with climate-smart agriculture*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Moreau, J.-C. & Lorgeou, J. (2007). Premiers éléments de prospective sur les conséquences des changements climatiques: impacts sur les prairies, le maïs et les systèmes fourragers. *Fourrages*, 191, 285–295.
- Muhammad, A., Seale, J., Meade, B., & Regmi, A. (2011). *International Evidence on Food Consumption Patterns: An Update Using 2005 International Comparison Program Data*. Technical report, The U.S. Department of Agriculture (1929) USDA-ERS.
- Mutsvangwa, T., Edwards, I.-E., Topps, J.-H., & Paterson, G.-F.-M. (1992). The effect of dietary inclusion of yeast culture (yea-sacc) on patterns of rumen fermentation, food intake and growth of intensively fed bulls. *Animal Production*, 55, 35–40.
- Naylor, R.-L., Liska, A., Burke, M.-B., Falcon, W.-P., Gaskell, J.-C., Rozelle, S.-D., & Cassman, K.-G. (2007). The theripple effect, biofuels, food security and the environment. *Environment*, 49, 30–43.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Buckley, F., Horan, B., Grainger, C., & Wallace, M. (2011). The effect of methodology on estimates of greenhouse gas emissions from grass-based dairy systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141, 39–48.

- OCDE (2006). *Libéralisation des échanges dans le domaine des énergies renouvelables et des technologies associées : biodiesel, énergie solaire thermique et énergie géothermique*. Technical report, OCDE.
- OCDE (2011b). *Évaluation des réformes des politiques agricoles de l'Union Européenne*. Technical report, OCDE (<http://dx.doi.org/10.1787/9789264112148-fr>).
- OCDE-FAO (2010). *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2010*. OCDE-FAO.
- OECD (2009). *Building Blocks for Policy Coherence for Development*. Technical report, Organization for Economic Cooperation and Development (OECD).
- OECD (2011). *Evaluation of Agricultural Policy Reforms in the European Union*. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD).
- Oenema, O. & Tamminga, S. (2005). Nitrogen in global animal production and management options for improving nitrogen use efficiency. *Science in china Ser. C Life Sciences*, 48, 871–887.
- O'Hara, P., Freney, J., & Ulyatt, M. (2003). *Abatement of Agriculture Non-Carbon Dioxide Greenhouse Gas Emissions*. MAF.
- Olarewaju, O., Adetunji, M., Adeofun, C., & Adekunle, M. (2009). Nitrate and phosphorus loss from agricultural land: implications for nonpoint pollution. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85, 79–85.
- 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., Schelde, K. Weiske, A., Weisbjerg, M.-R., Asman, W.-A.-H., & Djurhuus, J. (2006). Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 207–220.
- O'Mara, F. (2004). Greenhouse gas production from dairying: reduction methane production. *Advances in Dairy Technology*, 16, 295.
- Osterburg, B., Offermann, F., & Kleinhanss, W. (2001). *A Sector Consistent Farm Group Model for German Agriculture*, chapter IV, (pp. 152–159). Agricultural sector modelling and policy information systems : proceedings of the 65th European seminar of the European Association of Agricultural Economists (EAAE).
- Peters, G.-M., Rowley, H.-V., Wiedemann, S., Tuckers, R., Short, M.-D., & Schulz, M. (2010). Red meat production in australia: Life cycle assessment and comparison with overseas studies. *Environmental science and technology*, 44, 1327–1332.

- Petsakos, T. & Jayet, P.-A. (2013b). Evaluating the efficiency of a uniform n-input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling & Assessment*, 18, 57–72.
- Phetteplace, H.-W., Johnson, D.-E., & Seidl, A.-F. (2001). Greenhouse gas emissions from simulated beef and dairy livestock systems in the united states. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 99–102.
- Pierrehumbert, R. T. (2004). Greenhouse effect: Fourier's concept of planetary energy balance is still relevant today. *Nature*, 432, 677.
- Piot-Lepetit, I. & Vermersch, D. (1998b). Pricing organic nitrogen under the weak disposability assumption: An application to the french pig sector. *Journal of Agricultural Economics*, 49, 85–99.
- Rajagopal, D., Sexton, S.-E., Roland-Holst, D., & Zilberman, D. (2007). Challenge of biofuel: filling the tank without emptying the stomach? *Environment*, 2, 1–9.
- Reidsma, P., Ewert, F., Oude Lansink, A., & Leemans, R. (2009). Vulnerability and adaptation of European farmers: a multi-level analysis of yield and income responses to climate variability. *Regional Environmental Change*, 9, 25–40.
- Reinhard, S., Knox Lovell, C.-A., & Thijssen, G. (1999). Econometric estimation of technical and environmental efficiency: an application to dutch dairy farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 81, 44–60.
- Reinhard, S. & Thijssen, G. (2000). Nitrogen efficiency of dutch dairy farms: a shadow cost system approach. *European Review of Agricultural Economics*, 27, 167–186.
- Riedo, M., Grub, A., Rosset, M., & Futher, J. (1998). A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling*, 105, 141–183.
- Riedo, M., Gyalistras, D., Fischlin, A., & Fuhrer, J. (1999). Using an ecosystem model linked to gcm-derived local weather scenarios to analyse effects of climate change and elevated CO_2 on dry matter production and partitioning, and water use in temperate managed grasslands. *Global change biology*, 5, 213–223.
- Riedo, M., Gyalistras, D., & Fuhrer, J. (2000). Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: simulation of site-specific sensitivity to an increase in atmospheric CO_2 and to climate change. *Ecological Modelling*, 134, 207–227.

- Rotter, R. (1999). Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climatic Change*, 43, 651–681.
- 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 and Environment*, 107, 117–135.
- Ruget, F., Clastre, P., Moreau, J.-C., Cloppet, E., Souverain, F., Lacroix, B., & Lorgeou, J. (2012). Conséquences possibles des changements climatiques sur la production fourragère en France. i. estimation par modélisation et analyse critique. *Fourrages*, 210, 87–98.
- Samuelsson, P., Jones, C.-G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, C., Kjellstrom, G., Nikulin, G., & Wyser, K. (2011). The rossby centre regional climate model rca3: model description and performance. *Tellus*, 63, 4–23.
- Schmid, M., Neftel, A., Riedo, M., & Fuhrer, J. (2001). Process-based modelling of nitrous oxide emissions from different nitrogen sources in mown grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 177–187.
- Schonhart, M., Schmid, E., & Schneider, U.-A. (2011). CropRota - a crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy*, 34, 263–277.
- Seale, J., Regmi, A., & Bernstein, J. (2003). *International Evidence on Food Consumption Patterns*. Technical report, ERS-USDA.
- Seguin, B. & Soussana, J.-F. (2006). Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de ges. *Fourrages*, 186, 139–154.
- Sergent, D. (2011). Les chercheurs évaluent les effets de la pollution à l'azote. La Croix.
- Shaik, S., Helmers, G.-A., & Langemeier, M.-R. (2002b). Direct and indirect shadow price and cost estimates of nitrogen pollution abatement. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 27, 420–432.
- Shaik, S. & Helmersy, G.-A. (1999). *Shadow Price of Environmental Bads: Weak vs. Strong Disposability*. Technical report, University of Nebraska - Lincoln.
- Shanahan, T.-M., Overpeck, J.-T., Anchukaitis, K.-J., Beck, J.-W., Cole, J.-E., Dettman, D.-L., Peck, J.-A., Scholz, C.-A., & King, J.-W. (2009). Atlantic forcing of persistent drought in west africa. *Science*, 324, 377–380.

- Silva, J.-P., Toland, J., Jones, W., Eldridge, J., Thorpe, E., & O'Hara, E. (2008). *LIFE and Europe's grasslands: Restoring a forgotten habitat*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- Singh, I., Squire, L., & Strauss, J. (1986). The Basic Model: Theory, Empirical Results, and Policy Conclusions. In I. Singh, L. Squire, & J. Strauss (Eds.), *Agricultural Household Models: Extensions, Application and Policy* chapter 1, (pp. 17–47). Baltimore MD: The Johns Hopkins University Press.
- Skalsky, R., Tarasovicova, Z., Balkovic, J., Schmid, E., Fuchs, M., Moltchanova, E., Kindermann, G., & Scholtz, P. (2008). *GEO-BENE global database for bio-physical modeling v. 1.0 - concepts, methodologies and data*. Technical report, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria.
- Smit, H.-J., Metzger, M.-J., & Ewert, F. (2008). Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe. *Agricultural Systems*, 98, 208–219.
- Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 20, 219–230.
- Soussana, J.-F. & Luscher, A. (2007). Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass Forage Science*, 62, 127–134.
- Soussana, J.-F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4, 334–350.
- Soussana, J.-F., Teyssonneyre, F., Picon-Cochard, C., Casella, E., Belse, J.-M., Lherm, M., & Loiseau, P. (2002). Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production. *Fourrages*, 169, 3–24.
- Stampfli, A. & Zeiter, M. (2004). Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, 92, 568–576.
- Stehfest, E., Bouwman, L., van Vuuren, D.-P., den Elzen, M.-G.-J., Eickhout, B., & Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95, 83–102.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow, environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Steven K., R. & Huey-Lin, L. (2008). *Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions Data for Climate Change Economic Analysis*. Technical report, GTAP Working Paper No. 43.
- Supit, I., Van Diepen, C.-A., De Wit, A.-J.-W., Kabat, P., Baruth, B., & Ludwig, F. (2010). Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agricultural Systems*, 103, 683–694.
- Sutton, M.-A., Howard, C.-M., Erisman, J.-W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Van Grinsven, H., & Grizzetti, B. (2011). *The European Nitrogen Assessment, Sources, Effects and Policy Perspective*. Cambridge University Press, New York, United States of America.
- Taylor, J. E. & Adelman, I. (2003). Agricultural Household Models: Genesis, Evolution, and Extensions. *Review of Economics of the Household*, 1, 33–58.
- Thornely, J.-H.-M. & Cannell, M.-G.-R. (1997). Temperate grassland responses to climate change: an analysis using the hurley pasture model. *Annals of Botany*, 80, 205–21.
- Thornley, J.-H.-M. & Verberne, E.-L.-J. (1989). A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell and Environment*, 12, 863–886.
- Thornton, P.-K. (2010). Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical transactions of the royal society biological sciences*, 365, 2853–2867.
- Thornton, P.-K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., & Herrero, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101, 113–127.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & B.L., B. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20260–20264.
- Tilman, D., Cassman, K.-G., Matson, P.-A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
- Tobey, J., Reilly, J., & Kane, S. (1992). Economic implications of global climate change for world agriculture. *Agricultural and Resource Economics*, 17(1), 195–204.
- Topp Cairistiona, F.-E. & Doyle Christopher, J. (1996). Simulating the impact of global warming on milk and forage production in Scotland: 1. the effects on dry-matter yield of grass and grass-white clover swards. *Agricultural Systems*, 52, 213–242.

- Tubiello, F. & Fischer, G. (2007). Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 1030–1056.
- Tubiello, F.-N., Soussana, J.-F., & Howden, S.-M. (2007). Crop and pasture response to climate change. *PNAS*, 104, 19686–19690.
- Van Der Veeren, R.-J.-H.-M. & Tol, R.-S.-J. (2001). Benefits of a reallocation of nitrate emission reductions in the rhine river basin. *Environmental and Resource Economics*, 18, 19–41.
- Van Eeckhout, L. (2011). Pollution à l'azote: une lourde facture pour l'Europe. *Le Monde*. .
- Van Vuuren, D., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S. K., & Arnell, N. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22, 21–35.
- Verchot, L. V., Noordwijk, M. V., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackensen, J., Bantilan, C., Anupama, K. V., & Palm, C. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 901–918.
- Vrolijk, H.-C.-J., Meier, B., Kleinhanß, W., & Poppe, K.-J. (2004). FADN: buttress for farm policy or a resource for economic analysis? *EuroChoices*, 3, 32–37.
- Vuichard, N. (2005). *Modélisation des Flux de GES des Prairies Européennes*. PhD thesis, CEA-CNRS.
- Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., P., C., & Soussana, J.-F. (2007a). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 2. simulations at the continental level. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–13.
- Vuichard, N., Soussana, J.-F., Ciais, F., Viovy, N., Ammann, C., Calanca, P., Clifton-Brown, J., Fyhrer, J., Jones, M., & Martin, C. (2007b). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 1. model evaluation from in situ measurements. *Global Biogeochemical Sysles*, 21, GB1004.
- Whisler, F.-D., Acock, B., Baker, D.-N., Fye, R.-E., Hodges, H.-F., Lambert, J.-R., H.-E., L., McKinion, J.-M., & Reddy, V.-R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40, .

BIBLIOGRAPHY

Williams, J.-R. (1995). *The EPIC Model. In Computer Models of Watershed Hydrology.* Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.

Yang, C., Cheng, M., Tsai, S., & Hsieh, Y. (1998). Calcium, magnesium, and nitrate in drinking water and gastric cancer mortality. *Japanese Journal of Cancer Research*, 89, 124–130.

Annexe

8.2 VALIDATE project



VALIDATE project: Vulnérabilité des prairies et des élevages au changement climatique et aux évènements extrêmes

For more information: <http://www1.clermont.inra.fr/validate/projet/index.php>

VALIDATE is a 4-year project, under the program "Vulnerability": the environment and the climate. Which received funding from the French National Research Agency (ANR/2008-2012) under the grant agreement n° ANR- 07-VULN-11-011. Twelve French research teams working on this project including: INRA, CNRS, CEA, CERDACS and CEA-CNRS. The objective of VALIDATE is to evaluate the climate change effects on continental ecosystems, biogeochemical nutrient cycles in the environment and their products and services at French scale.

The AROPAj/STICS/PASIM/ORCHIDEE framework will thus allow for the first time to address consistently for France climate change impacts on farm typology and agricultural land use. The interaction between tropospheric climate and land cover is seen through ORCHIDEE. Change in land cover related to change in agricultural land use is seen through the economic model AROPAj which uses yield response functions (e.g. "fertilizer-yield") and GHG emission functions (e.g. "fertilizer- N_2O "). It should be noticed that the coupling between STICS and AROPAj is an external coupling implemented for a range of annual crops and for AROPAj farm types covering a large part of the French agri-

culture. The PASIM model will be used to simulate the pasture productivity and animal (live weight gain and milk production) outputs in the AROPAJ model. Response functions will be established to fertilizer inputs, animal stocking density, cutting frequency and changes in livestock breeds both for the current climate and for a time slice centered around 2050, using climate projections. Third, changes in the GHG budgets will be assessed for future climatic years, based on STICS and PASIM calculations of N_2O and CH_4 emissions and on simulated changes in soil carbon stocks. The vulnerability of livestock and arable agriculture to climate change will be assessed by analyzing the mean and distribution frequency of the aggregated production change of these sub-sectors for a range of future climatic years and scenarios. Moreover, the climate feedbacks will be calculated (means and variability) from the simulated crop and pasture GHG budgets, without including emissions from inputs (e.g. fossil fuel for tractors or for N mineral fertilizers production). Some of the caveats in this approach concern assumptions on future agricultural prices and on farm subsidies. Care will be taken to use economic scenarios that are consistent with the SRES scenarios used for climate modeling. Moreover, attention will be paid to the consistency between the different model versions, keeping the possibility of external recalibration of intermediate functions provided by one model to the benefit of another.

8.3 ANIMALCHANGE Projects



AnimalChange project: AN Integration of Mitigation and Adaptation options for sustainable Livestock production under climate CHANGE

For more information: <http://www.animalchange.eu/>

ANIMALCHANGE is a 4years project, financed by the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n° 266018. Twenty-five international research teams working on this project including: INRA, AU, Teagasc, UPM, AU-IBERS, DLO, SZIU-IBE, CIRAD, FDEA-ART, SAC, CEA, IIASA,

IT, Provimi, Fertiprado, UFRGS, EMBRAPA, INRAT, ISRA, UP, ILRI, Agreasearch Ltd, EAAP, FAO and JRC.

This project will provide scientific guidance on the integration of adaptation and mitigation objectives and design sustainable development pathways for livestock production in Europe, in Northern and Sub-Saharan Africa and Latin America. ANIMALCHANGE will inform public policy development in EU-27 and propose cooperation programs addressing smallholder livestock farming in selected developing countries. The core analytical spine of the project is a series of coupled biophysical and socio-economic models combined with experimentation. This allows exploring future scenarios for the livestock sector under baseline and atmospheric CO_2 stabilization scenarios. The objectives of ANIMALCHANGE will be to:

- Quantify and reduce uncertainties in greenhouse gas (GHG) emissions and assess climate change impacts on livestock systems (including grasslands)
- Revise estimates of the GHG balance of livestock systems and integrate soil carbon sequestration
- Integrate climate variability and extremes into the assessment of impacts, adaptation and vulnerability of livestock systems to climate change
- Develop breakthrough technologies for adaptation and mitigation to climate change for both ruminants and monogastrics
- Study and quantify trade-offs and synergies between adaptation and mitigation options
- Assess the potential societal and sectoral costs and benefits of these options for the livestock sector in Europe and in study regions of Africa and Latin America
- Assess climate change vulnerability of animal production and of associated GHG emissions
- Provide direct support through the design of an integrated and consistent mitigation and adaptation policy framework for the livestock sector

8.4 Curriculum vitae



Parisa AGHAJANZADEH-DARZI was born in Tehran, Iran on July 18, 1983. She attended the Azad University in Iran. She received her bachelor degree in Natural resources Engineering with honors, earning the second place in her promotion.

For 4 years she worked as a technical engineer at Nikotec Ltd. (a subsidiary company of *Probiotic International Ltd, Royaume-Uni*).

For more information: <http://www.protexin.com/>.

In 2010 she obtained her Master degree in “Sciences et Technologies du Vivant et de l’Environnement” (Master II de recherche en Économie du Développement Durable, de l’Environnement et de l’Energie" (EDDEE)) from [AgroParis-Tech](#) in Paris, France. She did her master internship in [INRA, UMR Economie-Publique](#) (l’Unité Mixte de Recherche (UMR) en Economie publique INRA-AgroParisTech.).

She began her PhD on 01/12/2010 in [INRA, UMR Economie-Publique](#). The subject of her doctoral research was “Economic analysis of the climate change effects on the grassland-breeding systems at the European scale”. Her PhD was co-financed for 3 years by [INRA](#) and [ADEME](#)¹ in the context of two research projects: one at French scale “[VALIDATE](#)” and other at European level “[ANIMALCHANGE](#)”.

¹French Environment and Energy Management Agency, Angers, France

8.5 Valorisation des travaux de recherche

8.5.1 Communications écrites

Revues scientifiques/Publication

- Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A.; Impact économique du changement climatique sur l'alimentation animale et l'élevage dans l'Union Européenne, Fourrages, N°215, Septembre 2013

Rapports d'activité

- Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A., 2012; Vulnerability to climate change hazards: An economic analysis of the French grassland-livestock sector, Rapport d'activités du projet VALIDATE
- Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A., 2013; Rapport d'activités du projet AnimalChange

8.5.2 Communications orales

- 2012: 28th ICAE - International Conference of Agricultural Economists, Foz do Iguaçu, Brazil.
Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A.; Improvement of a bio-economic mathematical programming model in the case of on- farm source inputs and outputs
- 2012: 28th ICAE - International Conference of Agricultural Economists, Foz do Iguaçu, Brazil.
Ben Fradj, N.; Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A.; Competition between food, feed, and (bio)fuel as a major implication of the second generation feedstock production at the European scale: a model assessment.
- 2013: AFPP - Association française pour la production fourragères, Paris, France.
Aghajanzadeh-Darzi, P.; Jayet, P.A.; Impact économique du changement climatique

sur l'alimentation animale et l'élevage dans l'Union Européenne

- 2013: 20TH EAERE - European Association of Environmental and Resource Economists, Toulouse, France
Aghajanzadeh-Darzi, P.; Frank, S.; Havlik, P.; Jayet, P.A.; Global change challenges for the EU agricultural sector: A multi- scale model analysis

Parisa AGHAJANZADEH-DARZI, inscrite à l'école doctorale ABIES (Agriculture Alimentation BIologie Environnement Santé) à Paris, présentera le 28 Février 2014 sa thèse intitulée : "Effets du changement climatique sur le système de prairies-élevage: analyse économique à l'échelle Européenne". Cette thèse a été réalisée à l'UMR Economie Publique à Grignon et encadrée par Pierre-Alain JAYET (INRA-210 UMR Economie Publique) et cofinancée par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique).