



## THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de  
l'Environnement  
(Agro Paris Tech)

Spécialité : Sciences Sociales

présentée et soutenue publiquement  
par

**Elodie Galko**

le 24 octobre 2007

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

Directeur de thèse : Pierre-Alain JAYET

INRA, UMR210 Économie Publique, 78850 Thiverval-Grignon

Devant le jury :

Sylviane Gastaldo	Directrice de l'ENSAE, Examineur
Bruno Henry de Frahan	Professeur, Univ. catholique de Louvain (Belgique), Examineur
Pierre-Alain Jayet	Directeur de Recherche, INRA
Claude Millier	ENGREF, Examineur
Michel Moreaux	Professeur, Univ. de Toulouse 1, Rapporteur
Katheline Schubert	Professeur, Univ. de Paris 1, Rapporteur
Bernard Seguin	Directeur de Recherche, INRA, Examineur



# Remerciements

*Vous vous apprêtez à lire la seule partie de ma thèse que j'aurai rédigée en nocturne !*

Je commencerai par remercier les membres de mon jury, Sylviane Gastaldo, Bruno Henry de Frahan, Claude Millier, Michel Moreaux, Katheline Schubert et Bernard Seguin, qui ont accepté d'examiner mes travaux et m'ont fait l'honneur de les commenter et me questionner.

Je souhaite aussi remercier ceux grâce à qui cette thèse a été possible : Dominique Bureau, Sylviane Gastaldo et Pierre-Alain, qui m'ont apporté tout leur appui quand ma future thèse n'était encore qu'un projet. Ils ont fait accepter mon sujet de thèse par le ministère de l'agriculture. Je remercie également Bernard Seguin qui, en apportant le nerf de la guerre, a permis de débloquer la situation.

Mes remerciements les plus sincères vont également aux membres de mon comité de thèse : Sylviane Gastaldo et Katheline Schubert pour les économistes, Nathalie de Noblet et Bertrand Ney pour les biophysiciens. Leurs conseils m'auront été utiles. Je remercie également Claude Millier, mon tuteur à l'Engref qui m'a aidé à me poser les bonnes questions pour réfléchir à mon poste d'après thèse.

Je tiens particulièrement à remercier Pierre-Alain, qui aura été à la fois mon directeur de thèse et mon encadrant direct. Il m'a laissé la liberté qui m'était nécessaire et les marges de manœuvre qu'il avait besoin de me laisser. Il aura successivement supporté mon cheval, et mes deux congés de maternité pour la naissance de ma fille puis de mon fils. Il m'a également offert une expérience marquante en m'accordant toute sa confiance pour encadrer une petite équipe d'ingénieurs fort sympathiques.

Je remercie également mes relecteurs : Stéphane De Cara, Raja Chakir, Maïa David, Edouard Baranger, Sophie Durandeu, mais aussi mon mari, Florent et mon père.

Enfin, mon travail n'aurait été possible sans l'achèvement des travaux de Caroline Godard. Nous avons partagé 2 années au labo, son sens du détail aura été une leçon de vie.

Pour en finir avec les remerciements "académiques", je mentionnerai aussi Nadine Brisson, ainsi que la communauté STICS, ses danses bretonnes et ses séminaires en bord de mer.

Le cadre de mes 3 années et demi de thèse a été le laboratoire d'économie publique de Grignon et son ambiance inoubliable. Je n'oublierai pas les grands débats, plus ou moins scientifiques qui ont animé nos footings et pauses café. A chaque événement à venir, de nature plus ou moins prévisible, comme une coupe du monde ou une élection, je ne manquerai pas d'imaginer un barème pour prendre les paris. Chaque mois de janvier me fera penser aux merveilleuses galettes de Grignon (février et mars aussi d'ailleurs!). Et l'odeur du café me rappellera toujours la table de votre salle café, rarement impeccable car toujours surchargée de victuailles en tout genre. Et puis, le parc me manquera pour les innombrables possibilités qu'il me laissait pour mes entraînements pour les

20km de Paris et à mes compagnons de course que je n'aurai pas réussi à convaincre de me suivre jusqu'au bout. Et parce que les récréations scientifiques peuvent aussi être studieuses, les cours d'anglais en sont un exemple. Des moments de détente en anglais où il fallait bien faire ses leçons ! Bien sûr, mes deux grossesses ont eu une incidence sur certaines conversations, merci pour ces partages d'expériences avec les jeunes, moins jeunes et futures mamans du labo ! Et notre public masculin a finalement été presque aussi patient que nous les écoutant parler de foot et de Yannick Noah.

Nathalie, Sylvie, Estelle, Raja, Sophie, Anne-Claire, Maïa, Binou, Caroline, Catherine, Laure, Evelyne, Stéphane, Paul, Edouard, Pierre-Alain, Loïc, Kevin, Thierry, travailler avec vous ou vous côtoyer au quotidien a été un réel plaisir, alors merci tout simplement.

Et puis, surtout, gardez moi une tasse de thé à l'occasion !

# Resumé

L'agriculture se trouve aujourd'hui au carrefour d'enjeux collectifs majeurs, comme la sécurité alimentaire ou la préservation de l'environnement. Dans les prochaines années, les effets combinés de la libéralisation des échanges et du changement climatique vont conduire à des mutations majeures pour l'activité agricole européenne. L'objectif est ici d'analyser le système agricole européen dans sa relation par rapport aux enjeux auxquels il doit ou devra faire face au cours du XXIème siècle : réformes de la politique agricole commune, limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et conséquences du changement climatique. L'étude se fonde sur un modèle économique de l'offre (AROPAj), couplé à un modèle agronomique (STICS) pour la prise en compte des effets du climat sur les rendements agricoles. Un des atouts du modèle économique est qu'il permet en outre de mesurer les coûts d'abattement des émissions de GES au niveau européen. Les résultats obtenus sont très sensibles aux poids donnés aux deux GES, le méthane et le protoxyde d'azote. Le concept standard utilisé pour mesurer les émissions de GES différents est celui de pouvoir de réchauffement global (PRG). Leur valeur est discutée dans un cadre économique, puis une analyse de sensibilité est faite afin d'évaluer leur impact sur les coûts d'abattement. L'utilisation d'AROPAj pour évaluer à la fois les conséquences de réformes politiques et du changement climatique permet de hiérarchiser les impacts. Ainsi, le changement climatique aurait un effet important sur les marges brutes des exploitants tandis que les scénarios de réforme envisagés se traduiraient essentiellement sur l'allocation des terres.

Mots-clés : modélisation, politiques agricoles, changement climatique, économie, agronomie, Europe, pouvoir de réchauffement global



# Abstract

Agriculture is strongly involved in major issues like food security and preservation of the environment. Along years, combined effects of trade liberalisation and climate change are going to induce major mutations in the European agricultural sector. This work aims at the analyse of the European agricultural system facing with the major expected stakes of the XXIth century : common agricultural policy reforms, abatement of greenhouse gas (GHG) emissions, and consequences of climate change. This work is based on a supply economic model of the European agriculture (AROPAj), coupled with an agronomic model (STICS) to take into account climate effects on crop yields. One of the major positive interests of AROPAj is that it makes it possible to evaluate European GHG abatement costs for agriculture. Results are very sensitive to the weights used in the aggregation of the two greenhouse gases involved in agricultural production, namely methane and nitrogen protoxyde. The standard concept used to aggregate GHG emissions related to different gases is usually the Global Warming Potential (GWP). GWP is discussed in a theoretical economic framework. Moreover a sensibility analysis is conducted to assess their impacts on GHG abatement costs. The use of AROPAj in assessing the impacts of both policy reform and climate change helps us to rank these impacts. According to this work, climate change would have important consequences on gross margins whereas the policy reforms we studied would have their essential impacts on land allocation.

Keywords : model, agricultural policy, climate change, economic assessment, agronomy, Europe, Global Warming Potential



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I Politiques agricoles</b>	<b>7</b>
<b>1 Intérêt de la programmation mathématique pour la modélisation économique du secteur agricole</b>	<b>9</b>
1.1 Choix de modélisation . . . . .	10
1.1.1 Modèles d'équilibre général calculable . . . . .	10
1.1.2 Modèles d'équilibre partiel . . . . .	12
1.1.3 Modèles d'offre . . . . .	13
1.2 Techniques de modélisation . . . . .	14
1.2.1 Programmation linéaire . . . . .	15
1.2.2 Programmation mathématique positive . . . . .	16
1.3 Quelques modèles de l'agriculture européenne . . . . .	18
1.3.1 AROPAj . . . . .	18
1.3.2 EU-FARMIS . . . . .	22
1.3.3 PROMAPA . . . . .	23
<b>2 Impacts de la réforme de Luxembourg</b>	<b>27</b>
2.1 Le découplage en théorie et dans les modèles . . . . .	28
2.1.1 Le concept de découplage . . . . .	28
2.1.2 Évaluation de la réforme de la PAC . . . . .	29
2.1.3 Résultats attendus du modèle AROPAj . . . . .	30
2.2 L'accord de Luxembourg dans le modèle AROPAj . . . . .	31
2.2.1 La PAC après l'accord de Luxembourg . . . . .	31
2.2.2 L'accord de Luxembourg dans le modèle . . . . .	33
2.3 Résultats . . . . .	35
2.3.1 Scénarios . . . . .	35
2.3.2 Impact sur les marges brutes . . . . .	38
2.3.3 Changement d'usage des terres . . . . .	40
2.3.4 Productions . . . . .	41
2.3.5 Une approche détaillée à l'échelle des régions . . . . .	43
2.3.6 Impact sur les émissions de GES . . . . .	45

<b>3</b>	<b>Impacts du découplage sur le prix de la terre</b>	<b>57</b>
3.1	Prix de la terre, marché de la terre, droits et soutien agricole . . . . .	58
3.1.1	Soutien agricole et prix de la terre . . . . .	58
3.1.2	Marché de la terre et droits à paiement . . . . .	61
3.2	Contribution d'un modèle à l'échelle européenne (AROPAj) . . . . .	64
3.2.1	Le prix fictif de la terre . . . . .	64
3.2.2	Contribution du facteur terre à la marge à l'échelle des États Membres . . . . .	66
3.2.3	Modifications régionales du prix fictif de la terre . . . . .	68
 <b>II L'agriculture, un secteur impliqué dans le changement climatique avec des spécificités propres.</b>		<b>77</b>
<b>4</b>	<b>Un secteur économique à la fois source et puits de GES</b>	<b>79</b>
4.1	Contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre . .	80
4.1.1	Un secteur responsable d'une part importante des émissions . . .	80
4.1.2	Nature des émissions d'origine agricole . . . . .	81
4.1.3	Le puits agricole . . . . .	82
4.2	Les phénomènes autres que les émissions de GES . . . . .	84
4.2.1	Le rôle de l'albédo . . . . .	84
4.2.2	Climat et cycle du carbone . . . . .	85
4.3	Possibilités d'abattement dans le secteur agricole . . . . .	86
4.3.1	Évaluer les coûts d'abattement du secteur agricole . . . . .	86
4.3.2	De la théorie à la pratique : les projets domestiques . . . . .	87
<b>5</b>	<b>La mesure de l'équivalence des différents gaz à effet de serre</b>	<b>91</b>
5.1	Pouvoir de Réchauffement Global : une perspective économique . . . . .	93
5.1.1	Comparaison du PRG et d'un indice économique d'équivalence . .	94
5.1.2	Remise en cause du PRG dans une perspective économique . . .	95
5.2	Cadre d'analyse : Un problème de contrôle optimal à plusieurs gaz . . .	97
5.2.1	Formulation du problème général . . . . .	97
5.2.2	Linéarisation et état stationnaire . . . . .	99
5.2.3	Dynamique du rapport des prix fictifs . . . . .	99
5.2.4	Taxe sur les émissions . . . . .	100
5.3	Cas d'un dommage linéaire . . . . .	102
5.4	Dommage linéaire, facteurs d'émissions constants et surplus quadratique	106
5.5	Dommage quadratique, facteurs d'émissions constants et surplus quadratique . . . . .	110
5.5.1	Solution de premier rang . . . . .	110
5.5.2	Taxe basée sur une règle d'équivalence constante . . . . .	111
5.5.3	Illustration pour deux gaz . . . . .	111
	Annexe A : Notations . . . . .	115
	Annexe B : Démonstrations . . . . .	115
<b>6</b>	<b>De l'effet de la valeur des PRG sur les coûts d'abattement du secteur agricole européen.</b>	<b>119</b>
6.1	Méthode utilisée . . . . .	120
6.1.1	Calcul des émissions dans le modèle AROPAj . . . . .	120
6.1.2	Discussion . . . . .	123

6.1.3	Calcul des coûts d'abattement . . . . .	123
6.2	Résultats . . . . .	124
6.2.1	Différentes valeurs possibles pour les PRG . . . . .	124
6.2.2	Coûts d'abattement . . . . .	125
6.2.3	Discussion . . . . .	129
<b>III Changement climatique et adaptation</b>		<b>133</b>
<b>7</b>	<b>Changement climatique et adaptations pour le secteur agricole</b>	<b>135</b>
7.1	Changement climatique et impacts agronomiques . . . . .	136
7.1.1	Les scénarios de changement climatique . . . . .	136
7.1.2	Non linéarité et événements extrêmes . . . . .	138
7.1.3	Impacts agronomiques . . . . .	139
7.2	Adaptations . . . . .	141
7.2.1	Définition . . . . .	141
7.2.2	Adaptation autonome . . . . .	142
7.2.3	Adaptation planifiée . . . . .	143
7.3	Évaluations économiques des impacts du changement climatique . . . . .	144
7.3.1	Approches économétriques . . . . .	144
7.3.2	Évaluation du changement climatique à l'aide de modèles d'équi- libre général calculables . . . . .	145
7.3.3	Vers une évaluation plus fine des impacts . . . . .	146
<b>8</b>	<b>Méthode de prise en compte des impacts du changement climatique et adaptation</b>	<b>153</b>
8.1	Utilisation des modèles agronomique et économique . . . . .	154
8.1.1	STICS et la prise en compte du changement climatique . . . . .	154
8.1.2	Coupler STICS et AROPAj . . . . .	155
8.2	De la théorie à la pratique . . . . .	157
8.2.1	Base de données et application . . . . .	157
8.2.2	Ajustement et sélection des courbes . . . . .	161
8.2.3	Cas des fourrages . . . . .	163
8.2.4	Scénarios de changement climatique . . . . .	165
8.3	Scénarios . . . . .	166
8.3.1	<i>Ceteris Paribus</i> . . . . .	167
8.3.2	La question de l'irrigation . . . . .	169
8.3.3	Adapter les itinéraires techniques . . . . .	170
<b>9</b>	<b>Impacts du changement climatique - Résultats</b>	<b>175</b>
9.1	Impacts sur les activités . . . . .	176
9.1.1	Rendements agricoles . . . . .	176
9.1.2	Marges brutes . . . . .	177
9.1.3	Surfaces . . . . .	179
9.1.4	Productions végétales et collecte . . . . .	180
9.1.5	Productions animales . . . . .	181
9.1.6	Émissions de GES . . . . .	181
9.2	Impacts sur les prix de la terre . . . . .	182
9.2.1	Impact du changement climatique sur le prix des terres en France	182
9.2.2	Impact selon l'orientation des exploitations . . . . .	183

9.3	Hierarchisation des impacts . . . . .	183
9.3.1	Sur les marges . . . . .	185
9.3.2	Sur l'allocation des terres . . . . .	187
9.3.3	Sur le prix des terres . . . . .	187
	<b>Conclusion</b>	<b>193</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>204</b>

# Liste des tableaux

1.1	Principales caractéristiques des modèles AROPAj, FARMIS et PROMAPA	24
2.1	Choix des États Membres concernant les options de découplage possibles	32
2.2	Introduction technique du découplage et des nouvelles contraintes dans AROPAj ( $ZF$ doit se lire comme le vecteur à $m$ dimensions des paramètres). . . . .	35
2.3	Taux de recouplage des aides selon les États Membres et les aides (AROPAj) . . . . .	36
2.4	Variation des prix européens résultant du couplage entre AROPAj et les modèles d'équilibre partiel PEATSIM et ESIM. . . . .	37
2.5	Évaluation des effets et scénarios à comparer . . . . .	38
2.6	Variations des marges et du FEOGA (en millions €) . . . . .	39
2.7	Variations des marges brutes et des aides, par hectare et par État Membre	40
2.8	Utilisation des terres et changements selon le scénario politique (en milliers d'ha) . . . . .	40
2.9	Valeur de l'indice mesurant la disparité dans l'usage de terres suite à l'application d'une nouvelle PAC. . . . .	41
2.10	Productions vendues (en milliers de tonnes) . . . . .	42
2.11	Consommations sur l'exploitation et variations selon le scénario (en milliers de tonnes). . . . .	42
2.12	Émissions de GES et variations en milliers de tCO <sub>2</sub> eq . . . . .	53
3.1	Comparaison pour chaque État Membre entre les marges à l'hectare, les aides à l'hectare et le prix fictif de la terre, pour 3 scénarios PAC : "Agenda 2000" (AG15), "réforme de Luxembourg" (LX15) et "découplage total" (FD15). Dans ces 3 scénarios, le capital animal peut varier de $\pm 15\%$ .	67
3.2	Contributions de la contrainte de disponibilité de la terre et de la contrainte jachère (réforme de Luxembourg) ou du paiement unique à l'hectare (découplage total) au prix fictif de la terre (€/ha). . . . .	67
3.3	Variation des prix fictifs pour les éleveurs et les cultivateurs dans quelques régions RICA . . . . .	75
4.1	Répartition par activité des émissions mondiales (2000). Source : <a href="http://www.manicore.com">www.manicore.com</a>	80
4.2	PRG des 6 gaz ou familles de gaz retenus par le protocole de Kyoto . . . . .	82
4.3	Répartition des émissions par gaz en France en 2004. Source : CITEPA	82
5.1	Taux d'actualisation pour lesquels le PRG surestime (+) ou sous-estime (-) la valeur sociale des gaz à effet de serre (dommage linéaire, $\hat{T} = 100$ )	105
6.1	Sources d'émissions de GES prises en compte dans le modèle . . . . .	122

6.2	Valeur des PRG selon l'horizon considéré. <i>Source : Troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001), entre parenthèses les valeurs données dans le deuxième rapport (1995)</i> . . . . .	124
6.3	Part des émissions agricoles en France selon l'horizon des PRG. CITEPA, 2004 . . . . .	125
6.4	Taxe (en €) par tonne de gaz, selon les PRG pour une taxe de t € la tonne de CO <sub>2</sub> . . . . .	127
7.1	Scénarios SRES (IPCC, 2000), les chiffres concernent 2100. . . . .	136
7.2	Concentrations en CO <sub>2</sub> (en ppm) utilisées dans le modèle climatique HadCM3 . . . . .	137
7.3	Augmentations de température (en °C) attendues par rapport à 1961-1990	137
7.4	Vitesse d'adaptation . . . . .	144
7.5	Périodes pour effectuer les opérations . . . . .	147
7.6	Caractéristiques des modèles climatiques. Variation en température et précipitations. . . . .	150
7.7	Variation de bien être selon le scénario climatique . . . . .	150
8.1	Modalités des entrées de STICS, sources des 30 ou 60 combinaisons. . .	158
8.2	Comparaison des deux méthodes de sélection des courbes . . . . .	163
8.3	Précipitations et températures moyennes des années climatiques utilisées	165
8.4	Exemples d'adaptation en pratique . . . . .	169
8.5	Paramètres du modèle STICS pour l'adaptation des itinéraires techniques. . . . .	170
9.1	Scénarios étudiés . . . . .	175
9.2	Effet de différents scénarios de changement climatique sur la marge brute agricole française . . . . .	177
9.3	Évolution des activités animales par rapport au scénario de référence. .	181
9.4	Évolution des émissions de GES avec le changement climatique. . . . .	182
9.5	Prix de la terre selon le scénario climatique en France. . . . .	182
9.6	Effet de différents scénarios de changement –climatique et politique– sur la marge brute agricole française, comparée à la marge de référence (Agenda 2000, année 2002, avec ajustement du capital animal). . . . .	185
9.7	Prix de la terre selon le scénario –climatique ou politique– en France. . .	188

# Table des figures

2.1	Variation des marges par hectare selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15. . . . .	44
2.2	Variation des surfaces en céréales selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole de la région). . . . .	45
2.3	Variation des surfaces en oléoprotéagineux selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	46
2.4	Variation des surfaces en pommes de terre et betterave selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	47
2.5	Variation des surfaces en fourrage selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	48
2.6	Variation des surfaces en prairies selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	49
2.7	Variation des surfaces en jachère selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	50
2.8	Variation des surfaces en friche selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale). . . . .	51
2.9	Variation des surfaces en jachère et en friche selon les scénarios AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole utile). . . . .	52
3.1	Contribution de la contrainte de surface et des règles de la PAC à la marge agricole . . . . .	68
3.2	Prix fictifs de la terre dans les scénarios AG15, LX15, et FD15, et dans le cas d'un politique "sans subvention" pour les terres et activités incluses dans le modèle. . . . .	70
3.3	Augmentation régionale du prix fictif de la terre quand le scénario PAC est LX15 ou FD15 (€/ha). . . . .	72
3.4	Augmentation régionale du prix fictif de la terre quand le scénario PAC est LX15 ou FD15 (% du prix AG00). . . . .	73
3.5	Variation du prix fictif de la terre (en k€ ) pour les éleveurs et les cultivateurs selon le nombre d'animaux à l'hectare . . . . .	74
4.1	Émissions européennes et françaises (2004). Source : EEA 2006 . . . . .	81
4.2	Le cycle du carbone . . . . .	85
5.1	Arbitrage entre taux d'actualisation et horizon temporel (dommage linéaire) . . . . .	104
5.2	Positionnement des émissions du scénario optimal (A) par rapport aux émissions du scénario avec taxe et règle d'équivalence $\gamma$ (dommage linéaire) selon que $-\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*} < -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ (B) ou $-\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*} > -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ (B') . . . . .	109

6.1	Coûts marginaux d'abattement, exprimés en € par tonne de gaz, selon différentes valeurs des PRG . . . . .	126
6.2	Coûts marginaux d'abattement, exprimés en base 100, selon les différentes valeurs des PRG . . . . .	128
6.3	Coûts marginaux d'abattement, en équivalent CO <sub>2</sub> , selon différentes valeurs des PRG . . . . .	129
6.4	Effet simultané sur la marge et les émissions d'une taxe. . . . .	130
8.1	Répartition des rendements endogènes recalculés par rapport aux rendements exogènes préexistants. France, climat 2002, 584 rendements. . . .	157
8.2	Problèmes rencontrés lors de l'ajustement des courbes . . . . .	162
8.3	Déformation des rendements sous l'effet du changement climatique (année 2087, 584 rendements modifiés). . . . .	164
8.4	Caractéristiques de l'année climatique 2002 (précipitations en mm, températures en °C) . . . . .	166
8.5	Caractéristiques de l'année climatique 2087 (précipitations en mm, températures en °C) . . . . .	167
8.6	Caractéristiques de l'année climatique 2099 (précipitations en mm, températures en °C) . . . . .	168
8.7	Blé tendre - 1995 . . . . .	171
8.8	Blé tendre - 1996 . . . . .	171
8.9	Blé tendre - 1997 . . . . .	172
9.1	Rendements agricoles du blé tendre et du maïs avant et après changement climatique . . . . .	176
9.2	Variation des marges selon les différents scénarios de changement climatique. . . . .	178
9.3	Impact du changement climatique sur l'allocation des terres . . . . .	179
9.4	Productions végétales et collectes selon le scénario de référence ou le scénario de changement climatique étudié. . . . .	180
9.5	Variation des valeurs duales de la terre selon les différents scénarios de changement climatique (par rapport au scénario de référence). . . . .	184
9.6	Impact d'un scénario de changement climatique sur les prix des terres, selon l'orientation des exploitations. . . . .	185
9.7	Variation des marges selon les différents scénarios de changement –climatique et politique. . . . .	186
9.8	Allocation des terres selon les différents scénarios de changement –climatique et politique. . . . .	187
9.9	Productions végétales et collectes selon les différents scénario de changement –climatique et politique. . . . .	188
9.10	Variation des valeurs duales de la terre selon les différents scénarios de changement –climatique et politique– (par rapport au scénario de référence). . . . .	189

# Introduction générale

En octobre 2006, la publication du rapport Stern consacré à l'évaluation économique du changement climatique rencontre une large audience. C'est la première fois qu'une quantification des conséquences attendues du changement climatique a un retentissement médiatique aussi fort : le rapport estime que si l'on ne réagit pas, les coûts et les risques globaux du changement climatique seront équivalents à une perte d'au moins 5% du PIB mondial chaque année, aujourd'hui et pour toujours, tandis que les coûts de l'action, à savoir réduire les émissions de gaz à effet de serre pour éviter les pires conséquences du changement climatique, peuvent se limiter à environ 1% du PIB mondial chaque année. Quelques semaines auparavant, le public était sensibilisé à cette question à travers la diffusion du film-documentaire *Une vérité qui dérange* de l'ancien vice-président des États-Unis Al Gore.

La question du changement climatique n'est pourtant pas neuve. Depuis 1990, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat (GIEC) lance des alertes en faisant un bilan des connaissances scientifiques sur le sujet, rassemblées régulièrement dans des rapports d'évaluation largement diffusés. A ce jour, quatre rapports ont ainsi été publiés. Chacun de ces rapports consacre une place importante au secteur agricole, secteur économique clé pour la survie de la population mondiale.

Activité économique essentielle au plan mondial, l'agriculture se trouve aussi au carrefour d'enjeux collectifs majeurs, comme la sécurité alimentaire ou la préservation de l'environnement. Dans les prochaines années, les effets combinés de la libéralisation des échanges ou du changement climatique vont conduire à des mutations majeures des conditions de l'activité agricole. Politiques agricoles, système climatique, contraintes agronomiques agissent de façon interdépendante sur l'agriculture. L'objectif est ici d'analyser chaque système dans sa relation à l'autre dans une logique d'ingénierie économique mobilisant de l'ingénierie agronomique et informatique. Le cadre d'étude retenu est l'Union Européenne à 15 (restreint à la France pour la question des impacts du climat).

Depuis son élaboration en 1962, la Politique Agricole Commune (PAC) modèle l'offre agricole européenne. L'émergence de préoccupations environnementales, en particulier celles associées à l'effet de serre, conduit l'autorité publique à s'interroger sur l'influence de ce secteur sur le climat. A terme, le changement climatique pourrait profondément modifier les productions agricoles mondiales et européennes.

Les thèmes abordés ici (réforme de la PAC, climat et agriculture) nous amènent à nous projeter plus en avant dans le XXI<sup>ème</sup> siècle. Il s'agit non d'élaborer des prévisions mais plutôt de faire de la prospective, c'est-à-dire porter un regard sur l'avenir de sorte à éclairer l'action et les choix du présent. Dans les années à venir, le secteur agricole européen sera face à plusieurs enjeux. A très court terme, c'est d'abord la réforme de la politique agricole amorcée lors des derniers accords de Luxembourg (2003) et qui doit encore progresser avec de nouvelles discussions prévues en 2008. A moyen terme, le secteur est concerné par la lutte contre le changement climatique. Si la directive "quota" l'a jusqu'alors écarté du marché de permis, des initiatives nationales pourraient engager volontairement le secteur agricole dans la lutte contre le changement climatique. A plus long terme, c'est-à-dire d'ici à la fin du siècle, les changements climatiques pèseront sur la productivité et les orientations agricoles. Face à ces différents enjeux, le secteur agricole devra s'adapter. Les réformes successives de la PAC ont montré une relative souplesse du monde agricole à adopter et profiter des changements de politiques, sur des horizons temporels assez courts (de l'ordre de l'année). Le changement climatique, plus progressif, nécessitera également des adaptations profondes des systèmes de cultures/productions.

Afin de traiter les différents impacts à venir sur le secteur agricole, nous considérerons un scénario économique général *ceteris paribus*, *i.e.*, toutes choses égales par ailleurs. Les études d'impacts mesurant le changement climatique, ou tout autre changement, dans un monde futur où population et PIB sont maintenus aux niveaux actuels présentent l'inconvénient d'être moins réalistes, elles ont néanmoins le mérite de donner une indication utile sur l'échelle des impacts et sont plus faciles à interpréter (Stern 2006, page 61).

Différents types de modèles sont disponibles pour étudier les impacts politiques et climatiques sur le secteur agricole européen. Ils peuvent être de type normatif, statistique ou s'appuyer sur la programmation mathématique. Les modèles statistiques permettent sur la base de séries temporelles de faire des prévisions à long terme (Heady 1983). Cela suppose que les prévisions puissent s'appuyer sur des phénomènes observés par le passé : un phénomène semblable doit donc s'être déjà produit *et* avoir été observé. Ces modèles ne conviennent pas exactement à l'objet de cette thèse. Il s'agit ici de faire de la prospective par rapport à deux événements nouveaux qui vont avoir des répercussions sur l'agriculture : le changement climatique (on ne dispose pas d'observations sur les variations de rendements associées au changement de climat et plus exactement à la forte hausse attendue de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone) et la réforme de la PAC (telle qu'elle est précisée par l'accord de Luxembourg, elle est assez inédite dans sa forme).

Nous avons donc choisi de nous appuyer sur un modèle de programmation mathématique, simulant l'offre agricole européenne, à partir d'exploitations-types régionalisées. L'usage de ce type de modèle nous permet d'abord de quantifier les impacts. L'objectif est en effet de donner un ordre de grandeur des différents impacts attendus de la réforme de la PAC mais aussi des conséquences du changement climatique. Il s'agit

également d'en hiérarchiser les différents effets. Par ailleurs, notre approche se veut générique. Les différentes méthodes que nous utiliserons devront pouvoir s'étendre (à d'autres réformes, à d'autres espaces géographiques), tout en cherchant à les rapprocher d'une réalité économique et d'une réalité physique incontournables quand il s'agit de traiter des questions liées à l'agriculture.

Depuis plus de 40 ans, la Politique Agricole Commune (PAC) façonne l'environnement économique de millions d'agriculteurs. De nombreux États dans le monde se sont dotés d'une politique agricole. Cela s'explique par la nature de la production agricole que le politique n'accepte pas de soumettre au libre jeu du marché. De nombreux aléas, liés à de multiples facteurs (aléas climatiques, multiplicité des intervenants, délais entre prise de décision et effets sur le marché, stockage difficile de certains produits) affectent la production et parfois aussi la consommation. Cela se traduit par des fluctuations importantes des niveaux de production et des prix, difficilement supportables, tant par les producteurs que par les consommateurs. A l'origine, cinq objectifs étaient assignés à la PAC : accroître la productivité agricole, assurer un niveau de vie à la population agricole, stabiliser les marchés, garantir la sécurité d'approvisionnement, et assurer des prix raisonnables aux consommateurs.

Au fil des ans, la PAC a nécessairement évolué pour s'adapter aux marchés, au contexte international et aux attentes des consommateurs. En 1999, le Conseil européen de Berlin introduit un second pilier consacré au développement rural, complétant le premier pilier portant sur le soutien des marchés et des prix agricoles. Des préoccupations environnementales sont alors intégrées à la PAC. C'est la réforme de l'Agenda 2000. Pour se mettre en conformité avec les règles de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC), les Accords de Luxembourg, signés en 2003, introduisent le découplage des aides (les aides que touche l'exploitant ne dépendent plus du niveau de production et ne sont plus, en théorie conditionnées à la production de telle ou telle culture ou activité) et entérinent la diminution progressive des restitutions à l'exportation. La notion de conditionalité est également introduite : les aides ne sont versées que si de bonnes conditions agricoles et environnementales sont respectées, ainsi que le bien être des animaux. Appliquée à partir de 2005, la réforme de Luxembourg introduit le mécanisme de modulation qui organise le transfert de financement des aides directes à la production vers le second pilier. S'élevant à 5% en 2005, la modulation pourra atteindre 20% à compter de 2008.

Chaque réforme de la PAC fait l'objet de nombreuses études de la part de la communauté des économistes agricoles, que ce soit pour en évaluer les conséquences sur les échanges et les prix mondiaux, ou sur le marché intérieur, mais aussi sur le bien être de la société dans son ensemble, des agriculteurs aux contribuables. Si les modèles théoriques sont capables de brosser à grands traits le signe des effets d'une nouvelle mesure, les modèles de programmation mathématique offrent l'avantage d'estimations plus précises : ils apportent une quantification qui permet a priori de calibrer les instruments économiques à mettre en place. Véritables supports de la réflexion sur des

problèmes économiques complexes, la Commission Européenne a largement financé leur développement. La diversité des méthodes employées pour modéliser le secteur agricole s'explique par le nombre de phénomènes plus précisément étudiés et assure une plus grande richesse aux résultats obtenus.

La prise en compte relativement récente des aspects environnementaux dans la PAC a conduit à faire évoluer les modèles en leur ajoutant des modules dédiés à ces nouvelles questions. Les années 1990 ont vu émerger la question du changement climatique et de l'effet de serre. Face à cette problématique, le rôle de l'agriculture a été mis en avant. Par rapport à l'effet de serre et *a contrario* de tous les autres secteurs économiques, le secteur agricole est à l'origine de deux effets contraires : selon leurs actions, les agriculteurs peuvent émettre des gaz à effet de serre, ou au contraire capter du dioxyde de carbone et le stocker sous forme de carbone, dans les sols ou dans la biomasse. Par ailleurs, l'utilisation qui est faite des sols, et la "couleur" (albédo) qui leur est ainsi donnée, modifie le rayonnement solaire absorbé par la Terre, et a donc des conséquences sur le système climatique. Une autre particularité du secteur agricole réside dans la nature des gaz à effet de serre émis. A l'opposé de la plupart des autres secteurs économiques, le secteur agricole émet peu de CO<sub>2</sub>, mais émet deux autres gaz, le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Une métrique est couramment utilisée à la fois aux niveaux politique et scientifique afin de traduire les émissions en "équivalent CO<sub>2</sub>". Cette métrique fondée sur la notion de pouvoir de réchauffement global (PRG), donne ainsi une valeur à la tonne de CH<sub>4</sub> 20 fois supérieure environ à la tonne de CO<sub>2</sub>, le protoxyde d'azote a quant à lui un poids 300 fois supérieur. De nombreux économistes ont néanmoins insisté sur les "défauts" du PRG et proposé d'autres indices d'équivalence. Le PRG prend en effet la fonction de prix relatif d'un gaz par rapport au CO<sub>2</sub> et a des implications fortes en terme de participation du secteur agricole aux émissions totales, mais aussi sur les coûts d'abattement et les dommages.

Au delà de la lutte contre les émissions de GES se profilent pour le siècle à venir les premières conséquences du changement climatique. Face à ce nouvel enjeu, l'agriculture a encore un rôle particulier. Le secteur est en effet spécialement vulnérable à tout changement de climat. Les pays en développement seront les plus concernés. Leur situation géographique les place d'ores et déjà à la proximité de seuils de tolérance pour le développement de nombreuses cultures. Le changement climatique pourrait en outre être plus marqué dans les régions tropicales. Enfin, le secteur y est économiquement beaucoup plus important que dans les pays développés, représentant environ 20% du PIB. Ce chiffre ne tient pas compte de l'agriculture vivrière, très développée. Les pays au climat plus tempéré et les pays développés en particulier ne seront pas épargnés. Ces derniers sont en revanche plus à même de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques que les pays en développement. L'objectif de l'adaptation est de réduire la vulnérabilité au changement climatique et à la variabilité climatique, en réduisant ainsi les impacts négatifs. Cela devrait également améliorer la capacité du secteur agricole à capturer les bénéfices du changement climatique. Par conséquent, l'adaptation, avec la réduction

des émissions, est une stratégie importante de réponse. Sans réduction importante et précoce des émissions, les coûts d'adaptation seront élevés et la capacité des pays et des individus à s'adapter sera limitée. De nombreuses études ont été menées sur les conséquences du changement climatique aux États-Unis, il n'en existe pas en revanche à l'échelle de l'Union Européenne. Les études les plus fines sur la question reposent sur le couplage de modèles de culture et d'un modèle économique. Cette approche présente l'intérêt de capturer les effets locaux, et, selon le modèle économique utilisé, de distinguer les impacts selon l'orientation technique et économique des exploitants agricoles.

Le secteur agricole européen est donc face à trois enjeux, à plus ou moins brève échéance. Le premier est celui de la politique agricole commune. Le second concerne sa participation au changement climatique. Le troisième est lié aux conséquences à venir du changement climatique.

Nous avons organisé ce qui suit en trois parties. La première partie est consacrée à l'évaluation des conséquences de la réforme de la Politique Agricole Commune. Un premier chapitre nous permet de montrer quels sont les différents modèles utilisés pour de telles évaluations ainsi que les outils qu'ils mobilisent. Les chapitres suivants reposent sur le modèle d'offre AROPAj, basé sur la programmation linéaire pour évaluer les conséquences de la réforme de Luxembourg sur l'offre agricole européenne ainsi que sur le prix d'un facteur de production particulier : la terre.

La deuxième partie est consacrée au rôle de l'agriculture par rapport aux émissions de gaz à effet de serre (GES). A la fois source et puits, le secteur agricole présente entre autres particularités celles d'émettre des gaz autres que le dioxyde de carbone. De ce fait, le secteur agricole est sensible aux coefficients d'équivalence permettant de mesurer les émissions de GES en terme d'équivalent CO<sub>2</sub>. La valeur prise par les PRG influe sur l'évaluation des coûts d'abattement des émissions agricoles.

La troisième et dernière partie est consacrée à l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'offre agricole. Il s'agit ici de présenter un état de l'art des évaluations des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation disponibles à l'échelle des exploitants. Nous commençons par présenter une méthode permettant de prendre en compte le changement climatique. Le modèle économique AROPAj est ensuite utilisé pour en évaluer les impacts, toutes choses égales par ailleurs. L'impact climatique est mis en regard des conséquences de la réforme de la PAC de 2003.



Première partie  
Politiques agricoles



# Chapitre 1

## Intérêt de la programmation mathématique pour la modélisation économique du secteur agricole

### Introduction

L'utilisation des modèles d'analyse économique concernant l'agriculture est particulièrement développée (Tirel 1969). L'existence dans de nombreux pays de politiques encadrant ce secteur, et donc en corollaire la disponibilité des données, expliquent en partie ce fait. Des bases de données importantes ont été développées parallèlement aux politiques agricoles, fournissant une base solide pour le développement des modèles de programmation mathématique. En outre, les modèles sont susceptibles de contribuer à l'évaluation des effets de politiques ce qui les rend très attractifs pour les décideurs politiques : ils leur permettent d'évaluer les politiques en place afin de les justifier ou montrer la nécessité de leur réforme.

Dans les années 1930, des méthodes statistiques classiques étaient appliquées massivement en économie agricole (Johnson 1986). Les modèles de programmation mathématique ont réellement émergés dans les années 1950 (Heady & Candler 1958). Plusieurs catégories de modèles sont à distinguer selon les impacts que l'on cherche à mesurer. Les modèles d'équilibre général prennent en compte l'ensemble des secteurs de l'économie. Ils permettent de mesurer les effets inter-sectoriels ainsi que les effets globaux. Cherchant à prendre en compte l'ensemble des secteurs de l'économie mondiale, ils les décrivent nécessairement de façon un peu frustrante. Les modèles d'équilibre partiel se concentrent plus particulièrement sur un secteur de l'économie, par exemple le secteur agricole. L'agriculture mondiale est alors représentée, en général en distinguant des groupes de pays relativement homogènes, le marché mondial est équilibré et les prix sont endogènes. Les caractéristiques des autres secteurs de l'économie sont supposées exogènes. Enfin, les modèles d'offre considèrent l'ensemble des prix de façon exogène et détaillent finement le secteur considéré. Ce dernier type de modèle était tout à fait

adapté par exemple à l'étude du secteur agricole européen quand la Politique Agricole Commune (PAC) fixait les prix européens.

L'objectif de ce chapitre<sup>1</sup> est de faire un bilan des différents modèles permettant de mesurer les impacts d'un choc sur le secteur agricole et plus particulièrement le secteur agricole européen. Plusieurs modèles seront présentés plus en détail sans volonté d'exhaustivité. Les différentes techniques de modélisation (programmation mathématique linéaire ou positive) seront également discutées. L'idée sous-jacente est de mettre en lumière les atouts et les faiblesses du modèle AROPAj utilisé pour les évaluations menées lors des chapitres ultérieurs concernant la réforme de la PAC de 2003 (chapitres 2 et 3) et l'impact du changement climatique (chapitres 8 et 9).

Dans une première section, nous nous attarderons sur les différents choix de modélisations. Dans une deuxième section, nous présenterons deux techniques de modélisation (programmation mathématique positive et programmation linéaire). Une troisième section est consacrée à la présentation de quelques modèles agricoles européens.

### 1.1 Choix de modélisation

Les modèles économiques quantitatifs s'appuient sur les relations théoriques structurant l'économie pour refléter les observations réelles. Représentations simplifiées de la réalité, ils visent à compléter l'intuition, le raisonnement, l'expertise et le jugement politique.

Trois grandes approches se distinguent : les modèles d'équilibre général calculable, les modèles d'équilibre partiel, et les modèles d'offre. Les différences entre les modèles découlent des types d'interactions dont ils peuvent et ne peuvent pas tenir compte.

#### 1.1.1 Modèles d'équilibre général calculable

Les modèles d'équilibre général calculables (EGC) décrivent l'ensemble de l'économie (Schubert 1993) et incluent tous les biens. Les éléments de base de ces modèles sont des équations représentant le comportement des agents économiques représentés (consommateurs, producteurs). A chaque agent sont associés des demandes ou des offres de biens, de services et de facteurs de production, dépendant des prix. Supposant que les forces du marché conduisent à l'équilibre entre offre et demande, ces modèles permettent de calculer les prix qui équilibrent l'ensemble des marchés et déterminent l'allocation des ressources et la distribution des revenus qui résultent de cet équilibre. Ces modèles reposent pour la plupart sur des formes fonctionnelles relativement simples. En particulier, tous les modèles EGC se caractérisent par une structure entrées-sorties qui présente les interconnexions entre les industries dans une chaîne de valeur ajoutée qui va des matières premières, jusqu'à l'intégration finale des biens et services destinés à la consommation ou à l'investissement, en passant par les étapes plus avancées du traitement intermédiaire.

---

<sup>1</sup>Ce chapitre s'appuie en grande partie sur les articles de Gohin & Chantreuil (1999) et Bureau & Gohin (2005)

Ils permettent de représenter les effets principaux d'une politique et de donner le signe et l'ordre de grandeur d'un effet de la politique sur plusieurs secteurs. Les modèles EGC calculent l'incidence des changements hypothétiques d'orientation sur diverses variables économiques qui intéressent les responsables de l'élaboration des politiques, dont :

- le bien-être ;
- la production et la consommation ;
- les conséquences générales sur les flux des échanges commerciaux, les investissements, l'emploi, les revenus, les prix, les termes de l'échange et la productivité.

Les résultats tirés des modèles EGC, comme ceux de tout modèle théorique ou appliqué, varient en fonction de la manière dont les modélisateurs choisissent d'y décrire les préférences des agents et les comportements. Les résultats des modèles EGC dépendent des spécifications du modèle, de la base de données et des hypothèses concernant les principaux paramètres du modèle. La modification de certaines spécifications peut considérablement changer les résultats.

Si les premiers modèles EGC s'appuyaient sur une hypothèse de concurrence pure et parfaite, il est rapidement apparu qu'elle ne permet pas d'étudier de façon certains aspects de la politique économique (Schubert 1993). Actuellement, presque tous les modèles ont des fonctions de demandes à la Armington. Les produits sont différenciés selon leur origine, donc imparfaitement substituables. La concurrence imparfaite entre les entreprises est la plupart du temps modélisée comme une concurrence monopolistique.

Une des grandes forces des modèles EGC est leur solide fondement micro-économique. Certains économistes les considèrent comme des "boîtes noires" car des dépendances croisées et des rétroactions entre les variables peuvent parfois aboutir à des résultats difficiles à prévoir. Cependant, les bases théoriques de ces modèles font qu'il est possible de remonter dans tous les cas aux facteurs explicatifs des résultats de simulation (Borges 1986). L'amélioration des algorithmes a également permis le développement de modèles plus désagrégés.

Il importe de noter que les modèles EGC tiennent compte des effets secondaires des changements d'orientation hypothétiques qui pourraient échapper à une analyse intuitive qualitative. Par exemple, un assouplissement des dispositifs protectionnistes pourrait au départ augmenter les importations dans certains secteurs, mais ses effets secondaires, comme la variation des revenus et la redistribution des ressources, pourraient entraîner une baisse des importations dans ces mêmes secteurs. Les modèles EGC sont donc particulièrement adaptés aux négociations de type multilatéral mais aussi aux négociations régionales (Bureau & Gohin 2005). Ils permettent une analyse cohérente des effets de bien-être et donc de déterminer qui bénéficiera et qui subira les conséquences de telle ou telle option de libéralisation des échanges.

Les impacts d'une politique agricole sont un sujet d'étude typique où l'utilisation des modèles EGC est souvent nécessaire. Cependant, cela dépend des objectifs de l'étude. Les impacts de court terme par exemple sont souvent mieux appréhendés par d'autres

outils.

Parmi les modèles EGC les plus utilisés se trouve le modèle GTAP (Hertel 1997, Global Trade Analysis Project). A l'origine centré sur l'agriculture, le secteur est encore très détaillé puisque sur les 57 produits distingués, 22 sont agricoles ou agro-alimentaires. Il est maintenant utilisé dans un cadre plus général, sur des sujets allant de l'impact de l'Internet à celui du changement climatique. Plus récent, le modèle GOAL élaboré à l'INRA de Rennes, a été utilisé pour évaluer les conséquences des réformes de la PAC et de politiques de taxation des intrants agricoles. Caractérisé par une forte désagrégation des activités et produits agricoles et agro-alimentaires, il introduit des spécifications innovantes des élasticités prix et revenus et un grand détail des instruments de la PAC (Bureau & Gohin 2005).

### 1.1.2 Modèles d'équilibre partiel

Les modèles d'équilibre partiel simulent les répercussions des changements d'orientation hypothétiques sur un secteur particulier. Comparativement aux modèles EGC, ils peuvent apporter une information détaillée et complexe du secteur analysé, mais ils traitent le reste de l'économie comme si elle était figée et ne tiennent donc pas compte des rétroactions du secteur visé avec le reste de l'économie.

Les modèles d'équilibre partiel permettent cependant des hypothèses plus réalistes et un degré de détail plus fin pour représenter les instruments des politiques agricoles (Bureau & Gohin 2005). Leur taille étant limitée, l'ensemble des paramètres peut être estimé économétriquement. Ils sont utilisés en particulier pour éclairer un point particulier ou pour la prospective et la prévision.

Les défauts des modèles d'équilibre partiel viennent de leur manque de cohérence avec le reste de l'économie. Contrairement à un modèle d'équilibre général, ils ne tiennent pas compte des impacts d'une modification dans le secteur agricole sur le reste de l'économie. Cependant, l'effet de variables extérieures sur le secteur agricole peut être analysé en modifiant ces variables de manière exogène (niveau des prix des inputs, par exemple).

Parmi les modèles d'équilibre partiel jouant un rôle significatif sur le plan international se trouvent le modèle AGLINK de l'OCDE et le modèle ESIM (Banse et al. 2005) de l'USDA. Le modèle AGLINK est tourné vers la prospective. Le modèle ESIM, centré sur l'Union Européenne, est surtout utilisé pour analyser les effets de telle ou telle réforme sur l'agriculture européenne par l'USDA et par la Commission Européenne. Tout comme les modèles EGC, leur emploi se justifie plus particulièrement dans un cadre international (impact sur les prix et les échanges).

Parmi les limites des modèles d'équilibre partiel se distingue la non spatialisation des produits. La non détermination de l'origine des importations ne permet pas de modéliser concrètement des politiques de commerce préférentiel par exemple. Les modèles EGC pallient souvent cet inconvénient en supposant une substitution imparfaite entre les biens d'origine différente (système Armington) mais dans ce cas les termes de l'échange sont alors très sensibles au choix des élasticités de substitution. Les principales

limites des modèles d'équilibre général ou partiel ont été présentées dès leur apparition (Tirel 1969). Les modèles d'équilibre, général ou partiel ont par exemple l'inconvénient d'amener à des conclusions sur des groupes de pays souvent trop agrégés, laissant ainsi échapper des situations locales contrastées. L'agrégation, consistant à réunir différents éléments en un tout peut aussi être à l'origine d'erreurs liées à la difficulté de réaliser une description parfaite de l'ensemble étudié à l'aide du petit nombre d'observation retenues. Day (1963) définit un ensemble de conditions suffisantes pour une agrégation parfaite dans le cadre de la programmation linéaire, qui supposent une certaine homogénéité des agents agrégés. Un des autres problèmes des modèles d'équilibre général ou partiel consiste à concilier le souci d'obtenir une bonne description de l'ensemble étudié et celui de conserver au modèle une taille raisonnable compte tenu des capacités de calcul disponibles. Enfin, la troisième limite de ces modèles réside dans la collecte des données nécessaires à leur construction. Plus la couverture des modèles se veut grande (spatialement, ou sectoriellement), plus il est difficile d'obtenir des informations de qualité et homogènes. Les équilibres sont aussi le plus souvent obtenus sans friction, masquant les coûts de transaction et de transition. Enfin, les gains de bien être ne sont pas toujours décomposés, masquant par exemple les disparités entre gagnants et perdants sans mécanismes de compensation (au sens de Kaldor).

### 1.1.3 Modèles d'offre

Troisième approche de modélisation, les modèles d'offre considèrent que les agents économiques modélisés n'influent pas sur les prix. Cette hypothèse est vérifiée quand l'agent est "petit" par rapport à la taille du marché, ou quand les prix sont fixés par une politique particulière. Dans les autres cas, il est important de garder cette hypothèse en mémoire pour l'analyse des résultats.

Pour mesurer de l'impact d'une réforme de la PAC sur l'offre agricole européenne, cette hypothèse nous prive d'un aspect important de la réforme : modifiant l'offre agricole européenne, la réforme va induire un nouvel équilibre sur les marchés mondiaux et européens qui va se traduire par des modifications de prix. Un modèle d'offre ne permet donc pas de mesurer l'effet du retour par les prix de la réforme. Néanmoins, en séparant l'effet prix de l'effet réforme, l'hypothèse de prix exogènes permet de mieux appréhender les différents mécanismes à l'origine de la modification des revenus agricoles consécutive à la réforme. Ces modèles permettent en effet de mesurer un premier effet, toutes choses égales par ailleurs et ensuite, via un couplage avec un modèle d'équilibre partiel ou un modèle d'équilibre général, de prendre en compte l'effet prix.

Les modèles d'offre permettent de détailler précisément le secteur agricole. Fondés sur des méthodes de programmation mathématique, ils donnent des résultats extrêmement utiles en agriculture (Bureau & Gohin 2005). Moins adaptés à l'étude de la libéralisation des échanges, ils sont essentiels pour mesurer les effets d'une politique sur les exploitations réelles ou sur des régions. Ils présentent néanmoins l'inconvénient de ne pas mesurer les effets des politiques sur les autres secteurs, qui peuvent en retour avoir des répercussions sur l'agriculture (offre de travail par exemple). Bien évidem-

ment, l'effet des politiques sur les prix n'est pas non plus pris en compte mais il est possible de corriger ce problème en utilisant les "bons" prix calculés par les modèles EGC par exemple.

Parmi les modèles d'offre les plus utilisés au niveau européen se trouvent les modèles FARMIS et AROPAj qui seront présentés à la section 1.3, ainsi que le module d'offre du modèle CAPRI, qui comporte en outre un module de demande qui lui est couplé de façon itérative.

Parmi les modèles "quantitatifs", au-delà de la différenciation entre modèles d'équilibre général, modèles d'équilibre partiel et modèle d'offre, on peut également distinguer les modèles selon leur prise en compte du risque ou des effets dynamiques. Si les modèles dynamiques sont plus satisfaisant sur le plan intellectuel, leur principal inconvénient réside toutefois dans leur complexité. Sont alors souvent sacrifiées les particularités sectorielles et régionales que les modèles statiques moins complexes peuvent prendre en compte.

Quand les prix de marché à l'équilibre ne sont pas le point d'intérêt central de l'étude, les modèles de programmation mathématique statiques se focalisant sur l'offre sont satisfaisants pour évaluer les interactions entre l'activité agricole, les politiques économiques, l'usage des terres et l'environnement (Heady 1983). Plus la recherche du détail est poussée, ce qui s'entend par une description technique fine des exploitations mais aussi par un niveau de désagrégation spatiale élevé, plus la taille du modèle sera importante. Les modèles d'offre ne développant que ces aspects permettent d'aller relativement loin dans le contenu technique tout en conservant des temps de calcul abordables par les derniers développements informatiques.

## 1.2 Techniques de modélisation

La modélisation du comportement des agriculteurs par la programmation mathématique est une longue tradition en économie agricole (Heady 1983, Tirel 1969). De manière très générale, les modèles de programmation mathématique appliqués au niveau de l'exploitation agricole individuelle consistent à déterminer les niveaux des variables de décision de cette exploitation qui maximisent une variable économique sous des contraintes techniques. La variable économique optimisée est généralement le profit ou la marge brute de l'exploitation, plus rarement les recettes brutes (maximisation), ou les coûts (minimisation). Les contraintes techniques définissent implicitement un ensemble de production convexe par rapport aux variables de décision de l'exploitation. Ces modèles de programmation mathématique permettent alors de représenter le fonctionnement technico-économique des exploitations agricoles et de simuler les impacts de chocs exogènes (un changement de politique agricole par exemple) sur leurs variables de décision. Actuellement, deux techniques de modélisation sont employées : la programmation linéaire et la programmation mathématique positive. Au départ, la programmation était linéaire pour des raisons algorithmiques et numériques. le développement d'outils d'optimisation non linéaire a permis ensuite le développement de la

programmation mathématique positive.

### 1.2.1 Programmation linéaire

En mathématiques, les problèmes de programmation linéaire (PL) sont des problèmes d'optimisation où la fonction objectif et les contraintes sont toutes linéaires (Guéret et al. 2000). La programmation linéaire est un domaine central de l'optimisation, car les problèmes de PL sont les problèmes d'optimisation les plus faciles à résoudre – toutes les contraintes y étant linéaires. Les algorithmes (le plus célèbre étant sans doute celui du simplexe) ont été développés pour une application à des problèmes de grande taille dans les domaines de l'industrie pétrolière et des transports.

Le terme programmation linéaire suppose que les solutions à trouver sont des variables réelles. S'il est nécessaire d'utiliser des variables discrètes dans la modélisation du problème, on parle alors de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE). Ces derniers sont nettement plus difficiles à résoudre que les PL à variables continues.

En toute généralité, un programme linéaire consiste à maximiser un objectif (fonction linéaire de une ou plusieurs variables) en respectant un certain nombre de contraintes, linéaires elles aussi. D'un point de vue géométrique, les contraintes linéaires forment un polyèdre convexe. Si la fonction objectif est linéaire, tous les optima locaux sont également des optima globaux ; cela reste vrai si elle est monotone croissante sur chaque variable considérée, le cas linéaire ne représentant qu'un cas particulier dont la propriété n'est d'ailleurs pas utilisée (Guéret et al. 2000).

Deux cas peuvent se présenter où il n'existe pas de solution optimale : lorsque les contraintes se contredisent mutuellement (par exemple  $x \geq 3$  et  $x \leq 1$ ), il n'y a alors pas de solution du tout ; le polyèdre peut également être non-borné dans la direction définie par la fonction objectif (par exemple  $x_1 + 3x_2$  tel que  $x_1 \geq 0$ ,  $x_2 \geq 0$ ,  $x_1 + x_2 \geq 5$ ), dans ce cas, il n'y a pas de solution optimale finie puisqu'il est possible de construire des solutions satisfaisant les contraintes avec des valeurs arbitrairement élevées (ou basses) de la fonction objectif.

En dehors de ces deux cas, l'optimum est toujours atteint à un sommet du polyèdre. Cependant, l'optimum n'est pas nécessairement unique : il est possible d'avoir un ensemble de solutions optimales correspondant à une arête ou à une face du polyèdre, voire au polyèdre en entier.

Tous les programmes linéaires peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \max \quad & z = \quad cx \\ \text{s.c.} \quad & Ax \leq b \\ & \text{et } x \geq 0 \end{aligned}$$

Où  $c$  et  $x$  sont des vecteurs de taille  $n$ ,  $b$  un vecteur de taille  $m$ , et  $A$  une matrice de taille  $m \times n$ . Si on désigne cette représentation sous le terme de forme primale, on désigne alors sous le terme de forme duale le problème suivant :

$$\begin{aligned} \min \quad & w = by \\ \text{s.c.} \quad & Ay \geq c \\ & \text{et } y \geq 0 \end{aligned}$$

où  $A$ ,  $b$  et  $c$  sont les mêmes et  $y$  un vecteur de taille  $m$ .

Les deux problèmes sont liés par la théorie de la dualité. Si l'un d'entre eux possède une solution optimale, alors l'autre aussi. De plus, les deux solutions conduisent à la même valeur de l'objectif ( $w^*=z^*$ ). Si l'un d'entre eux est non-borné, l'autre ne possède pas de solution.

Outre son intérêt théorique, les variables duales (du problème primal) donnent lieu à des interprétations économiques très intéressantes. A chaque contrainte primale correspond une variable duale. La valeur de cette variable dans la solution optimale représente le coût marginal associé à la contrainte primale.

Un problème de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) est un programme linéaire, c'est-à-dire une fonction objectif linéaire à maximiser ou minimiser, sous des contraintes linéaires, auquel s'ajoute la contrainte que certaines variables sont entières. On parle de programme linéaire mixte lorsque seul un sous-ensemble de variables doivent être entières et les autres réelles. La Politique Agricole Commune (PAC) fait intervenir des seuils (e.g., prime à l'extensification animale qui n'est perçue qu'en deçà d'un certain chargement animal à l'hectare). De ce fait, la modélisation des exploitants agricoles européens a souvent recours à la programmation linéaire en nombres entiers.

L'objectif premier des modèles utilisant la programmation mathématique, linéaire ou positive est de représenter au mieux une réalité. Cette réalité est décrite par un ensemble de données initiales, par exemple les surfaces allouées à chaque culture. Les données requises pour spécifier un modèle aboutissant à ces résultats sont nécessairement plus larges et pas toujours disponibles. La spécification des contraintes nécessite d'avoir accès à d'autres sources d'information. Quand les informations ne sont pas disponibles, elles sont d'abord estimées "grossièrement". L'idée ensuite est de calibrer ces estimations en les modifiant à la marge de sorte à ce que le modèle reproduise au mieux la réalité.

### 1.2.2 Programmation mathématique positive

Face à ce problème, la différence essentielle de la PMP par rapport à la PL réside dans la spécification d'une fonction objectif non linéaire (Howit 1995, Gohin & Chantreuil 1999). La PMP permet ainsi de calibrer de manière exacte les modèles d'exploitation agricole à partir d'un ensemble de contraintes et donc de données restreint. Elle permet également d'éviter les discontinuités caractérisant les résultats de modèles de PL en lissant les résultats.

Deux problèmes majeurs se posent pour le modélisateur qui dispose souvent d'un ensemble limité d'informations : la spécification de la fonction objectif et des contraintes techniques d'une part, le calibrage des paramètres introduits dans ces fonctions d'autre part. Dans le cas de la PL, le calibrage peut alors être réalisé à partir d'informations techniques extérieures à la modélisation. Mais cette relative simplicité de mise en œuvre de la PL a plusieurs revers. En particulier, cette approche ne permet généralement pas de reproduire exactement les prises de décision observées des agriculteurs, sauf si des contraintes techniques très sévères "figeant" le modèle sont introduites. Par ailleurs, la simulation de scénarios avec la PL entraîne soit aucun changement, soit des "basculements" importants dans les décisions des agriculteurs. En d'autres termes, les modèles de PL produisent des résultats discontinus et peuvent conduire à des spécialisations extrêmes des exploitations agricoles dans certaines productions. De nombreux développements de la modélisation par la programmation mathématique ont alors cherché à dépasser ces problèmes, et ont donné progressivement naissance à la Programmation Mathématique Positive (PMP). La PMP permet de calibrer de manière exacte les modèles d'exploitation agricole en utilisant un ensemble de données restreint tout en ne figeant pas le modèle mais avec des contraintes techniques simplifiées. La différence essentielle de la PMP par rapport à la PL réside dans la spécification de fonctions non linéaires qui permettent alors de reproduire une situation observée et de "lisser" les résultats de scénarios. La non-linéarité a, jusqu'à présent, été principalement introduite dans la fonction objectif du profit au niveau des recettes ou des coûts de production. Ainsi, plutôt que de spécifier l'ensemble des contraintes techniques nécessaires en programmation linéaire, le problème est déplacé vers la spécification de la fonction de coût, pour laquelle il existe en fait une infinité de solutions.

Le problème essentiel de la PL est la spécification des contraintes techniques (agronomique, pédologique, climatique, de capital, de disponibilité de main-d'œuvre, etc.) auxquelles font face les producteurs. La première idée à la base de la PMP par rapport à la PL est de représenter indirectement ces contraintes dans la fonction objectif. Cette hypothèse ne fait cependant que déplacer le problème de spécification des autres contraintes techniques puisqu'il faut spécifier la nouvelle fonction objectif. La deuxième idée de la PMP consiste à considérer, comme dans la PL, que les observations correspondent à un optimum. Les données peuvent donc servir au calibrage de la nouvelle fonction objectif. Enfin, la troisième idée est de spécifier de façon non linéaire la nouvelle fonction de production afin d'obtenir un comportement lisse du modèle<sup>2</sup>. Quand le modélisateur choisit une fonction objectif avec un coût de production, la forme quadratique est généralement utilisée<sup>3</sup>. La mise en œuvre standard de la PMP procède en deux étapes. La première étape consiste à résoudre le PL 1.2-1.3 en lui adjoignant

---

<sup>2</sup>On peut s'interroger sur la justification d'un comportement lisse, des seuils étant possible quand un agent doit faire face à des choix d'investissement pour mettre en place ou maintenir une culture par exemple, dans un tel cas une surface minimale sera nécessaire et correspondra alors à un seuil et non à un comportement lisse.

<sup>3</sup>La diversité des spécifications possibles de la fonction de coût de production est une des faiblesses de la PMP.

des contraintes de surfaces correspondant aux valeurs observées (la surface en chaque culture ne peut dépasser sa valeur observé plus un petit terme positif, contraintes 1.3, où  $x^0$  correspond aux valeurs observées).

$$\max z = cx \quad (1.1)$$

$$\text{s.c.} \quad A'x \leq b' \quad (1.2)$$

$$\text{et} \quad x \leq x^0 + \varepsilon \quad (1.3)$$

Cette étape permet d'obtenir les coûts marginaux de production de chaque culture, égaux aux valeurs duales ( $\lambda_i$ ) des contraintes ajoutées. La deuxième étape consiste à utiliser ces valeurs pour calibrer les paramètres de la fonction de coût de production  $C(x)$ . La fonction de coûts de production s'exprimant comme une fonction quadratique des  $x_i$ , s'obtient en intégrant la relation  $\frac{1}{x_i} \frac{dC_i}{dx_i} = \lambda_i$ . Cependant, parmi les valeurs duales obtenues lors de la première étape, celle de la culture la moins rentable sera forcément nulle. De plus, cette méthode ne permet pas de calibrer les cultures non produites lors de l'année de référence. Néanmoins cette procédure permet de calibrer les modèles en utilisant peu de données. Plusieurs solutions peuvent être proposées pour éviter d'obtenir un coût marginal de production nul pour la culture la moins profitable (Gohin & Chantreuil 1999), utilisant en particulier d'autres données observées quand elles sont disponibles.

Il s'avère donc que la PMP est une technique efficace en particulier quand les données disponibles sont en faible quantité. La disparition des seuils peut néanmoins sembler davantage correspondre à un "raffinement" de modélisateur plutôt qu'à une réalité.

## 1.3 Quelques modèles de l'agriculture européenne

Nous allons maintenant détailler plus précisément 3 modèles d'offre : EU-FARMIS, PROMAPA et AROPAj. Le modèle AROPAj sera utilisé plusieurs fois dans la suite de ce travail, il a donc été jugé utile d'en faire ici une présentation détaillée. Les deux autres modèles sont également présentés car ils optent pour des techniques de modélisation différentes (PMP) mais proposent des résultats se comparant à ceux obtenus avec AROPAj (typologie des exploitations, scénarios mis en œuvre). Certains des résultats de ces modèles seront d'ailleurs comparés à ceux d'AROPAJ dans les 2 chapitres suivant, il nous a donc semblé indispensable d'en faire une présentation, quoique plus sommaire. Parmi les modèles décrivant l'agriculture européenne, CAPRI (Institute for Agricultural Policy, Bonn University) couple un modèle d'offre (une ferme par région) à un marché mondial, ce qui permet d'endogénéiser les prix. Il s'appuie sur la technique de la PMP pour calibrer les fonctions objectifs des agents.

### 1.3.1 AROPAj

Au centre de ce travail de thèse, le modèle AROPAj<sup>4</sup> est un modèle d'offre basé sur la programmation linéaire en nombres entiers.

---

<sup>4</sup><http://www.grignon.inra.fr/economie-publique/MIRAJE/doc/manuelaropaj/aropaj.html>

A l'origine, le modèle AROPAj a été développé pour analyser les conséquences des réformes successives de la PAC. AROPAj est constitué d'un ensemble de modèles de programmation linéaire en nombres entiers. Chaque modèle décrit les choix annuels d'un groupe-type  $k$ , représentatif de  $\nu_k$  exploitants réels<sup>5</sup>. La représentation en groupes-types tient compte de la grande diversité des contraintes techniques auxquelles font face les exploitants agricoles. Chaque groupe-type est supposé choisir ses niveaux d'offre et de demande ( $x_k$ ) de sorte à maximiser sa marge brute ( $\pi_k$ ). Le programme linéaire générique s'écrit :

$$\left| \begin{array}{l} \max \pi_k(x_k) = g_k x_k \\ \text{s.c. } A_k x_k \leq z_k \\ x_k \geq 0 \end{array} \right.$$

où  $x_k$  est le vecteur des "activités",  $g_k$  est le vecteur des marges brutes,  $z_k$  le vecteur ressource et  $A_k$  est la matrice des coefficients croisant variables primales et contraintes.

Les composantes du vecteur  $x_k$  comprennent les surfaces de chaque culture, les effectifs animaux de chaque catégorie, les productions de viande et de lait, les productions et consommations sur la ferme des cultures ainsi que les quantités d'alimentation animale achetées. Le vecteur  $g_k$  reprend les marges brutes associées à chaque activité de production : les recettes (prix de vente des produits collectés), les aides et les coûts variables. Les groupes-types sont supposés être "preneur de prix", les prix sont donc des paramètres du modèle ajustables de façon exogène. Vingt-quatre activités végétales sont modélisées, représentant la plupart des activités de surface (en culture annuelle) de l'agriculture Européenne, tenant compte de la friche mais aussi des différentes catégories de jachère imposées par la PAC. Les productions végétales sont soit vendues directement soit utilisées sur l'exploitation pour l'alimentation animale. Les composantes de  $g_k$  correspondant à l'alimentation animale représentent les coûts variables associées aux cultures fourragères ou les coûts d'achat. Trente et une catégories animales sont représentées dans le modèle (ovins, caprins, porcs, volailles plus vingt-sept catégories pour les bovins). Les émissions de gaz à effet de serre sont calculées de façon endogène dans le modèle et sont une composante de  $x_k$  (voir chapitre 6). La composante correspondante du vecteur  $g_k$  représente une éventuelle taxe sur les émissions (de valeur nulle dans les scénarios des chapitres 4 et 5).

L'ensemble de production est limité par les contraintes définies par  $A_k$  et  $z_k$ . L'ensemble des activités de surfaces est contraint par la disponibilité de la terre (valeur fixe pour chaque groupe-type). Des contraintes de rotation s'ajoutent, représentant les parts maximales admissibles de chaque culture ainsi que la dynamique de rotations des cultures. Les effectifs animaux sont contraints par les capacités physiques de place. Ils sont donc autorisés à varier seulement de façon limitée, et par catégorie. Il est également possible de laisser varier davantage le capital animal ( $\pm 15\%$ , valeur en général

---

<sup>5</sup>les groupess-types résultent de l'agrégation, au sein d'une même région, d'exploitations similaires par leur orientation technique et économique (OTE), leur taille, et leur classe d'altitude (3 classes prédéfinies : 0 à 300 m, 300 à 600 m, et plus de 600 m). Cependant, les groupes-types ne sont pas nécessairement homogènes : chacun d'entre eux peut contenir plusieurs classes d'altitude et/ou plusieurs OTE. Le nombre de groupes-types dans la version 2002 du modèle AROPAj est de 1074 pour l'UE15.

retenue dans les scénarios utilisés dans les chapitres suivants). Pour l'alimentation animale, les exploitants ont le choix entre leur propre production de fourrages et de grains et l'achat d'aliments concentrés ou grossiers. Quatre types d'aliments concentrés et un type d'aliment grossier existent dans le modèle, se distinguant par leur contenu en énergie et en protéines. Dans le modèle, les exploitants choisissent l'alimentation animale de sorte 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 de digestion. Une part importante des contraintes est enfin associée aux restrictions imposées par la PAC. Les obligations de jachère tout comme les quotas laitiers et sucriers font partie de ces contraintes. Les différents types de quotas sucriers (A, B et C<sup>6</sup>) sont également inclus. Quand les producteurs doivent faire face à des choix discrets, les instruments politiques de la PAC inclus dans le modèle nécessitent l'utilisation de variables binaires ou entières. Le calcul des paramètres définissant  $A_k$ ,  $z_k$  et  $g_k$ , ainsi que les niveaux de référence  $x_k^0$  se fait en trois étapes : (i) la typologie des exploitations de l'échantillon en groupes-types, (ii) l'estimation des paramètres, et (iii) le calibrage. La principale source de données est le RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole).

Le RICA 2002 fournit des données de comptabilité (revenus, charges variables, prix, rendements, surfaces dédiées à chaque culture, nombre d'animaux, aides reçues, type d'exploitation et taille économique) pour un échantillon d'un peu moins de 60 000 agriculteurs enquêtés. Environ 50 000 fermes sont prises en compte dans la modélisation, ce qui représente un peu moins de 2 millions d'agriculteurs Européens (à plein temps) pour l'année observée. Les données sont disponibles au niveau régional (101 régions dans l'UE15). Les régions RICA sont décrites sur le site web <http://europa.eu.int/comm/agriculture/rica/> et sont légèrement différentes des régions NUTS 2 (présentées sur le site web <http://europa.eu.int/comm/en>). Du fait du caractère annuel du modèle, les fermes de l'échantillon définies comme "spécialisées dans l'horticulture" et "spécialisées dans les cultures permanentes" sont exclues (orientations technico-économiques 2 et 3 dans la classification du RICA, les cultures permanentes prenant par exemple en compte l'horticulture, les oliveraies, les vergers, les vignes).

La typologie s'effectue donc à partir de la population d'agriculteurs restants, représentant les cultures annuelles, et l'élevage. Il est important de garder cette restriction à l'esprit dans l'analyse des résultats dans la mesure où les exploitations exclues représentent une part significative de la surface agricole totale dans certaines régions. Les autres exploitations sont regroupées en "groupes-types" selon les quatre variables principales : (i) région (parmi les 101 régions), (ii) altitude moyenne (il existe 3 classes d'altitude dans le RICA : 0-300 m, 300-600 m et >600m), (iii) Orientation Technico-Économique (14 OTE dans le RICA), et (iv) taille économique de l'exploitation. La typologie des exploitations est le fruit d'un compromis : d'une part, le nombre d'ex-

---

<sup>6</sup>Ces quotas sont établis par État Membre puis répartis entre les exploitations en fonction de leurs références de production. Le quota A et le quota B se différencient par les taux d'aides et de cotisations à la production qui leur sont appliqués. Les quantités produites au delà des quotas A puis B ( sucre C) ne peuvent être vendues sur le marché communautaire. Celles ci doivent être exportées vers les pays tiers au prix du marché mondial ; elles ne bénéficient pas des restitutions à l'exportation.

exploitations réelles dans un groupe-type doit être supérieur à 15 pour respecter la confidentialité des données (règle imposée contractuellement par la Commission Européenne qui fournit les données) et assurer la validité des estimations ; d'autre part, le nombre total de groupes-types doit être le plus grand possible afin de réduire le biais d'agrégation au niveau régional. Chaque groupe-type rassemble donc des exploitations réelles situées dans la même région, caractérisées par des OTE similaires et de même classe(s) d'altitude. En suivant cette procédure, 1074 groupes-types ont été construits pour la version du modèle AROPAj basée sur le RICA 2002.

L'approche par les groupes-types présente plusieurs intérêts. Cela permet d'abord de prendre en compte la diversité des systèmes de production au niveau infra-régional. Les résultats peuvent être agrégés au niveau régional, national et européen, mais la région n'est pas modélisée comme une seule grande ferme. De ce fait, le biais d'agrégation est moins problématique (Paris & Rausser 1973). D'autre part, l'existence d'une agriculture très diversifiée est mieux prise en compte dans la mesure où les exploitations mixtes sont explicitement modélisées. Dans le RICA, chaque exploitation échantillonnée est associée à un facteur indiquant sa représentativité dans la région. Les facteurs individuels sont agrégés au niveau du groupe-type ( $\nu_k$ ) et utilisés pour agréger les résultats au niveau régional.

L'étape d'estimation des paramètres et des niveaux de base des variables s'effectue à partir des données du RICA comprenant : les coûts variables, les prix des produits, les surfaces et les parts de surfaces de chaque culture, les effectifs animaux, et les aides reçues. La procédure d'estimation se fait au niveau du groupe-type. Les coûts variables sont séparés entre les coûts associés aux engrais et les autres coûts (semences, carburant, pesticides, etc.). Dans le RICA, seul le coût total de chaque poste (engrais...) est fourni. Les coûts variables pour chaque culture sont donc inférés à partir d'une analyse de covariance utilisant les surfaces cultivées et en prenant en compte le facteur lié au groupe-type. D'autres sources d'information sont également utilisées. Les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre sont issus du rapport du GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001). Les caractéristiques des aliments pour animaux et des besoins animaux sont tirés d'ouvrages techniques (Jarrige 1988). Enfin, des dires d'expert sont utilisés quand aucune autre source technique ou statistique n'est disponible. C'est le cas par exemple des types d'engrais utilisés selon la région, le pays ou la culture et de certains paramètres d'alimentation.

La troisième et dernière étape consiste au calibrage de chacun des programmes linéaires individuels, qui est une ré-estimation d'un sous-ensemble des paramètres indexés par chacun des groupes-types. Le calibrage permet en fait de remettre en cause certaines estimations de paramètres pour lesquels l'information est manquante ou manque de fiabilité. Ces paramètres concernent les besoins alimentaires des animaux, la durée de vie de certaines catégories animales, les rendements des prairies et les parts de surface admissibles. Ces paramètres sont alors recalculés de sorte à minimiser la distance observée pour chaque groupe-type entre les données observées  $x_k^0$  et la solution optimale  $x_k^*$  du PL. La résolution numérique de ce programme de minimisation se fait de

façon itérative, combinant des techniques de Monte-Carlo et des méthodes de gradient. Le nombre de paramètres ainsi recalculés est de l'ordre de 150, ce qui explique le coût élevé du calcul (plusieurs semaines sont nécessaires pour calibrer le modèle).

D'autres développements du modèle AROPAj ont été entrepris. Ils concernent les différentes options de réformes, et en particulier la réforme sur les quotas laitiers, un module de calcul des rendements agricoles et des apports en engrais azotés, ainsi qu'un module de l'épandage des effluents d'élevage.

#### 1.3.2 EU-FARMIS

Le modèle EU-FARMIS est un modèle d'offre basé sur la programmation mathématique positive. Il couvre plusieurs pays de l'Union Européenne (actuellement sont couverts la France, le Royaume-Uni, l'Allemagne). Les groupes-types rassemblent des exploitations réelles du RICA regroupées selon trois critères : (i) la région, (ii) l'orientation technico-économique (OTE), et (iii) la taille économique. Les facteurs de représentativité des groupes-types sont recalculés en s'appuyant sur des méthodes d'entropie croisée<sup>7</sup> pour mieux prendre en compte la surface utilisée ainsi que le capital animal. Les paramètres du modèle sont estimés à partir du RICA et de documentation technique dans un premier temps. Certaines estimations sont ensuite complétées par une méthode d'entropie croisée qui permet d'utiliser une information a priori sur les paramètres à estimer. Enfin, la PMP est utilisée pour calibrer le modèle par rapport à l'année d'observation. La partie linéaire de la fonction objectif comprend les revenus diminué des coûts de la terre, du travail et des intérêts du capital emprunté.

Vingt-sept activités végétales et quinze activités animales sont représentées. Les contraintes recouvrent les domaines de l'alimentation animale (besoins en énergie et en protéines), l'utilisation des animaux intermédiaires, l'utilisation des engrais (organique et minéral), le travail, les rotations des cultures et les contraintes politiques (PAC).

En outre, le modèle prend également en compte un marché des quotas laitiers (qui peuvent s'échanger en général sur les régions NUTS I et parfois NUTS II) et un marché de la terre (l'échange se fait alors entre exploitations au sein de chaque région NUTS II).

La simulation de scénarios se fait en deux étapes. Dans une première étape, est établi un scénario de référence pour une année cible du futur. Cela présuppose de définir des hypothèses exogènes sur le changement de structure (distribution de la taille des exploitations), le progrès technique (rendements) et l'évolution des prix. Ces hypothèses se font à partir de séries temporelles (rendements), les prix quant à eux sont en général définis par le scénario simulé et complétés par des projections d'autres modèles. Dans une seconde étape, d'autres scénarios politiques sont simulés, en modifiant certains

---

<sup>7</sup>ou cross entropie, ou distance de Kullback. La notion d'entropie, à l'origine concept de la thermodynamique, a été introduite en 1948 par Shannon dans sa *Théorie de l'Information* pour mesurer le degré d'incertitude a priori dans un système. La cross entropie entre deux distributions de probabilité mesure l'information nécessaire pour identifier un événement d'un ensemble de possibilité. La méthode de cross entropie consiste, à partir d'une distribution de probabilité a priori, à approcher la "vraie" distribution en utilisant l'information disponible.

paramètres ou certaines contraintes. Les résultats sont alors comparés au scénario de référence et permettent d'en déduire les impacts de telle ou telle mesure.

### 1.3.3 PROMAPA

Le modèle PROMAPA<sup>8</sup> est également un modèle d'offre basé sur la programmation mathématique positive (fonction objectif non linéaire). Il couvre 90% des surfaces cultivées en Espagne. La typologie des groupes-types se base sur les variables : (i) taille de l'exploitation, (ii) région, (iii) orientation technico-économique. Les paramètres du modèle sont estimés quand cela est possible à partir du RICA (rendements, prix). Certains sont obtenus de dires d'experts. La fonction objectif comprend une part linéaire (marge brute) et une fonction de coût quadratique dont les paramètres sont calculés lors de la phase de calibrage (PMP avec ou sans utilisation de la méthode du maximum d'entropie). Les contraintes du modèle concernent : (i) la disponibilité de la terre, en tenant compte des capacités d'irrigation et des parts admissibles pour les cultures de vente d'une part et les fourrages d'autre part ; (ii) les politiques agricoles (jachère, paiements) ; (iii) l'équilibre de la démographie bovine et ovine ; et, (iv) l'alimentation animale (besoins, capacité d'absorption). Le modèle distingue les cultures selon qu'elles sont irriguées ou non, qu'elles sont de type COP ou non et les fourrages. Les activités animales présentes dans le modèle sont associées au lait (bovin et ovin) et à l'élevage (bovin et ovin). Les activités animales concernant les volailles, les porcs et l'engraissement bovin ne sont pas prises en compte.

Les simulations se font en deux étapes. La première étape établit un scénario de référence, la deuxième prend en compte des modifications de politiques agricoles et des hypothèses sur l'évolution des prix.

Le tableau 1.1 résume les différentes caractéristiques des 3 modèles.

## Conclusion

Le secteur agricole est sans doute un des sujets les plus traités par la modélisation mathématique. Les approches de modélisation sont variées, elles cherchent à refléter les différentes relations de ce secteur avec le reste de l'économie. Il semble ainsi que selon l'aspect à éclairer, l'approche soit différente, les modèles d'équilibre général ou partiel étant plutôt destinés à traiter des questions de commerce international, problèmes où l'ajustement des marchés peuvent jouer un rôle important, tandis que les modèles d'offre, en concurrence avec les modèles d'équilibre partiel, s'attachent davantage à préciser les effets plus régionaux des réformes des politiques agri-environnementales. Les modèles d'offre s'avèrent en fait plutôt complémentaires des modèles de type EGC ou d'équilibre partiel. Si ces derniers donnent des résultats pertinents, les signaux prix qu'ils envoient peuvent ensuite être intégrés dans les modèles d'offre. En outre, la robustesse des modèles d'offre permet d'obtenir des résultats cohérents par rapport aux hypothèses de prix sur lesquelles ils reposent. Quelque soit le modèle utilisé, l'objectif

---

<sup>8</sup>PROgrammation Mathématique pour l'Analyse des Politiques Agricoles

	AROPAj	FARMIS	PROMAPA
Objectif	analyse des politiques impacts environnementaux	analyse des politiques	analyse des politiques
Type	offre	offre	offre
Unité de base	groupes-types	groupes-types	groupes-types
Niveau d'agrégation	Régional, national ou européen	National	Pas d'agrégation
Stat. vs dyn.	Statique Monopériodique	Statique Monopériodique	Statique Monopériodique
PL/PMP	PL	PMP	PMP
Géographique	Région RICA	NUTS I	Région Rica
Typologie	région, taille éco. altitude, OTE	région, taille éco. OTE	région, OTE
Paramètres	RICA + experts	RICA + experts	RICA + experts
Calibrage	Monte Carlo et gradient	PMP	PMP
Prix	exogène (RICA)	endogène pour terre et quota exogène (modèles EP) sinon	exogène (RICA)
Validation	année de référence	comparaison autres modèles + experts	estimation de l'erreur prédictive
Scénario de référence	PAC Agenda 2000, année 2002	PAC Agenda 2000 année 2010	PAC Agenda 2000 année 2000

TAB. 1.1 – Principales caractéristiques des modèles AROPAj, FARMIS et PROMAPA

n'est pas un bilan académique au sujet d'une décision politique mais plutôt de fournir en aval des informations cruciales pour la préparation de décisions à prendre par les gouvernements.

Les techniques de modélisation ont également beaucoup progressé. L'émergence et le développement rapide de la programmation mathématique positive démontrent des progrès constants des modèles. Cette technique est apparue pour pallier une particularité de la PL : les solutions pouvaient basculer. L'introduction de la PMP a permis de lisser les résultats des modèles. Il semble néanmoins que cette technique ne fasse pas encore consensus dans le monde scientifique. Les solutions lisses ne sont d'abord par forcément plus réalistes. Des "bascules" s'observent en effet dans la réalité. Le lissage des résultats est surtout recherché quand les modèles sont couplés à d'autres. Cherchant à pallier un manque d'information préalable à la modélisation, la PMP ne fait finalement que déplacer le problème sur la spécification de la fonction de coût. Enfin, il semble que cette technique n'est pas justifiée quand les données sont en quantité suffisante et de qualité correcte.

Ayant bénéficié de l'expertise de chercheurs d'autres disciplines, le modèle AROPAj se base sur de nombreuses informations qui spécifient les contraintes techniques auxquelles font face les agriculteurs. Il doit ainsi permettre, à l'aide de la programmation linéaire exclusivement, d'évaluer correctement les conséquences d'une réforme de la PAC sur le secteur agricole européen. En le couplant à un modèle d'équilibre partiel, il peut également permettre de mesurer l'effet du marché, consécutif à la réforme.

Utilisant la technique de la programmation linéaire en nombres entiers, les données sur lesquelles il se base semblent correspondre au cas où l'emploi de la PMP n'est pas justifié. Enfin, très détaillé, le modèle AROPAj est également développé pour la prise en compte de phénomènes plus locaux, comme l'impact économique du tassement des sols, mais aussi du changement climatique. Cet aspect sera développé dans les chapitres 8 et 9.



## Chapitre 2

# Impacts de la réforme de Luxembourg

### Introduction

La réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) de 2003 cherche à répondre à plusieurs exigences qui interagissent. Parmi elles, se distinguent la recherche d'un commerce international moins sujet aux distorsions de concurrence, la prise de conscience du coût public croissant de cette politique, et la volonté d'accroître l'efficacité des politiques sectorielles. L'accord sur l'agriculture de l'OMC négocié lors de l'Uruguay Round est une première étape importante vers des échanges plus respectueux des règles de la concurrence sur les marchés agricoles mondiaux. Il implique des obligations spécifiques pour les gouvernements membres de l'OMC afin d'améliorer l'accès à leur marché et réduire les aides à l'agriculture induisant des distorsions sur les échanges. Les politiques qui soutiennent les prix intérieurs ou subventionnent la production, telle que les pratiques américaines ou européennes, sont devenues l'objet de nombreuses plaintes car elles distordent les échanges.

L'accord sur l'agriculture de l'OMC distingue les politiques qui stimulent directement la production de celles qui n'ont pas d'effet direct. Le code couleur mis en place distingue les politiques ayant un effet direct et fort (boîte orange) de celles ayant un effet faible (boîte verte). Dans cette dernière, se trouvent les paiements directs aux agriculteurs, sans contrainte sur la production, telles que les aides forfaitaires, les aides pour la restructuration et les paiements associés à des programmes régionaux ou environnementaux. Les politiques liées à des programmes limitant la production sont regroupées distinctement (boîte bleue). L'accord sur l'agriculture de l'OMC stipulent que les politiques de la boîte orange doivent disparaître tandis que celles de la boîte bleue doivent être modifiées pour passer dans la boîte verte. Ce cadre international a contribué à la réforme de la politique agricole commune en Europe. A l'origine, la plupart des aides liées à la PAC étaient dans la boîte orange. Une première vague de réforme (réforme Mc Sharry en 1992) a déplacé la plupart des aides de la PAC vers la boîte bleue. Plus récemment, la réforme de Luxembourg (2003), dite réforme du découplage, a déplacé les aides vers la boîte verte.

La réforme de la PAC soulève trois questions auxquelles nous essayons de répondre dans ce chapitre. Est-ce que le schéma de découplage adopté est cohérent avec la stabilité des productions vendues, réconciliant ainsi la PAC avec les règles du commerce international ? Est-il à même d'augmenter ou de maintenir les revenus agricoles à budget européen constant ? Enfin, peut-il avoir des effets positifs sur l'environnement ? L'analyse présentée dans ce chapitre repose sur le modèle européen AROPAj qui permet de fournir des réponses à ces questions à différentes échelles spatiales. Dans la mesure où un modèle est à même de couvrir une partie des problèmes très larges associés à ce type de réforme, nous essayons ici d'estimer les impacts du schéma de découplage par rapport à différents critères. Le découplage étudié dans ce chapitre est d'abord vu comme proche de la réforme de Luxembourg. Puis il est aussi étudié sous une forme plus accentuée, sans obligation de jachère et sans contrainte sur l'usage des terres.

Dans ce chapitre, nous présentons d'une part l'insertion de la réforme de la PAC de 2003 dans un modèle européen, AROPAj. D'autre part, nous présentons une évaluation des conséquences de cette réforme à différentes échelles géographiques (régions, pays, Europe des 15). Dans la section 2.1, nous nous intéressons au concept de découplage ainsi qu'aux résultats théoriques attendus. Nous nous intéressons aux évaluations des conséquences telles que les modèles existants ont pu le faire. Dans la section 2.2 nous présentons précisément les termes de la réforme de Luxembourg et la façon dont nous l'avons stylisée dans le modèle AROPAj. Dans la section 2.3 nous présentons les principaux résultats, à la fois à l'échelle européenne (UE15), l'échelle des États Membres et l'échelle régionale (les régions du Réseau d'Information Comptable Agricole - RICA). Les résultats présentés concernent plus précisément les changements d'usage des sols, les productions, les marges, les animaux et les émissions de gaz à effet de serre (GES). L'ensemble des résultats est décliné selon différents scénarios : la réforme de Luxembourg, mais également un hypothétique découplage total, et différentes hypothèses sur les prix.

## 2.1 Le découplage en théorie et dans les modèles

### 2.1.1 Le concept de découplage

Soutenir l'activité agricole crée des distorsions sur les marchés ainsi que des distorsions entre les agents économiques et entre les pays. Néanmoins, si les décideurs souhaitent maintenir des transferts entre agents qui diffèrent dans les faits de transferts forfaitaires neutres, la question pertinente est celle de la minimisation du coût social de ces transferts. De ce point de vue, la PAC offre aux économistes un champ d'études intéressant pour la conception de politiques de second rang.

Par rapport à un objectif de minimisation des pertes de bien-être pour le consommateur et le contribuable, le découplage des paiements de la PAC semble être une réforme incontournable. Il est maintenant étudié depuis longtemps. L'OCDE (2000) a résumé les différentes contributions que l'on peut trouver dans la littérature afin de préciser le concept de découplage.

L'OCDE (2000) distingue deux types de politiques découplées : une politique totalement découplée ou une politique effectivement découplée, selon qu'il y a ou non un effet en cas de choc exogène dans l'offre ou la demande. Une politique est totalement découplée si elle ne modifie pas les fonctions d'offre et de demande, si les prix et les quantités d'équilibre ne changent pas et s'il n'y a aucune différence dans la réaction du marché à tout choc exogène dans l'offre ou la demande.

Cependant, la définition du découplage adoptée par l'OMC lors de l'Uruguay Round est plus large. Des effets minimes sur les échanges et la production peuvent être ressentis. L'évaluation des effets d'une politique découplée dépend du cadre théorique que l'on considère : dynamique ou statique, déterministe ou en univers incertain. Il semble dans les faits difficile de concevoir une politique qui n'a aucun effet sur la production ou les échanges. Selon l'OCDE (2000), le découplage tel qu'il est mis en place par la réforme de Luxembourg peut par exemple avoir des conséquences sur les échanges et le marché via un effet richesse ou un effet d'assurance. Même si aucun recouplage n'était permis par la réforme de 2003 – ce qui n'est pas le cas en réalité, puisque chaque État Membre peut partiellement recoupler certaines aides – le revenu minimum garanti par les paiements découplés induirait une modification du comportement des producteurs.

Il s'agit donc essentiellement d'évaluer de combien cette réforme va augmenter le bien-être collectif. Si la théorie garantit une augmentation, les modèles de programmation mathématique vont nous permettre de la quantifier.

### 2.1.2 Évaluation de la réforme de la PAC

La Commission Européenne a besoin d'évaluations précises des impacts des réformes de la PAC. Deux programmes européens, GENEDEC et IDEMA ont été financés dans le cadre du sixième PCRD (Programme Cadre pour la Recherche et le Développement) de la Commission Européenne afin d'informer les décideurs des impacts potentiels de la mise en œuvre de la réforme de la PAC sur le revenu des producteurs et sur le budget public dédié à la PAC.

Le projet GENEDEC, coordonné au sein de l'UMR Économie Publique de l'INRA a été conçu pour évaluer les impacts économiques et environnementaux du découplage des aides directs de la PAC suite aux accords de Luxembourg. Il vise à éclairer la faisabilité, l'efficacité et les impacts des différents scénarios de découplage, afin de fournir à la Commission Européenne des recommandations et des alternatives pour améliorer la PAC.

En outre, il aborde les problèmes environnementaux associés aux activités agricoles modélisées, ce qui sera utile pour inclure la conditionnalité des aides et le second pilier dans l'analyse. L'évaluation quantitative attendue est complétée par une étude des conséquences socio-économiques potentielles pour quelques territoires et la filière alimentaire. Une des orientations de GENEDEC est de concevoir des outils de modélisation afin d'évaluer les impacts sur l'allocation des terres, la production et d'autres informations économiques à différentes échelles – du système d'exploitation à l'échelle européenne, pour couvrir de façon homogène l'Union Européenne (UE15).

Dans le cadre de GENEDEC, Kuepker & Kleinhanss (2006) ont analysé l'impact de la réforme de Luxembourg sur les systèmes d'exploitation en France, en Allemagne et au Royaume-Uni. L'analyse a été menée avec le modèle EU-FARMIS qui est fondé sur la programmation mathématique positive (PMP). Une des caractéristiques de leur approche est la prise en compte de conditions introduites par la PAC 2003, à savoir les bonnes pratiques nécessaires pour maintenir la qualité des sols. Prenant en compte l'usage des sols et la répartition budgétaire, leurs résultats montrent des contrastes significatifs entre les 3 États Membres, du fait de schémas nationaux différents.

Judez et al. (2005) ont étudié l'impact du découplage en Espagne pour des systèmes d'exploitation identifiés comme "spécialisés dans les céréales (sauf le riz), oléagineux et protéagineux" avec le modèle PROMAPA qui est fondé sur la programmation mathématique positive. Leurs résultats sont en accord avec une réforme du découplage qui pénalise les cultures COP (Céréales, Oléo-Protéagineux) : la surface dédiée aux cultures COP diminue au profit des autres cultures, en particulier les fourrages. Cette tendance n'est pas marquée dans leurs résultats à cause d'un manque d'alternatives pour le système d'exploitation étudié. Pour les autres systèmes d'exploitation, la diminution des surfaces COP pourrait être plus forte. Ils observent également une légère baisse de la marge, avant tout due à la mise en place de la modulation (voir section 2.2).

Le projet IDEMA a été conçu pour développer des méthodes et des outils afin de fournir une évaluation économique intégrée des impacts du découplage sur le secteur agricole européen, en particulier pour les nouveaux États Membres. Un des modèles sur lequel s'appuie le projet est le modèle d'équilibre partiel ESIM. La réforme évaluée avec ce modèle (Balkhausen & Banse 2006) conduit à un transfert des terres allouées aux "grandes cultures" vers les fourrages et les prairies. L'option politique de conserver les paiements animaux partiellement couplés à la production peut entraîner une augmentation de la production de viande.

### 2.1.3 Résultats attendus du modèle AROPAj

Une de nos principales préoccupations concernant la réforme est la possibilité technique de l'insérer dans un modèle en prenant en compte la diversité des règles de mise en œuvre nationales. Pour ce faire, il est nécessaire de rendre les sorties du modèle sensibles aux nouveaux outils politiques. Les modèles de programmation mathématique conviennent particulièrement à cette tâche. Ceci est particulièrement vrai quand des obligations et des seuils doivent être introduits dans la modélisation, ce qui est possible grâce à des algorithmes dédiés aux problèmes à variables continues et entières.

Le modèle AROPAj a été à l'origine développé pour prendre en compte toute extension géographique de l'Union Européenne (dans la mesure où le RICA est disponible) ainsi que toute modification de la PAC. Ces caractéristiques – généralité et adaptabilité – en font un outil très adapté à l'évaluation des impacts de la nouvelle PAC pour l'ensemble de l'UE15.

D'un point de vue pratique, la mise en œuvre de la réforme dans le modèle est un processus en 2 étapes. La première étape est consacrée à l'identification des paramètres

d'aides en lien avec la réforme et en phase avec la conception du modèle. Cela nécessite une certaine "stylisation" de la réforme et de ses variantes nationales. La deuxième étape consiste à faire tourner le modèle avec les valeurs de référence afin de calculer les paramètres de la réforme dépendant du passé (seuils de jachère, niveaux historiques d'aides). Dans notre approche, le "passé" fait référence à l'année des données sur lesquelles le modèle est calibré.

L'intégration de la nouvelle PAC dans le modèle nous a permis de fournir aux décideurs des informations sur les changements d'usage des terres (cultures, fourrages), les productions consommées sur la ferme et vendues, ainsi que les prix fictifs des facteurs quasi-fixes (terre, bétail, quota laitier et quota sucre). De plus, nous sommes capables d'évaluer les conséquences indirectes de la réforme sur certains critères environnementaux. En particulier, en nous appuyant sur De Cara et al. (2005) et sur De Cara & Jayet (2006), nous pouvons évaluer les variations des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les impacts de la réforme sur les productions, l'usage des sols ainsi que sur les marges. L'impact sur le coût d'opportunité de la terre (prix fictif) sera étudié dans le chapitre suivant. La valeur ajoutée de ce travail porte sur l'évaluation de la réforme à l'échelle européenne et plus seulement pour quelques pays ou régions. Notre travail permet de plus de souligner les disparités régionales induites par la réforme. En effet, le découplage peut être plus ou moins avantageux selon les régions et les orientations technico-économiques des exploitations.

## **2.2 L'accord de Luxembourg dans le modèle AROPAj**

### **2.2.1 La PAC après l'accord de Luxembourg**

L'objectif de la PAC, introduite en 1962, était au départ de permettre à l'Europe d'atteindre l'autosuffisance alimentaire. Cet objectif a été prioritaire pendant 10 ans. Ensuite, les premières difficultés sont apparues : les premiers excédents de production et un coût important de la politique. Quelques mesures ont été proposées dans les années 80 pour limiter les dépenses publiques. En 1992, la réforme McSharry va plus loin et la PAC qui soutenait la production se veut alors une politique assurant un revenu minimum aux agriculteurs. Parallèlement, le cadre international et plus particulièrement les négociations à l'OMC mettent l'accent sur les distorsions induites par ce type de politiques régionales. En 1999, l'accord de Berlin met en place la réforme de l'Agenda 2000. Cette réforme améliore la compétitivité en réduisant les soutiens par les prix. Elle introduit également une politique globale de développement rural qui reconnaît le caractère multifonctionnel de l'agriculture et qui instaure des mesures de soutien à l'économie rurale au sens large. L'Agenda 2000 cherche à renforcer les dispositions environnementales de la PAC et à les intégrer plus systématiquement dans une politique plus vaste en faveur du développement rural. L'accord sur l'Agenda 2000 donne aux États Membres la possibilité de moduler les versements directs effectués aux agriculteurs, dans le cadre de la PAC, sur la base de critères qui peuvent inclure les effectifs de l'exploitation, sa

prospérité générale ou le montant total des paiements effectués au titre des systèmes d'aides.

L'accord de Luxembourg (2003) a introduit un nouveau système de paiement unique par exploitation, sans aucun lien entre l'aide et la production. L'aide est conditionnée au respect d'un certain nombre de critères liés à l'environnement, la sécurité des aliments, la santé et le bien-être des animaux, la préservation des sols et l'obligation de jachère. La modulation des aides a également été mise en place afin d'alimenter le budget des aides liées au développement rural.

La réforme de la PAC laisse aux États Membres deux options pour le calcul des aides : un système historique et individuel ou un système régionalisé. Dans les deux cas, la base de calcul des paiements découplés est la moyenne des aides reçues sur la période 2000-2002 pour les cultures et les animaux. Cependant, la méthode de calcul est différente selon le système retenu.

Dans l'option individuelle historique, la surface cultivée et en jachère de la période de référence détermine le nombre de droits. La valeur des droits est égale à la moyenne des aides reçues divisée par le nombre de droits. Les surfaces prises en compte sont celles cultivées en céréales, oléo-protéagineux, lin, riz, légumineuses à grains, pomme de terre à féculé, fourrages et semences. Pour la jachère, les droits sont calculés selon le même schéma mais séparément : l'ensemble des paiements reçus pour la jachère est divisé par la surface en jachère, le nombre d'hectare définissant le nombre de droits et la prime à l'hectare la valeur du droit.

		Découplage total	Découplage partiel
Individuel		Grèce, Irlande, Italie, Ecosse, Pays de Galles	Autriche, Belgique, France, Pays-Bas, Portugal, Espagne, Suède
Hybride	Statique	Luxembourg	Danemark, Irlande du Nord
	Dynamique	Allemagne, Angleterre	Finlande

TAB. 2.1 – Choix des États Membres concernant les options de découplage possibles

L'autre option pour la mise en place de la réforme est la régionalisation. Dans ce cas, la valeur du droit est unique dans toute la région. Le calcul est identique au précédent<sup>1</sup>, mais au lieu de se faire sur une base individuelle, il prend en compte l'ensemble des exploitants de la région. Les États Membres optant pour la régionalisation ont tous mis en œuvre un modèle hybride pour atténuer les éventuelles baisses des revenus que cette option peut engendrer. Les modèles hybrides sont soit statiques, soit dynamiques et combinent toujours un paiement régional à un paiement individuel. Les modèles statiques ne modifient pas la part de chaque type de paiement au cours des années, tandis que les modèles dynamiques évoluent vers un modèle purement régional. Le tableau 2.1 présentent les choix des différents États Membres.

Les États Membres ont également la possibilité de recoupler partiellement certaines

---

<sup>1</sup>Les parcelles éligibles au droit au paiement comprennent également celles utilisées pour les cultures maraichères.

aides. Le tableau 2.3 indique les choix de chaque État Membre concernant les taux de recouplage des aides, tel qu'ils ont été insérés dans le modèle AROPAj.

Pour les grandes cultures, en dehors du découplage total, les États Membres peuvent conserver 25% des primes sous forme couplées (Espagne, France), ou 40% de la prime supplémentaire au blé dur. Pour la viande bovine, la prime à la vache allaitante peut être conservée dans sa totalité avec 40% de la prime à l'abattage (Autriche, Belgique, Espagne, France, Pays-Bas, Portugal). En outre, il est possible de garder 100% de la prime à l'abattage et 75% de la prime aux bovins mâles (Danemark, Suède). Les primes pour les ovins et caprins peuvent rester couplées jusqu'à 50% (Danemark, Espagne, France). A partir de 2005 (et au plus tard en 2007), la prime lait peut être incluse dans le paiement unique.

## 2.2.2 L'accord de Luxembourg dans le modèle

Les modèles de programmation mathématiques conviennent théoriquement très bien aux modélisateurs quand il s'agit d'introduire des nouveaux paramètres, des nouvelles contraintes linéaires ou des nouvelles activités pour représenter un phénomène à étudier<sup>2</sup>. L'accord de Luxembourg nous a conduit à mettre en place de nouvelles façons de subventionner les agriculteurs. Par conséquent, le cœur du modèle AROPAj a du être légèrement adapté.

Les modèles de programmation mathématique permettent de calculer les droits à paiement uniques et de comparer les marges des agriculteurs avant et après la réforme.

Le calcul des paiements uniques, individuels, ou régionaux, dans le modèle AROPAj se fonde sur les résultats obtenus en utilisant la politique de l'Agenda 2000 comme entrée du modèle. Une seule année de simulation est utilisée pour représenter la période de référence de 3 années. Les aides jusqu'alors dans AROPAj ont été réparties en différents sous-bilans de sorte à pouvoir reconstituer les différentes combinaisons de découplage/recouplage possibles. Les sous-bilans rassemblent pour chaque ferme-type ou chaque région du modèle, selon le schéma adopté par l'État Membre (individuel ou régional) :

- Aides pour les céréales, et oléo-protéagineux (COP) ;
- Aides supplémentaires pour le blé dur ;
- Aides supplémentaires pour les protéagineux ;
- Aides pour la jachère ;
- Primes d'extensification ;
- Aides au lait ;
- Aides pour les ovins et caprins et petits troupeaux ;
- Primes à la vache allaitante (PMTVA) ;
- Primes spéciale pour les bovins mâles (PSBM) ;
- Primes à l'abattage des veaux (PAB veaux) ;
- Autres primes d'abattage (PAB autres) ; et,

<sup>2</sup>L'introduction de nouvelles activités nécessite cependant de disposer d'informations préalables sur les coûts et revenus associés.

- Autres aides, exclues du découplage (taxes, régime sucre, etc.).

La mise en œuvre de la réforme de Luxembourg dans AROPAj a nécessité quelques entorses par rapport à la réalité liées à la structure du modèle (régions RICA, fermes-types). Les paiements uniques individuels sont en fait calculés pour chaque ferme-type, et les paiements régionaux au niveau de la région RICA quand celle-ci correspond à l'échelle régionale déterminée par les États Membres.

Certaines aides de la politique Agenda 2000 ne sont actuellement pas dans le modèle. La principale raison de ces omissions est en général le manque de données. Par exemple, le RICA ne donne pas d'information sur la destination des produits; il ne fait, par exemple, pas de distinction entre les pommes de terre de féculé et les pommes de terre de consommation. De ce fait, cette distinction n'existe pas non plus dans le modèle. Néanmoins, le budget européen de la PAC est bien représenté par AROPAj<sup>3</sup>.

L'option de régionalisation peut être mise en œuvre sans aucune difficulté dans le modèle AROPAj dans la mesure où les régions correspondent aux régions RICA sur lesquelles le modèle s'appuie (Allemagne). Sinon, des hypothèses sont à faire pour répartir les fermes-types d'AROPAJ dans les différentes régions (Angleterre), selon les orientations technico-économiques des groupes.

Afin de mettre en place la réforme de Luxembourg dans le modèle AROPAj, une nouvelle matrice (tableau 2.2) de contraintes ( $GDL_i$  avec  $1 \leq i \leq 6$ ,  $GDU$ ) a été introduite dans le code, ainsi que des nouveaux paramètres ( $refarea$ ,  $psngl$ ,  $reffin$ ), et des nouvelles activités ( $X_{nsa}$ ,  $X_{sgdl}$ ,  $X_{pgdl}$ ,  $X_{rgdl}$ ,  $I_{gdlg}$ ,  $I_{gdh}$ )

La variable  $X_{nsa}$  correspond à la surface en jachère qui est aidée dès le premier ha et qui peut varier entre 0 et  $refarea$ .  $refarea$  correspond à la surface en jachère de la période de référence. Si  $X_{nsa}$  est inférieure à  $refarea$ , la surface restante de la ferme-type ne reçoit aucune aide, et est noté  $X_{sgdl}$ . Si  $X_{nsa}$  est égal à  $refarea$ , la surface restante de la ferme-type reçoit  $psngl$  par ha.  $psngl$  est la valeur du droit à paiement unique, calculé lors du premier run du modèle. L'aide totale reçue pour la jachère ne peut dépasser  $reffin$ .  $reffin$  correspond au montant d'aide reçu pendant la période de référence au titre d'aides à la jachère. En Allemagne, les calculs sont encore différents. Les prairies sont distinguées des terres arables dans ce sens que l'aide reçue au titre du paiement unique n'est pas la même pour ces deux activités (au moins pour les premières années).  $X_{pas}$  et  $X_{pgdl}$  représentent l'activité prairie dans le modèle. L'activité  $X_{pas}$  est impliquée dans les équations prenant en compte les charges agricoles ainsi que dans toutes les contraintes techniques (i.e., module agronomique et module lié à l'alimentation animale). L'activité  $X_{pgdl}$  est uniquement utilisée pour l'introduction des paiements découplés dans la fonction objectif. La ligne "GDU" représente la contrainte d'"exclusion" sur les variables binaires  $I_{gdlg}$  et  $I_{gdh}$ . Si  $I_{gdlg} = 1$ , les agriculteurs reçoivent des paiements pour la totalité de leur surface tandis que si  $I_{gdh} = 1$  ils n'exercent pas la totalité de leurs droits à paiements. Les lignes "GDL" sont les 6 autres contraintes introduites pour la mise en place de la réforme de Luxembourg dans

---

<sup>3</sup>Le budget du FEOGA-G s'élève à 43 214 M€ en 2002, et à 30 781 M€ quand on ne considère que les "activités AROPAj". Dans AROPAj, ce budget est estimé à 27 249 M€ (88,5%).

le modèle. L'agriculteur reçoit des paiements pour la jachère (droit à paiement unique jachère  $psgel$  par ha). Pour l'ensemble des terres mises sous jachère, ce paiement ne peut dépasser un certain montant, calculé sur des bases historiques (contrainte  $GDL_4$  et montant  $reffin$ ). Si la surface en jachère est au moins aussi grande que la jachère historique, l'agriculteur reçoit des paiements uniques pour ses autres surfaces (cas où  $I_{gdlg} = 1$ ). La contrainte  $GDL_5$  implique que la surface totale ( $SAU$ ) est partagée entre les différentes activités de surface  $X_{nsa}$ ,  $X_{sgdl}$ ,  $X_{rgdl}$ , et  $X_{pgdl}$ . Pour l'Allemagne, il y a 3 types de paiements uniques à l'hectare, de sorte que la terre doit être répartie sur 3 activités : la jachère, les terres arables et la prairie. Les paiements uniques à l'hectare sont notés respectivement  $psgel$ ,  $psrta$ , and  $psrpa$ . Pour les autres États Membres,  $psrpa = psrta = 0$ .

D'autres aspects de la réforme de Luxembourg aurait pu être introduits dans la modélisation mais ils auraient pu masquer certains résultats et obscurcir les principaux impacts de la réforme. C'est la raison principale qui nous a conduit à ne pas introduire la modulation<sup>4</sup> dans AROPAj. Pour une meilleure compréhension des résultats présentés dans la troisième partie de ce chapitre, il doit être précisé qu'il est possible de laisser le nombre d'animaux varier dans un intervalle de 15% autour du nombre initial d'animaux de chacune des catégories animales à caractère structurel (nombre de places pour l'élevage des porcs, nombre de vaches laitières, ...).

	$X_{nsa}$	$X_{pas}$	$X_{sgdl}$	$X_{rgdl}$	$X_{pgdl}$	$I_{gdlg}$	$I_{gdh}$	$ZF$	
<i>OBJ</i>	psgel			psngl+psrta	psngl+psrpa				
<i>GDL<sub>1</sub></i>	-1					refarea			$\leq 0$
<i>GDL<sub>2</sub></i>			1				-99999		$\leq 0$
<i>GDL<sub>3</sub></i>				1	1	-99999			$\leq 0$
<i>GDL<sub>4</sub></i>	1							-reffin	$\leq 0$
<i>GDL<sub>5</sub></i>	1		1	1	1			-SAU	$\leq 0$
<i>GDL<sub>6</sub></i>		-1			1				$\leq 0$
<i>GDU</i>						1	1		$= 1$

TAB. 2.2 – Introduction technique du découplage et des nouvelles contraintes dans AROPAj ( $ZF$  doit se lire comme le vecteur à  $m$  dimensions des paramètres).

## 2.3 Résultats

### 2.3.1 Scénarios

Le modèle AROPAj doit être utilisé deux fois pour prendre en compte le découplage. La première fois permet de calculer la position de référence, celle de l'Agenda 2000. Pour cette période de référence, sont calculés les montants historiques d'aides allouées aux agriculteurs. En d'autres termes, les premiers résultats nous permettent de calculer les paiements uniques individuels ou régionaux qui seront effectués lors de la mise en place

<sup>4</sup>La modulation des aides consiste à prélever un certain pourcentage (5% dans un premier temps) du montant total des subvention au delà de 5000 €. Ce dispositif permet de transférer une partie des aides du premier pilier vers le développement rural, deuxième pilier.

EM	aides COP	supp. blé dur	supp. prot.	ovins/caprins	PMTVA	PSB	PAB (veaux)	PAB (autres)
Belgique	0	0	0	0	1	0	1	0
Danemark	0	0	0	0.5	0	0.75	0	0
Allemagne	0	0	0	0	0	0	0	0
Grèce	0	0	0	0	0	0	0	0
Espagne	0.25	1	0	0.5	1	0	1	0.4
France	0.25	1	1	0.5	1	0	1	0.4
Royaume-Uni	0	0	0	0	0	0	0	0
Irlande	0	0	0	0	0	0	0	0
Italie	0	0	0	0	0	0	0	0
Luxembourg	0	0	0	0	0	0	0	0
Pays-Bas	0	0	0	0	0	0	1	1
Autriche	0	0	0	0	1	0	1	0.4
Portugal	0	1	0	0.5	1	0	1	0.4
Finlande	0	0	0	0.5	0	0.75	0	0
Suède	0	0	0	0	0	0.75	0	0

TAB. 2.3 – Taux de recouplage des aides selon les États Membres et les aides (AROPA)

d'une politique de découplage. Les utilisations suivantes du modèle se fondent sur ces résultats pour évaluer les effets des scénarios de réformes sur les productions et les revenus.

Quatre scénarios ont été utilisés avec le modèle AROPAj. D'abord, un scénario reprenant aussi précisément que possible les termes de la réforme de Luxembourg et prenant en compte les choix nationaux de chaque État Membre (scénario Luxembourg). Un deuxième scénario correspond à une politique de découplage total, où la prime est "unique" à l'échelle de la ferme-type, quelque soit la façon dont les terres sont utilisées (scénario "Full Decoupling"). Cette prime unique peut être définie soit à l'échelle de la ferme-type, soit à l'échelle de la région, soit encore à l'échelle nationale ou européenne. Le niveau de la prime est calculé de sorte que le budget d'aides est constant, à l'échelle désirée. Les résultats présentés ici considèrent que la prime a été calculée à l'échelle régionale. Le budget FEOGA est donc constant pour chaque région RICA, par rapport à la situation "Agenda 2000" (Labonne & Jayet 2005). Un troisième scénario émane du couplage entre AROPAj et le modèle PEATSIM, un modèle d'équilibre partiel. Ce couplage permet de prendre en compte l'impact de la réforme sur les prix européens, et de les utiliser dans AROPAj. Le tableau 2.4 montre les variations sur les prix induites par ce couplage. Un quatrième scénario est construit en utilisant les prix modélisés par ESIM (European Simulation Model), un autre modèle d'équilibre partiel. Les variations de prix diffèrent de celles issues du couplage entre AROPAj et PEATSIM en particulier car plus de produits agricoles sont pris en compte. Les variations de prix sont également présentées dans le tableau 2.4.

Produit	Variation de prix (en %)	
	LX15ESIM	LX15PEAT
Blé tendre	4.0	3.5
Blé dur	9.6	3.5
Orge	5.8	2.3
Maïs	5.6	2.7
Seigle	0.0	2.3
Autres céréales	5.7	2.3
Riz	0.0	2.6
Sucre	2.6	
Pommes de terre	6.0	
Soja	0.0	1.3
Colza	2.5	6.8
Tournesol	2.2	5.0
Aliment concentré	-0.2	
Aliment grossier	-17.0	
Lait	-3.8	
Bœuf	9.6	
Ovin	27.0	
Porc	2.0	
Volaille	1.9	
Œufs	2.0	

TAB. 2.4 – Variation des prix européens résultant du couplage entre AROPAj et les modèles d'équilibre partiel PEATSIM et ESIM.

Parallèlement, chaque scénario peut être différencié selon le niveau d’ajustement du capital animal autorisé. Deux niveaux différents ont été mis en œuvre dans le modèle : 0% et 15%. Ce taux définit la possibilité pour les exploitants de modifier leur capital animal. Il s’applique à l’effectif des catégories animales précisées plus haut (voir chapitre 1).

La comparaison des scénarios deux à deux permet d’évaluer trois effets. L’effet de l’ajustement du capital animal est mesuré quand on considère deux scénarios caractérisés par une même politique agricole mais des niveaux d’ajustement différents (soit 0% et 15%). L’effet de changement de politique est mesuré quand on compare deux politiques agricoles différentes parmi l’Agenda 2000, la réforme de Luxembourg et un découplage total, les prix étant identiques tout comme le niveau d’ajustement du capital animal. L’effet de variation des prix enfin est mesuré en comparant les scénarios caractérisés par une même politique agricole (ici la réforme de Luxembourg) mais avec des jeux de prix différents (simulés à l’aide du modèle PEATSIM ou extraits du modèle ESIM). Le tableau 2.5 résume les scénarios qui seront comparés par la suite.

Afin de lire plus facilement les tableaux présentés par la suite, on note les scénarios “Agenda 2000”, “réforme de Luxembourg”, “Full decoupling”, “réforme de Luxembourg couplée avec le modèle d’équilibre partiel PEATSim” et “réforme de Luxembourg couplée avec le modèle d’équilibre partiel ESIM” respectivement *AG*, *LX*, *FD*, *PS* et *ES*. Ce label est suivi respectivement de 00 ou 15, selon qu’il n’y a pas d’ajustement du capital animal ou que ce dernier est autorisé à varier dans un intervalle de  $\pm 15\%$  par rapport au capital de référence.

Effet à mesurer	Scénarios à comparer
Effet ajustement	AG00 et AG15
Effet PAC (réforme de Luxembourg)	LX15 et AG15 LX00 et AG00
Effet PAC (Full decoupling)	FD15 et AG15
Effet prix	PS15 et LX15 ES15 et LX15

TAB. 2.5 – Évaluation des effets et scénarios à comparer

### 2.3.2 Impact sur les marges brutes

L’impact le plus attendu de la réforme concerne les marges brutes (tableau 2.6). Tout comme les études théoriques, AROPAj montre que le découplage s’accompagne d’une augmentation des revenus agricoles. Cependant, le lecteur remarquera que le budget de la PAC est légèrement modifié quand la réforme de Luxembourg est mise en œuvre. Ceci s’explique par la mise en place en Allemagne d’incitations pour les prairies (paiement unique spécifique pour ces surfaces), qui dans la réalité, sont soumises à un plafond, mais dans le modèle ne sont pas limitées. Il faut donc prendre en compte la variation à la fois de la marge brute et du budget européen pour évaluer précisément l’impact d’une réforme de la PAC. Le bénéfice social réel estimé par le modèle – toutes choses

égales par ailleurs – est égal à l’augmentation de la marge diminuée de l’augmentation du budget PAC, c’est-à-dire la somme des gains du contribuable et des exploitants agricoles. Cela signifie que le bénéfice social net serait de 943 M€ et 2,024 M€ selon le scénario politique (respectivement la réforme de Luxembourg et le scénario “full decoupling”, avec ajustement du capital animal).

Les différents effets peuvent être ordonnés selon les scénarios. Le tableau 2.6 montre que l’effet le plus important est celui de l’ajustement animal (+5,609 M €), suivi de l’effet politique (entre + 866 and +2,024 M€), et ensuite de l’effet prix (+680 M€and +3132 M€).

En ce qui concerne l’effet politique, comme attendu d’après les analyses théoriques, la marge brute des agriculteurs augmente avec le découplage. Un des objectifs de la réforme était d’améliorer l’efficacité économique de la PAC en augmentant les revenus agricoles sans augmenter le poids sur les contribuables. Il est intéressant de noter que l’effet prix améliore encore ce résultat. Quand AROPAj est couplé à PEATSIM (scénario PS15), les prix européens sont modifiés du fait de la réforme, et en réponse, les résultats AROPAj changent. Concernant les marges, l’effet prix tel qu’il est mesuré par PEATSIM renforce leur augmentation. Quand on utilise les prix simulés par ESIM (scénario ES15), le gain net est encore plus important. Dans ce scénario, les prix des produits sont en effet nettement plus élevés que ceux simulés avec PEATSIM. Nous avons également comparé les impacts de la réforme de Luxembourg à ceux d’un scénario “full decoupling” avec une prime unique régionale. Un découplage total s’accompagnerait de bénéfices encore plus élevés pour les agriculteurs et des dépenses budgétaires plus faibles, ce qui est tout à fait en accord avec les études théoriques sur la question.

Scénarios	Marge brute	FEOGA	Gain net
AG00	85093	27249	-
AG15 - AG00	+5704	+95	+5609
LX00 - AG00	+1350	+484	+866
LX15 - AG15	+1223	+280	+943
FD15 - AG15	+1929	-95	+2024
PS15 - LX15	+679	-1	+680
ES15 - LX15	+3146	+13	+3132

TAB. 2.6 – Variations des marges et du FEOGA (en millions €)

Le tableau 2.7 montre que les États Membres où la production animale joue un rôle important (e.g., Belgique, Danemark) sont, conformément à l’intuition, particulièrement sensibles à l’ajustement du capital animal. Pour ce secteur, certains pays affichent une perte avec la réforme de Luxembourg. Le montant des aides qu’ils reçoivent diminue entre les scénarios *LX15* et *AG15* ou *FD15* et *AG15* car les aides des scénarios *LX15* et *FD15* sont calculées sur la base du scénario *AG00*. En Allemagne, la régionalisation qui permet une prime distincte pour les prairies induit un niveau d’aides plus élevé, ce qui à son tour induit une plus grande hausse de la marge. La Grèce est un cas particulier ; en effet, dans le modèle, cet État Membre reçoit une aide à l’hectare très

## 2.3. Résultats

	marge brute			aides		
	AG15-AG00	LX15-AG15	FD15-AG15	AG15-AG00	LX15-AG15	FD15-AG15
Belgique	32.2%	1.1%	4.3%	-3.5%	0.0%	3.7%
Danemark	12.7%	0.6%	2.7%	-0.4%	0.4%	0.4%
Allemagne	3.5%	5.4%	1.9%	0.3%	15.6%	-0.3%
Grèce	6.7%	-1.3%	-1.2%	7.1%	-6.7%	-6.7%
Espagne	9.9%	-0.3%	2.1%	1.2%	-2.3%	-1.1%
France	6.2%	0.1%	4.0%	-0.8%	-3.3%	0.8%
Royaume-Uni	7.0%	1.7%	2.7%	0.1%	-0.1%	-0.1%
Irlande	9.0%	0.5%	0.9%	3.6%	-3.4%	-3.4%
Italie	8.9%	0.4%	0.9%	0.6%	-0.6%	-0.6%
Luxembourg	4.8%	2.8%	4.3%	-0.9%	0.9%	0.9%
Pays-Bas	4.4%	0.4%	0.5%	-0.1%	-0.1%	0.2%
Autriche	4.2%	1.0%	2.3%	-0.2%	-0.6%	0.2%
Portugal	4.3%	1.6%	4.1%	0.4%	-1.5%	-0.4%
Finlande	2.0%	0.1%	0.6%	2.3%	-2.1%	-2.2%
Suède	4.1%	1.6%	2.9%	1.9%	-1.6%	-1.9%
Europe	6.7%	1.3%	2.1%	0.3%	1.0%	-0.3%

TAB. 2.7 – Variations des marges brutes et des aides, par hectare et par État Membre

importante (636€ à comparer à une moyenne européenne de 311€, alors même qu'une culture fortement subventionnée comme le coton n'est pas encore prise en compte dans le modèle AROPAj).

### 2.3.3 Changement d'usage des terres

Un des impacts les plus intéressants à étudier est celui concernant le changement d'usage des sols. Le tableau 2.8 présente les modifications de surface par production pour l'Europe des 15 dans son ensemble. Dans le scénario de la réforme de Luxembourg, la jachère est stable, comme cela était attendu. Les incitations de la PAC jouent leur rôle. Les agriculteurs maintiennent la jachère afin de percevoir les aides découplées. L'impact le plus fort à travers l'Europe est une diminution des terres arables pour la prairie. Ceci est en accord avec d'autres évaluations du découplage. Cependant, dans notre étude, les surfaces dédiées auparavant aux fourrages diminuent également au profit de la prairie.

	céréales	oléoprotéagineux	cultures indus.	jachère	fourrage	prairies	friche
AG00	36598	4303	4876	6440	10867	22367	2082
AG15 - AG00	-50	+6	+33	+36	-37	-30	+41
LX00 - AG00	-3105	-518	+216	-133	-1295	+4001	+833
LX15 - AG15	-3092	-506	+216	-169	-1301	+4070	+782
FD15 - AG15	-2969	-89	+309	-6306	-1944	+5464	+5536
PS15 - LX15	+72	+75	-28	0	-121	-105	+107
ES15 - LX15	+517	-8	+31	0	-303	-657	+419

TAB. 2.8 – Utilisation des terres et changements selon le scénario politique (en milliers d'ha)

Du fait de la réforme, l'intérêt relatif des agriculteurs pour les cultures diminue. La diminution des aides COP accroît la rentabilité relative des fourrages et des prairies. Cependant, puisque les aides directes animales diminuent également, l'utilisation des fourrages devient moins rentable. Les animaux sont donc préférentiellement nourris sur les prairies plutôt qu'à partir de fourrages, plus coûteux. Le scénario "full decoupling" renforce cette tendance, avec en plus une disparition de la jachère au profit de la friche.

Dans les scénarios utilisant les modèles PEATSIM et ESIM, ces mêmes résultats sont légèrement atténués. L'effet prix joue ici un rôle de régulateur. En effet, quand les productions européennes augmentent, les prix diminuent ce qui provoque en réponse une diminution des productions associées. Quand le cheptel animal peut varier ( $\pm 15\%$ ), ces tendances sont plutôt renforcées (moins de terres arables, moins de fourrages et plus de prairies).

Il est également possible de comparer les scénarios à l'aide d'un critère pour mesurer la disparité induite par la nouvelle PAC sur l'utilisation des terres. Nous avons estimé cette disparité à partir de l'index  $I$  calculé selon l'équation 2.1 :

$$I(CAP1/CAP2) = \sum_{MS} \sum_{a \in \text{land uses}} \left( \frac{S_{aCAP2} - S_{aCAP1}}{UAA_{MS}} \right)^2 \quad (2.1)$$

où  $MS$  représente chaque État Membre,  $a$  un type d'usage des terres (parmi les usages suivants : céréales, oléoprotéagineux, cultures industrielles, jachère, fourrages, prairies, ou friche),  $S_{aCAPi}$  représente la surface allouée à l'usage  $a$  avec la PAC  $i$ , et  $UAA_{MS}$  la surface agricole utile de l'État Membre  $MS$ . Le tableau 2.9 montre que les changements sont plus importants dans le scénario "full decoupling" que dans le scénario Luxembourg.

	I
AG15-AG00	16
LX15-AG15	1830
FD15-AG15	4103

TAB. 2.9 – Valeur de l'indice mesurant la disparité dans l'usage de terres suite à l'application d'une nouvelle PAC.

### 2.3.4 Productions

Initialement, l'objectif premier de la PAC était d'assurer l'autosuffisance alimentaire de l'Europe. Cet objectif n'est plus à l'ordre du jour. Cependant, pour certains politiques, cet objectif devrait encore être celui du premier pilier de la PAC. Dans le scénario Luxembourg inséré dans le modèle AROPAj, seuls les aspects relatifs au premier pilier ont été considérés. De ce point de vue, le tableau 2.10 présente les variations de production pour l'UE15 dans son ensemble. Globalement, les productions vendues diminuent et cela peut être perçu comme une conséquence désagréable de la réforme par certains politiques. Cependant, quand le rôle du marché et le retour des prix sont pris en compte, ces tendances sont atténuées.

### 2.3. Résultats

	céréales	oléagineux	pommes de terre	betterave	protéagineux
AG00	156643	11112	80570	122909	645
AG15 - AG00	+2443	+17	+572	+604	-1
LX00 - AG00	-5688	-1412	+547	+15473	+185
LX15 - AG15	-5413	-1371	+585	+15354	+186
FD15 - AG15	-1491	-550	+113	+22278	+209
PS15 - LX15	+838	+214	-831	-410	-12
ES15 - LX15	+3524	-25	+1974	-4398	-15

TAB. 2.10 – Productions vendues (en milliers de tonnes)

Plus particulièrement, dans le scénario Luxembourg, la production de céréales baisse comme celle des oléagineux. La hausse de la production de betterave à sucre est essentiellement du fait d’une hausse de la surface allouée pour la betterave C.

Tandis que les surfaces en céréales sont assez proches dans les scénarios *LX15* et *FD15*, les productions vendues sont très différentes. Dans la mesure où les quantités vendues dans le scénario *FD15* reflètent celles d’un marché moins sujet aux distorsions, elles sont la référence pour mesurer les distorsions introduites par une politique comme la réforme de Luxembourg. De ce point de vue, par rapport à cette référence, le scénario *AG15* induit une “sur-production” tandis que le scénario *LX15* induit une “sous-production”.

Quand on compare ici les différents effets (prix, politique et ajustement animal), c’est l’effet politique qui est le plus fort par rapport à l’effet ajustement animal. L’effet prix agit comme un retour de balancier en atténuant en général les effets de la réforme de Luxembourg (sauf pour la pomme de terre et dans une moindre mesure les oléagineux quand les prix sont extraits d’ESIM).

	blé dur	blé tendre	orge	autres céréales
AG00	1033	14683	10244	2521
AG15 - AG00	24	-1322	-515	-239
LX00 - AG00	-331	-2396	-2455	-588
LX15 - AG15	-372	-2162	-2655	-556
FD15 - AG15	-479	-2869	-2872	-566
PS15 - LX15	-42	-281	139	3
ES15 - LX15	-317	-138	-82	-303

TAB. 2.11 – Consommations sur l’exploitation et variations selon le scénario (en milliers de tonnes).

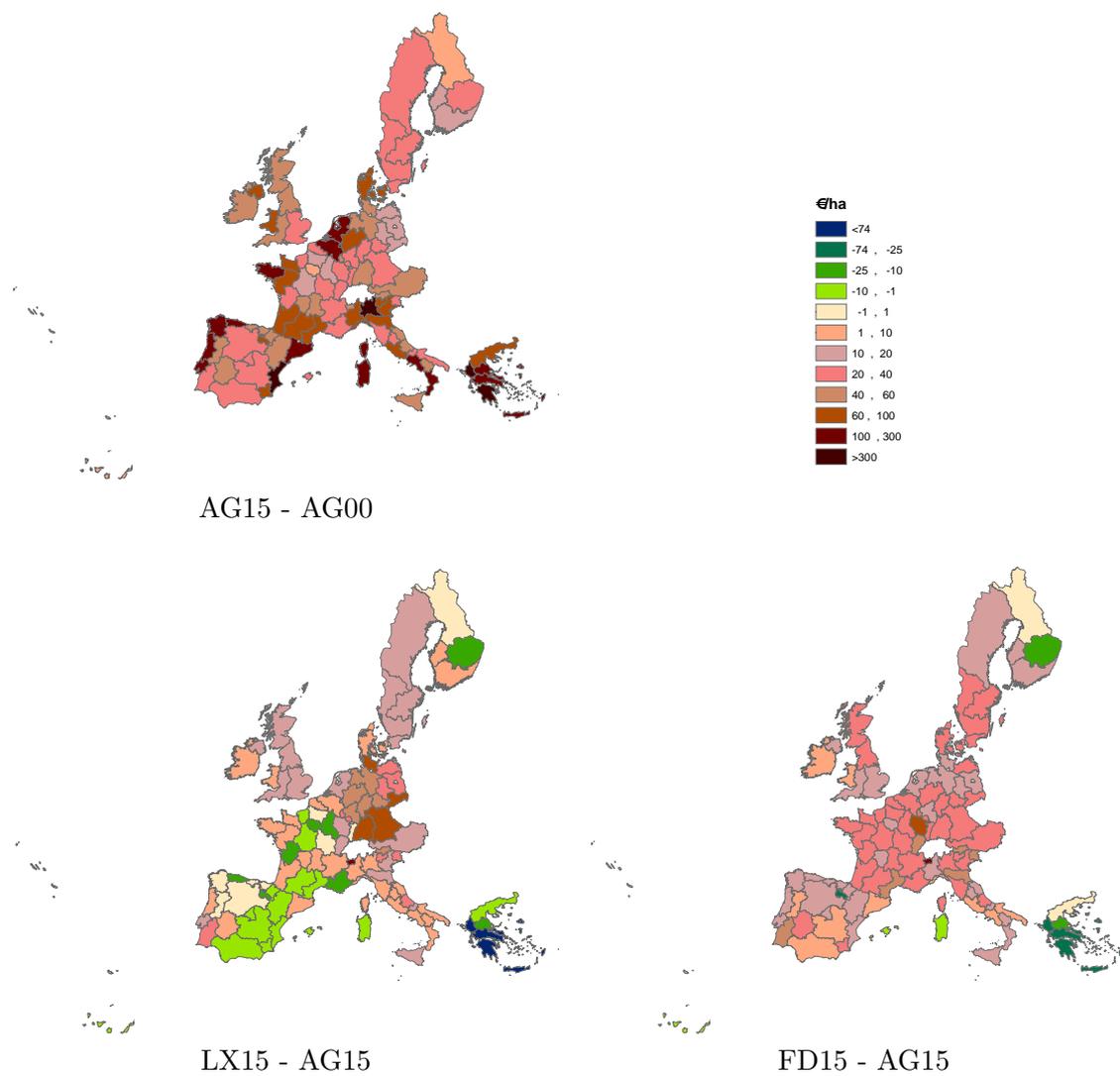
La mise en place de la réforme de Luxembourg engendre une baisse de la consommation sur l’exploitation des productions (par rapport à la situation de référence, le scénario Agenda 2000, tableau 2.11). Cette baisse est légèrement renforcée quand il y a ajustement du capital animal. Ce résultat est lié à l’augmentation de la surface allouée aux prairies. Les animaux sont nourris sur les prairies plutôt que sur les productions de l’exploitation.

### 2.3.5 Une approche détaillée à l'échelle des régions

Le modèle AROPAj est basé sur des fermes-types définies à un niveau régional (on entend ici par région la région RICA). Ceci permet d'analyser la diversité des impacts à différentes échelles spatiales ainsi que de prendre en compte la géographie des régions. Dans ce paragraphe, nous allons nous concentrer sur l'effet ajustement animal d'une part et l'effet PAC d'autre part (et oublier l'effet prix).

Avant tous les autres effets, la marge brute agricole est d'abord sensible à l'effet ajustement animal (voir les cartes figure 2.1). La hausse attendue de la marge (du fait d'une maximisation d'un même objectif sous des contraintes moins serrées) est évidemment plus importante dans les régions où les productions animales jouent un rôle prépondérant (+286€/ha<sup>-1</sup> en "Cataluna", +232€/ha<sup>-1</sup> en "Campania", +172€/ha<sup>-1</sup> en "Belgium", +155€/ha<sup>-1</sup> en "Netherlands", +121€/ha<sup>-1</sup> en "Bretagne" quand on compare les scénarios *AG15* et *AG00*). Cette hausse est atténuée quand la PAC est réformée. La mise en place de la réforme de Luxembourg s'accompagne de pertes dans plusieurs régions en France, en Espagne et en Grèce. Ces pertes sont aux montants des aides PAC qui ne sont pas les mêmes entre les scénarios *LX15* et *FD15* d'une part et *AG15* d'autre part (les scénarios *LX15* et *FD15* ont le même budget d'aides que le scénario *AG00* mais un budget plus faible que le scénario *AG15*, la comparaison des scénarios *LX15* et *FD15* au scénario *AG00* met en valeur un gain associé aux réformes). La hausse de marge est plus importante en Allemagne, en lien direct avec les incitations à la prairie que notre modélisation de la réforme de Luxembourg surestime. Le découplage total offrirait un avantage supplémentaire dans la plupart des régions sauf en Grèce (toujours pour des questions de budget PAC).

C'est sur l'allocation des terres que les changements de politique ont les effets les plus marqués (voir les cartes des figures 2.2-2.8). De façon générale, le découplage (total ou partiel) s'accompagne d'une diminution des surfaces dédiées aux céréales. La figure 2.2 montre que l'ajustement animal ne modifie que très peu les surfaces en céréales alors que les effets des politiques sont forts. Plus le degré de découplage est important, plus les surfaces en céréales diminuent. On peut analyser ce résultat en comparant les scénarios *FD15* et *LX15*, mais aussi en comparant les États Membres entre eux (chaque État appliquant un taux de découplage qui lui est propre). En Espagne et en France, où les aides recouplées sont très importantes, la diminution des surfaces en céréales est plus faible que dans les autres États Membres. Dans certaines régions très productives de France (i.e., "Ile de France" et "Picardie"), le modèle montre même une augmentation de la surface allouée aux céréales. Les figures 2.3 et 2.4 montrent que les surfaces allouées aux oléoprotéagineux ou aux cultures industrielles (pomme de terre, betterave) ne changent que très peu à l'échelle régionale. Comme on le voit sur la figure 2.5, les surfaces en fourrages diminuent globalement, et dans des proportions plus grandes avec le découplage total. Dans les régions où la surface en céréales diminue, les fourrages et les céréales sont remplacés par la prairie (figure 2.6). La jachère disparaît avec le découplage total tandis qu'elle reste stable dans le scénario Luxembourg (figures 2.7 et 2.8). Dans le scénario "full decoupling", la jachère est en grande partie remplacée par



---

FIG. 2.1 – Variation des marges par hectare selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15.

la friche. Mais les variations européennes masquent de fortes disparités régionales. Dans un grand nombre de régions productives, la jachère est remplacée par des cultures tandis que dans les régions les moins productives, la jachère mais aussi les terres auparavant cultivées font place à la friche. Cet effet n'existe pas avec le scénario Luxembourg, du fait d'une forte incitation à maintenir la jachère (pour recevoir les aides). Ce résultat est présenté sur la figure 2.9 où les régions bleues sont celles où la surface cultivée augmente et les régions rouges celles où elle diminue.

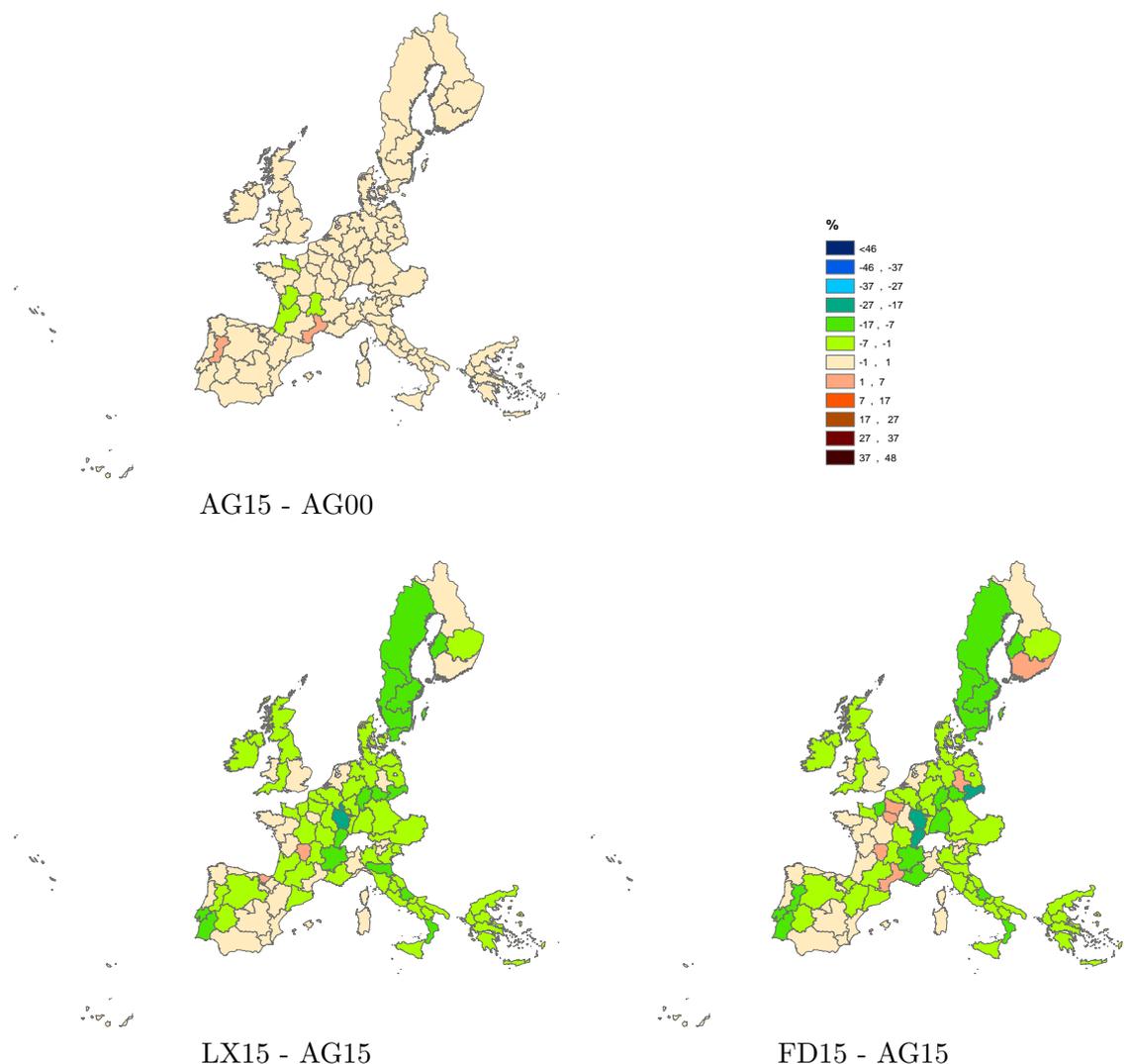


FIG. 2.2 – Variation des surfaces en céréales selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole de la région).

### 2.3.6 Impact sur les émissions de GES

Les impacts de la réforme politique sur les prix nets au producteur conduit les exploitants à modifier leur allocation des terres et leur demande de facteurs (tels que les engrais). Par conséquent, l'environnement au sens large – phénomène local ou global–

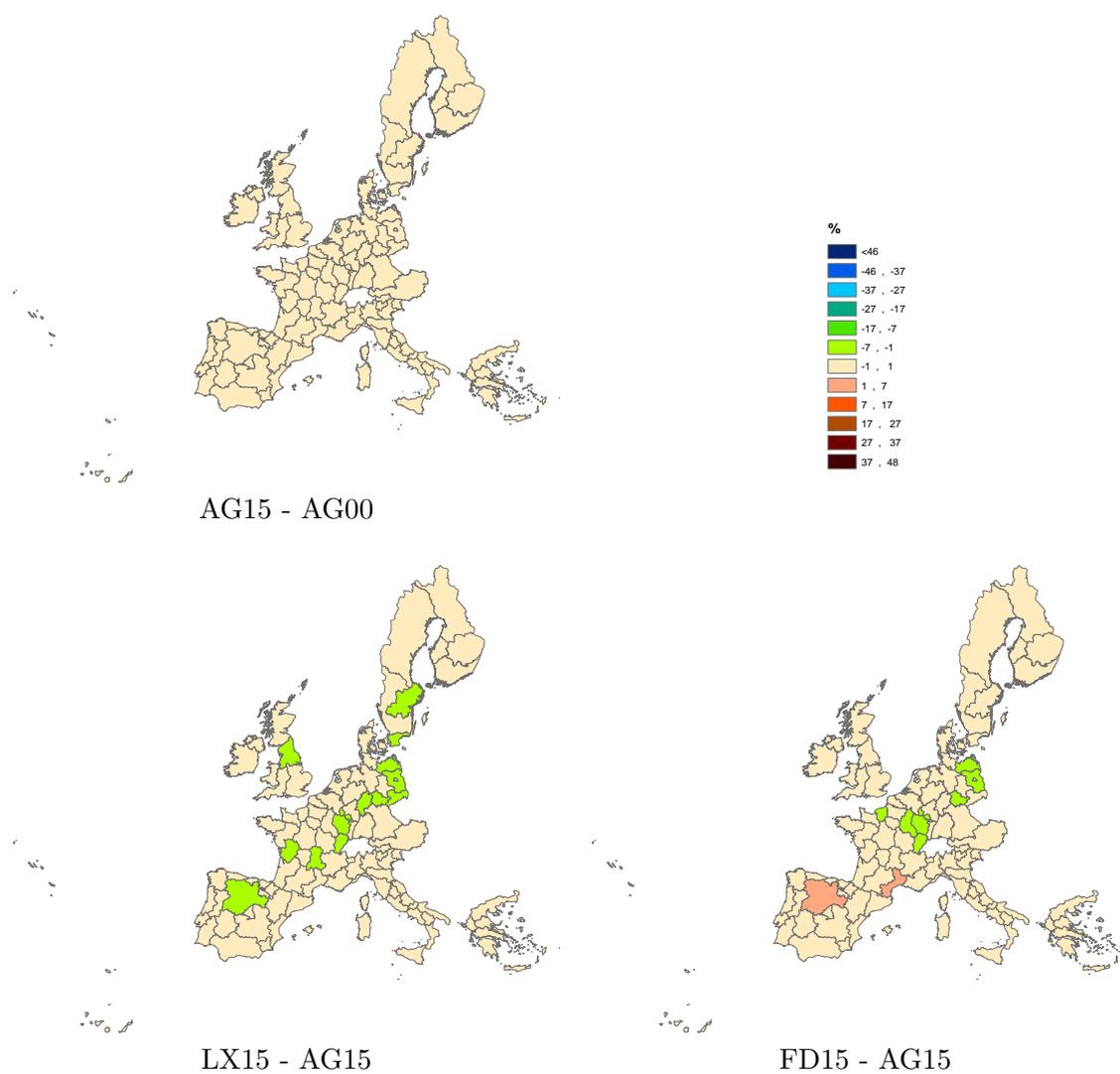


FIG. 2.3 – Variation des surfaces en oléoprotéagineux selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).

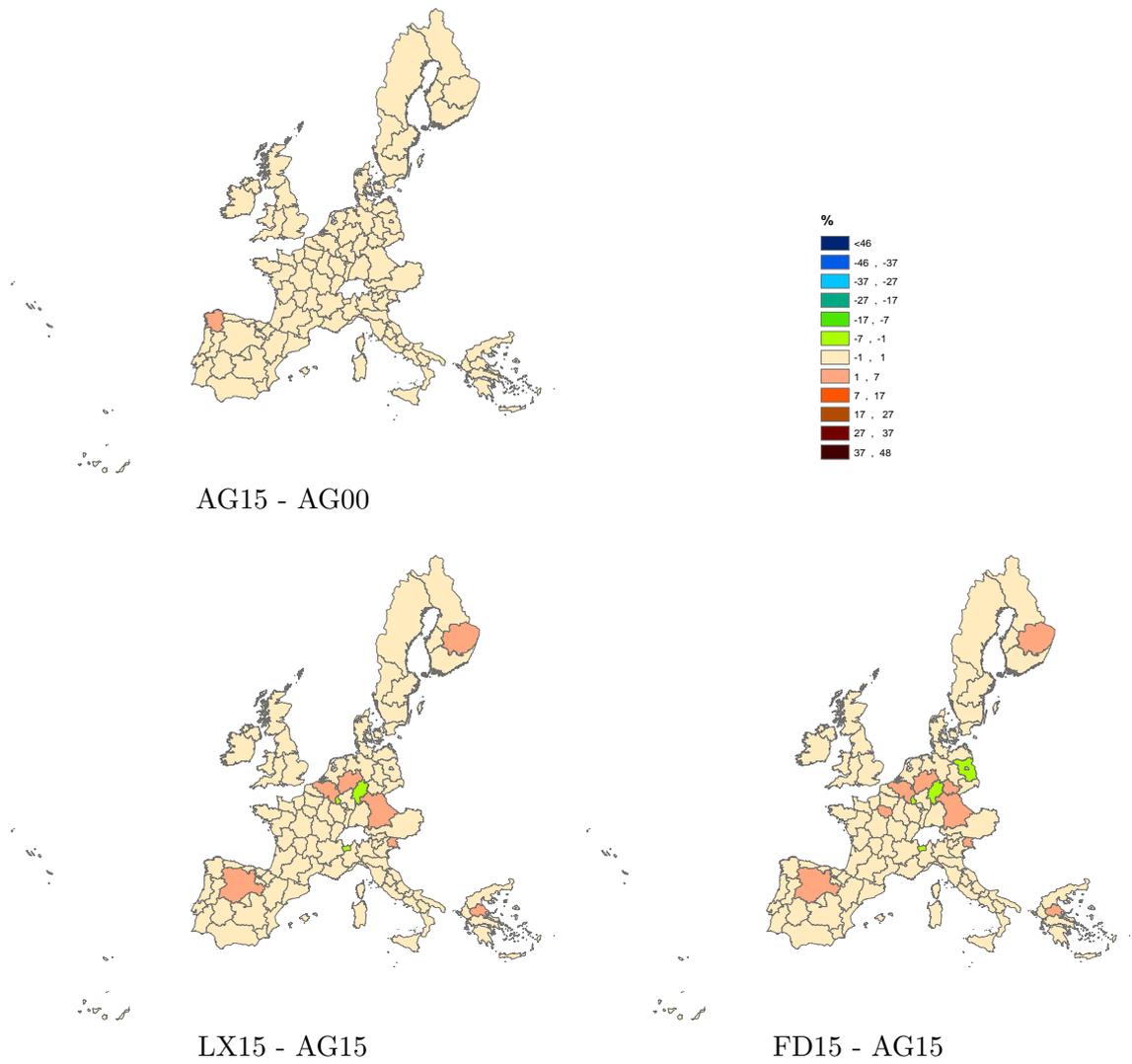
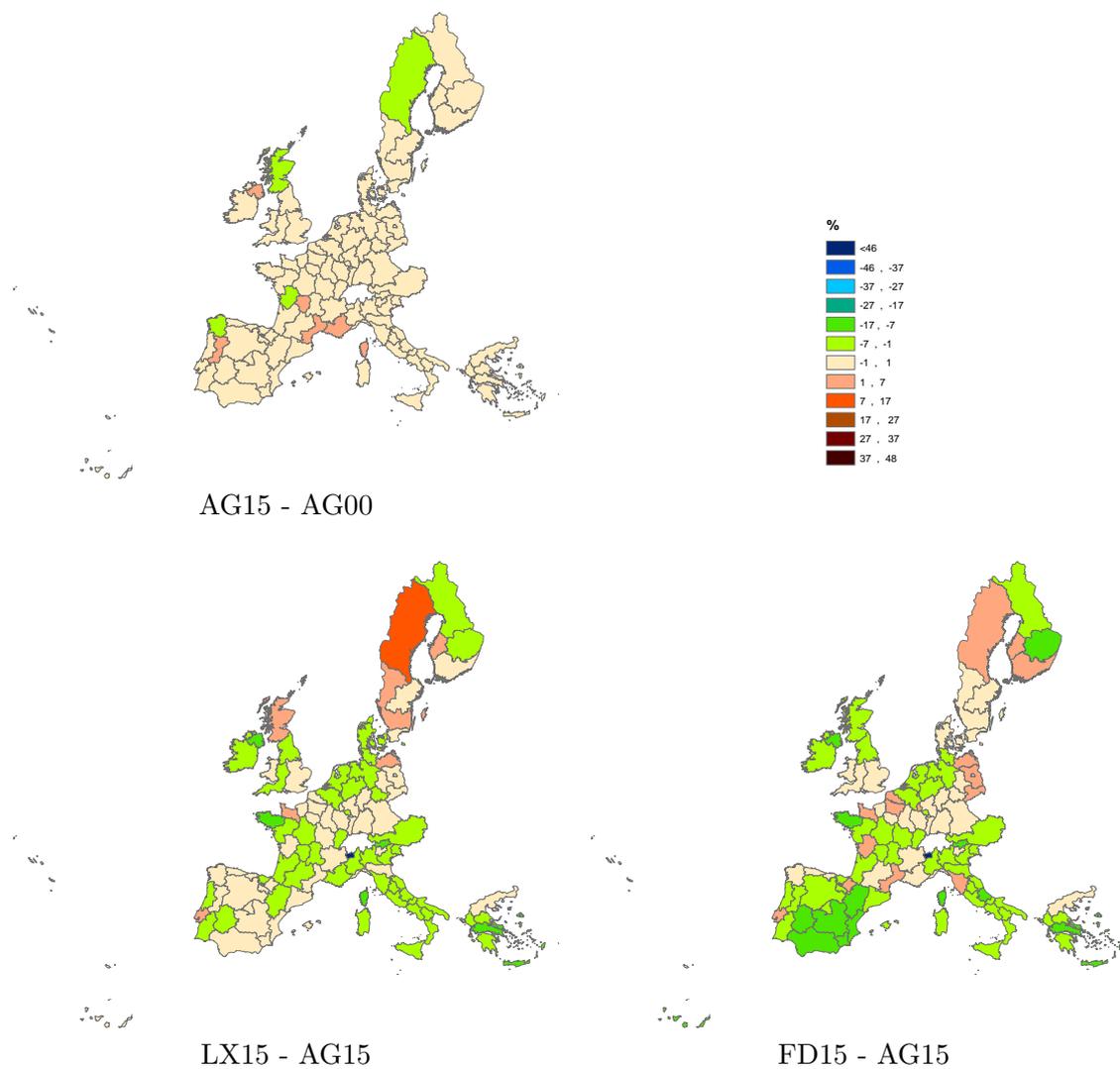


FIG. 2.4 – Variation des surfaces en pommes de terre et betterave selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).



---

FIG. 2.5 – Variation des surfaces en fourrage selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).

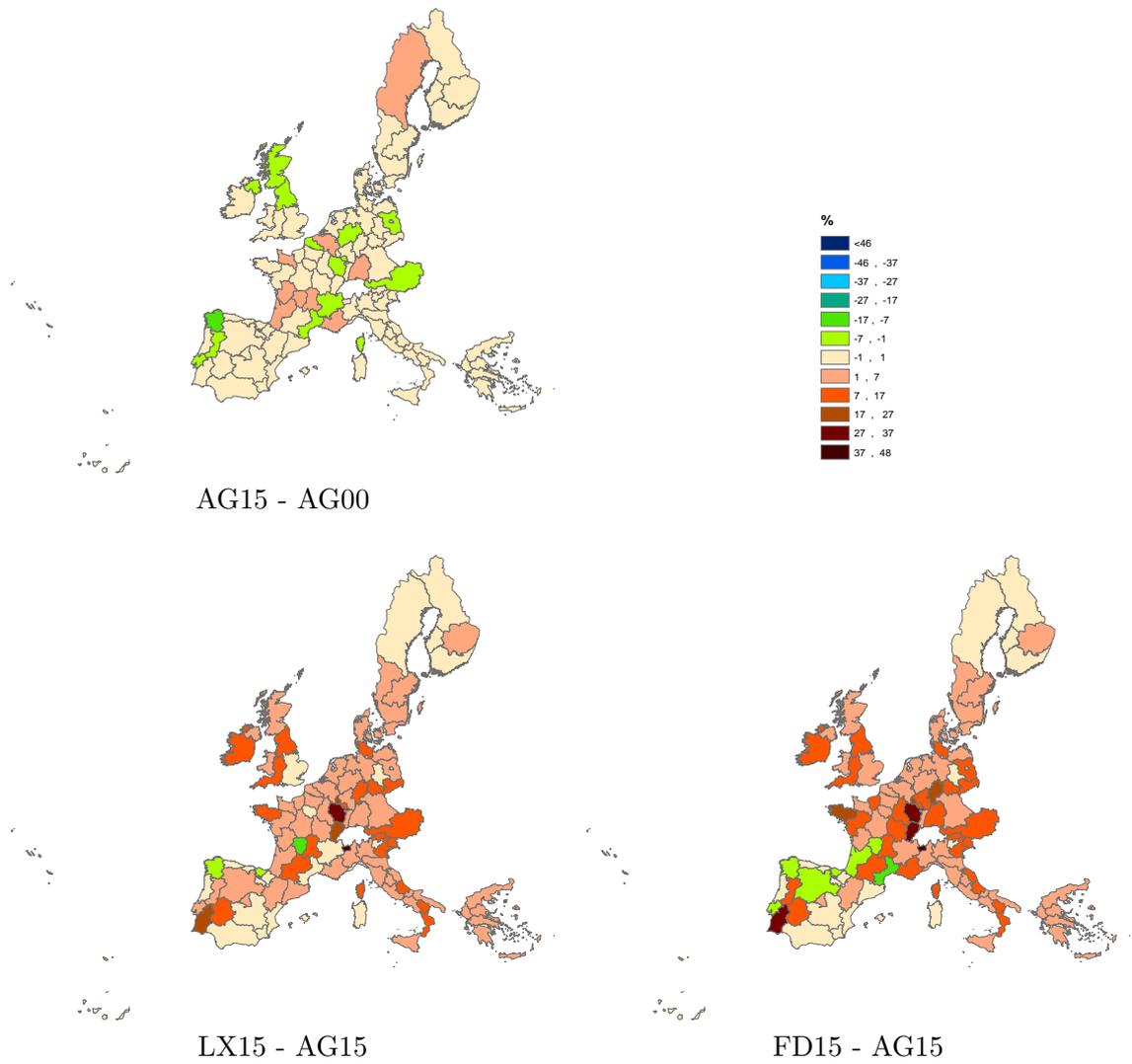


FIG. 2.6 – Variation des surfaces en prairies selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).

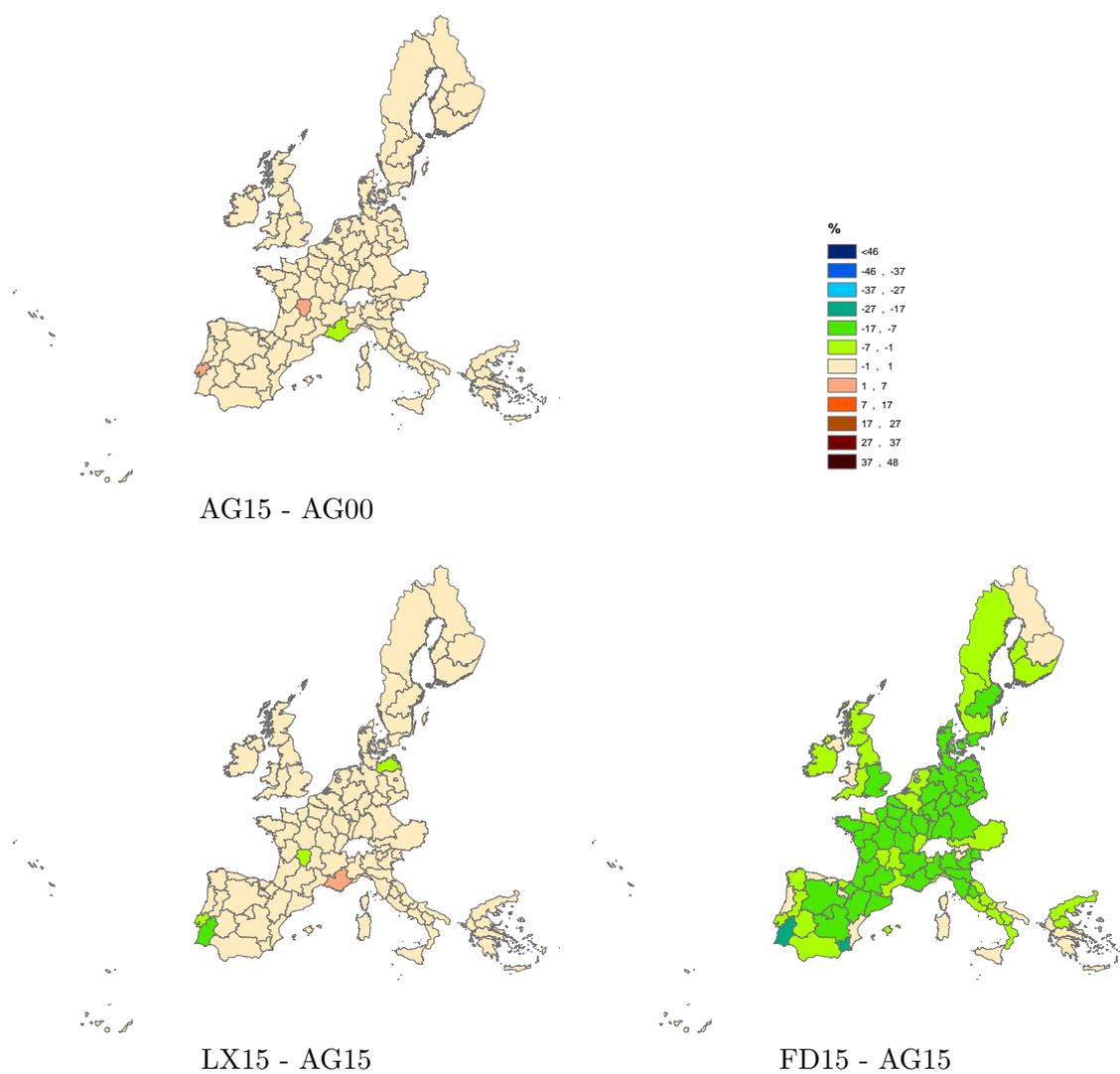


FIG. 2.7 – Variation des surfaces en jachère selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).

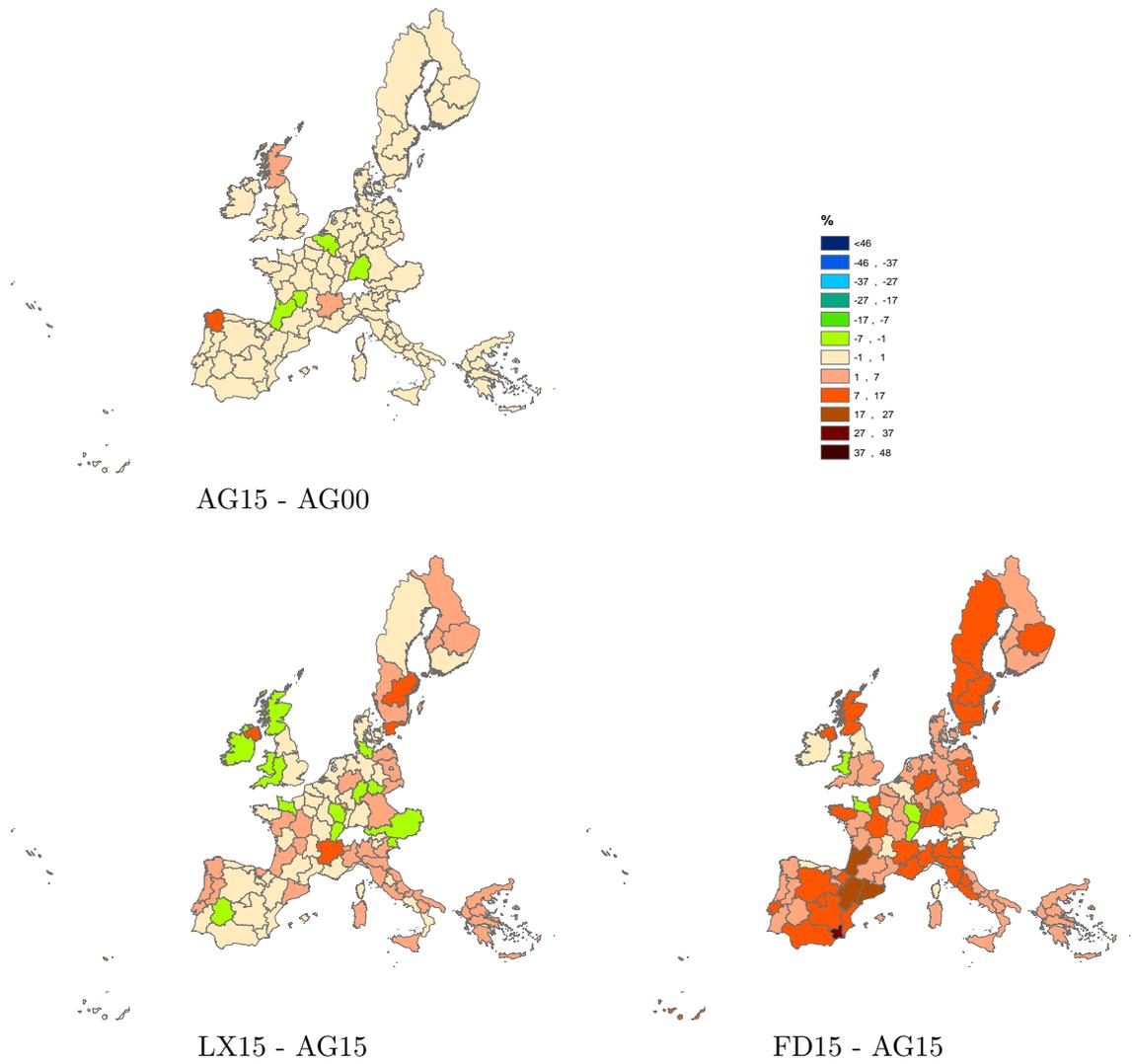


FIG. 2.8 – Variation des surfaces en friche selon les scénarios AG00, AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole régionale).

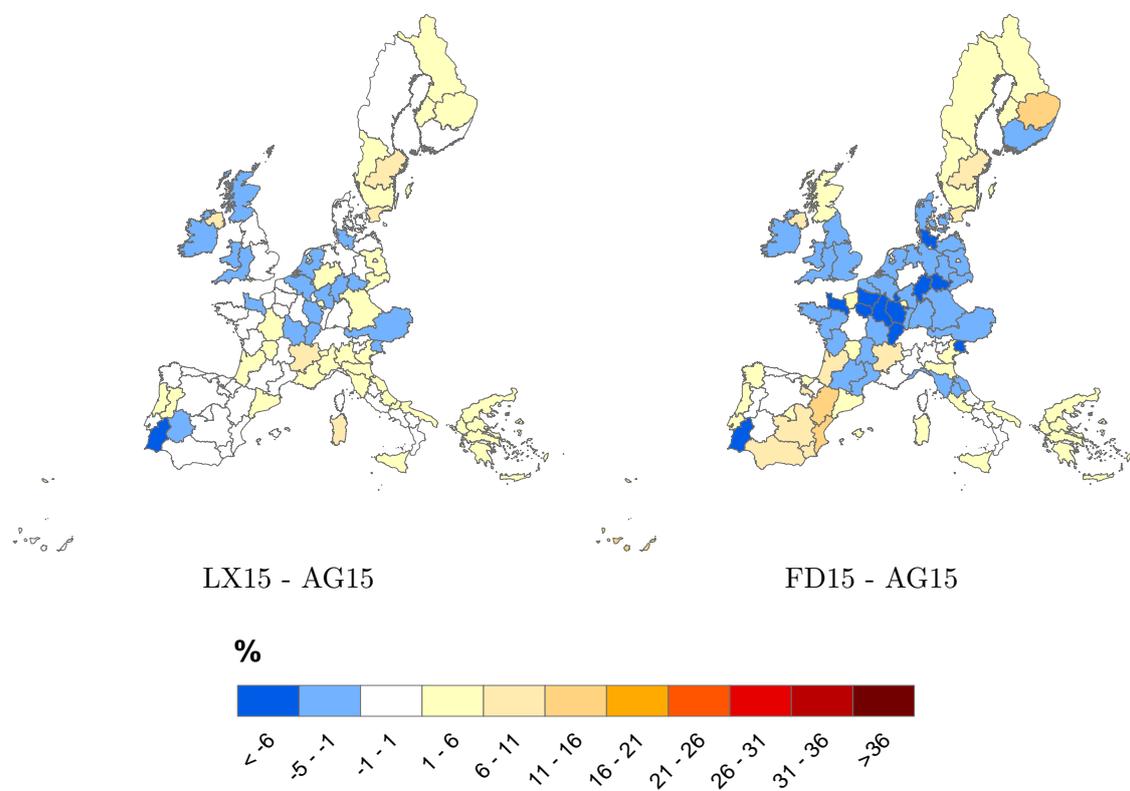


FIG. 2.9 – Variation des surfaces en jachère et en friche selon les scénarios AG15, LX15, et FD15 (en % de la surface agricole utile).

peut être fortement affecté par la réforme. Nous avons choisi de nous concentrer sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui ont été précédemment étudiées par De Cara et al. (2005).

Il faut noter d'abord que les réformes successives de la PAC ont conduit à une diminution des émissions de GES agricoles (ECCP 2006). La réforme de Luxembourg telle qu'elle a été introduite dans le modèle AROPAj pourrait encore renforcer légèrement cette diminution.

Il faut tout d'abord préciser que le modèle a été utilisé dans une configuration où les intrants azotés sont fixes pour une culture donnée et un groupe donné. Les variations d'émissions sont uniquement le fait d'une modification des surfaces, du nombre d'animaux ou de la façon dont ils sont nourris. L'effet d'ajustement est d'ailleurs le plus important. Une baisse des animaux (7%) a en effet un impact direct sur les émissions. Quand on introduit la réforme de Luxembourg dans le modèle, la baisse des émissions de GES est moins importante, et vient essentiellement des changements d'usage des terres (émissions de  $N_2O$ ). L'effet prix a des effets opposés selon le modèle utilisé. Avec le modèle PEATSIM, on observe seulement de faibles changements. Avec le modèle ESIM, la hausse des émissions en GES est très importante. Dans ce dernier cas, les prix des produits animaux s'élèvent ce qui tire vers le haut la production animale (+2.7% par rapport au scénario *LX15*), ce qui implique une hausse des émissions de  $CH_4$ . De plus, les productions végétales sont également mieux valorisées, les surfaces en céréales sont donc plus importantes ce qui augmente encore les émissions en  $N_2O$ .

	$N_2O$	$CH_4$	GHG
AG00	187747	165827	352344
AG15 - AG00	-3113	-8247	-10130
LX00 - AG00	-6090	1083	-3776
LX15 - AG15	-7042	1735	-5307
FD15 - AG15	-6040	3255	-2784
PS15 - LX15	102	-164	-62
ES15 - LX15	+4127	+3343	+7470

TAB. 2.12 – Émissions de GES et variations en milliers de  $tCO_2eq$

## Conclusion

Les résultats montrent que la réforme de Luxembourg remplit certains de ses objectifs, i.e., la nouvelle PAC est plus efficace en augmentant les revenus agricoles pour un même budget européen. De la même façon, à budget constant, un découplage total de la PAC serait encore plus efficace avec une hausse plus importante des marges brutes.

Le couplage entre AROPAj et le modèle d'équilibre partiel ESIM permet de prendre en compte les impacts sur les prix européens et mondiaux du fait du changement de politique agricole. De la même façon, PEATSIM a également été couplé à AROPAj. Ce couplage est plus restreint (moins de produits sont pris en compte) mais devrait

être développé par la suite. Les effets prix renforcent certains résultats et en atténuent d'autres tout en n'apportant pas de modifications fondamentales.

L'allocation des terres a retenu une grande part de notre attention. Quatre activités se détachent : (i) les cultures COP (céréales, oléo-protéagineux), (ii) les fourrages, (iii) les prairies, et (iv) la jachère et la friche. Des effets opposés peuvent être attendus du fait d'un transfert massif des aides vers la terre au lieu d'une combinaison mixte d'aides aux cultures et aux animaux. Au niveau européen, la surface dédiée aux cultures diminue avec la réforme de Luxembourg. Cet effet est légèrement atténué avec un découplage total. La baisse des surfaces en cultures est compensée par une augmentation des surfaces en prairies.

Les effets du renforcement du découplage sur les productions se distinguent de ce qui est évalué pour les surfaces. La diminution des productions avec le scénario Luxembourg est bien plus importante qu'avec le scénario de découplage total. Ceci s'explique par la politique sur la jachère combinée à des différences régionales de rentabilité des cultures. En d'autres termes, la comparaison des scénarios découplage total et Luxembourg soulève un paradoxe. Dans la mesure où on considère que les niveaux de productions vendues dans le scénario découplage total sont ceux d'un marché libre, ils peuvent servir de référence pour mesurer les distorsions induites par une politique sur les échanges. De ce point de vue, par rapport à cette référence, la politique de l'Agenda 2000 entraîne une "sur-production" tandis que la réforme de Luxembourg entraîne une "sous-production"

Notre étude montre que, dans le scénario Luxembourg, la surface en jachère (terres gelées) est maintenue du fait des contraintes de la réforme, mais elle disparaît dans le scénario "full decoupling". La friche (terres abandonnées) en revanche augmente très peu dans le scénario Luxembourg alors qu'elle augmente très fortement dans le scénario "full decoupling". A l'échelle européenne, il semble en moyenne qu'une activité se substitue à l'autre. Quand on se concentre sur une échelle plus fine (régionale), de nombreuses disparités entre les régions sont révélées. Avec une réforme de découplage total, des terres pourraient être laissées en friche dans les régions les moins productives. Parallèlement, dans les régions les plus productives, les terres auparavant en jachère pourraient être cultivées. Cela impliquerait une hausse de la production dans la mesure où, à l'échelle européenne, des terres à faibles rendements seraient remplacées par des terres à rendements élevés. En ce qui concerne les terres arables, les deux scénarios de découplage envisagés (Luxembourg et total) induiraient une baisse des surfaces en céréales et oléoprotéagineux. Les surfaces en fourrages baisseraient légèrement tandis que la surface en prairie augmenterait de façon significative. A nouveau, ces résultats européens masquent des disparités entre les États Membres et entre les régions.

Cependant, dans le contexte actuel mettant en avant les biocarburants, la terre devient une ressource rare et la jachère obligatoire pourrait disparaître dans les prochaines années. La réforme de Luxembourg semble en décalage par rapport à ce nouvel enjeu. De plus, limiter la production par la jachère est bienvenu dans le contexte de prix agricoles à la baisse (mais discutable du point de vue du consommateur). Cette

baisse des prix n'est cependant pas inéluctable.

En ce qui concerne les aspects environnementaux, la réforme de Luxembourg pourrait être considérée comme apportant un double dividende. D'après nos résultats, la stabilisation des aides permet à la fois une hausse des revenus des agriculteurs et une baisse des émissions de GES. Cependant, cette réduction des émissions de GES associée à la réforme peut soulever quelques questions. D'abord, on peut se demander dans quelle mesure l'Europe peut revendiquer ces réductions d'émissions, conséquence d'une réforme politique qui devait avoir lieu et non d'une politique environnementale spécifiquement dédiée à cet objectif. Même si d'autres pays ont pu bénéficier dans d'autres contextes de telles réductions fortuites (par exemple, l'air chaud russe), les signataires du protocole de Kyoto pourraient considérer que ces réductions d'émissions font partie du scénario de référence et ne pas les prendre en compte pour atteindre l'objectif de réduction assigné à l'Europe. En 2012, seront comptabilisées les émissions totales par rapport à 1990 et à ce titre l'agriculture aura fortuitement participé à l'effort européen. On peut s'inquiéter en revanche de cette baisse des émissions associée à une baisse de la production si cette dernière doit être compensée par une hausse de la production ailleurs dans des conditions peut être pires d'un point de vue environnemental. Si les décideurs sont convaincus de l'importance de la question du changement climatique, cet effet de fuite ne doit pas être perdu de vue.

Bien évidemment, les résultats présentés ici sont très dépendants du modèle utilisé, tout comme ils dépendent des données ayant permis la construction du modèle AROPAj. Leur qualité dépend des services nationaux de statistique et il faut être conscient des disparités qui existent quant à leur qualité et à leur représentativité.

Les impacts de la réforme sur les prix des terres sont analysés dans le chapitre suivant (chapitre 3).



## Chapitre 3

# Impacts du découplage sur le prix de la terre

### Introduction

Un des objectifs de la réforme de Luxembourg (2003) est de passer d'une politique soutenant les productions par les prix à une politique soutenant les revenus agricoles directement. Parmi les conséquences de la réforme, une modification de la valeur des facteurs fixes, en particulier des terres agricoles, est attendue. Il est particulièrement important de mesurer les effets distributifs de la réforme sur les facteurs de production mais aussi parmi les exploitants agricoles, selon leur spécialisation.

Les modèles de programmation mathématique, et plus précisément les modèles de programmation linéaire, apportent deux types de résultats pour évaluer les conséquences de changements de politiques. Dans une approche primale, ils permettent l'évaluation de l'usage des sols, des productions, des revenus d'une part. C'est ce qui est présenté dans le chapitre. D'autre part, dans une approche duale, ils donnent une estimation des prix fictifs associés aux contraintes de la production. Les valeurs duales associées à la contrainte de disponibilité de la terre correspondent ainsi à la rente que fournit la terre à l'agriculteur, et sont donc à rapprocher du loyer de la terre.

Nous avons montré dans le chapitre précédent que l'introduction de découplage s'accompagne d'une augmentation des marges brutes. Cette augmentation va se traduire par une hausse des prix des facteurs de production. En outre, si les paiements uniques sont liés à la terre, on peut se demander dans quelle mesure ils vont se transférer au prix fictif de la terre.

Ce chapitre est consacré aux prix duaux de la terre tels qu'ils sont évalués par le modèle européen AROPAj. Nous nous intéressons plus particulièrement aux impacts d'une politique agricole plus découplée, ceux de la réforme de Luxembourg. Dans la section 3.1, nous revenons rapidement sur les liens entre le prix de la terre, les aides agricoles et les droits à paiement. Dans la section 3.2, nous présentons les principaux résultats des simulations effectuées à l'aide du modèle AROPAj pour l'Union Européenne à 15. Nous regardons quel est l'impact sur les prix des terres d'une réforme de la PAC, selon différents scénarios. Les résultats sont présentés à différentes échelles

spatiales, de l'échelle européenne, à l'échelle régionale (la région étant celle définie par le Réseau d'Information Comptable Agricole, RICA). Nous comparons plus particulièrement l'impact d'une réforme dite de Luxembourg, à une réforme où le découplage serait "total". Nous nous intéressons également aux effets distributifs de la réforme selon la spécialisation des exploitations agricoles.

## 3.1 Prix de la terre, marché de la terre, droits et soutien agricole

### 3.1.1 Soutien agricole et prix de la terre

#### 3.1.1.1 Prix de la terre et prix de location

Dans sa théorie de la rente, Ricardo (1817) définit la rente comme "la part du produit de la terre payée au propriétaire pour l'utilisation des pouvoirs originaux et indestructibles du sol" ("that portion of the produce of the earth which is paid to the landlord [by the tenant farmer] for the use of the original and indestructible powers of the soil."). La rente foncière est ce qui reste du revenu agricole une fois les coûts de production retirés, ceux-ci incluant la rémunération du capital et du travail utilisés sur la terre. C'est un surplus non justifié (maintenant appelé rente économique) dans la mesure où ce paiement n'est pas nécessaire à la perpétuation de l'offre de terres agricoles. Pour Ricardo, la rente se forme du fait d'avantages d'un site par rapport à d'autres, à cause de la fertilité du sol : la rente par hectare est plus élevée sur les terres plus fertiles et est faible quand les sols sont pauvres.

Dans le cas le plus simple où il n'y a pas de taxes, ni aucune récupération de la rente par une communauté, ni inflation, le prix de vente  $p$  est égal à la rente  $r$  divisée par le taux d'intérêt  $i$ . Ceci vient de la formule initiale  $r = p * i$  (la rente est égale au prix de la terre multiplié par le taux d'intérêt) puisque la quantité monétaire  $p$ , si elle est placée au taux d'intérêt  $i$  rapporterait annuellement la somme  $r$ . S'il y a de l'inflation, il faut la déduire du taux d'intérêt afin d'obtenir le taux d'intérêt réel  $i$ . S'il y a une taxe sur la terre ou sur la collecte de la rente, alors le taux de taxe est ajouté au taux d'intérêt puisque la rente doit rémunérer le propriétaire une fois la taxe perçue :  $r = p * (i + c)$ , où  $c$  est le taux de taxe. Par conséquent, si  $i$  ou  $c$  ou les deux augmentent, le prix de la terre diminue. Si la rente augmente, le prix de la terre augmente.

Plusieurs études économétriques ont essayé d'expliquer le prix de la terre à partir de ses caractéristiques physiques comme la qualité du sol, la position géographique, ou l'aversion au risque et les coûts de transaction. Lussier et al. (2001) expliquent le prix de la terre au Québec à l'aide d'un modèle économétrique à partir de données sur la qualité des sols. Selon leur étude, il y a une incitation par le marché à installer des systèmes de drainage (pour la conservation du sol). Cependant, si un sol de bonne qualité donne indiscutablement une meilleure productivité agricole, le signal prix associé à la qualité est ambigu. Cavailhès & Wavresky (2003) montrent que les prix des terres diminuent avec la distance à la ville. Dans les zones péri-urbaines, les parcelles peuvent en effet

être converties pour un usage urbain et leur prix reflètent le gain potentiel d'une telle éventualité. Chavas & Thomas (1999) étudient les prix des terres aux États-Unis entre 1950 et 1996 dans une analyse dynamique prenant en compte l'aversion au risque et les coûts de transaction. Les résultats économétriques montrent que, à la fois les coûts de transaction et l'aversion au risque ont des effets significatifs sur les prix des terres. Tout ces résultats vont dans le sens la théorie de Ricardo : les prix des terres reflètent les gains potentiels à venir.

### 3.1.1.2 Prix des terres et soutien agricole

Parmi les avantages économiques que l'on peut retirer de la terre se trouve l'aide agricole. Dans la plupart des pays développés, les aides agricoles sont en effet une importante source de revenus pour les agriculteurs. Tangerman (2006) souligne que sur les 5 dernières années, les aides directes contribuent à hauteur de 18%, 35% et 80% au revenu net des agriculteurs, respectivement aux États-Unis, en Europe et au Japon.

Selon la façon de dispenser les aides aux agriculteurs, l'impact sur les prix des terres est différent. Floyd (1965) est l'un des premiers à avoir étudié la question. Dans son article, il étudie trois politiques supportant les prix (la production est soit non contrôlée, soit contrôlée en limitant les surfaces, soit contrôlée en limitant les quantités pouvant être mises sur le marché). Il évalue les effets de ces politiques en calculant les élasticités. Il montre que le type de politique peut influencer le prix de la terre et les impacts sont différents selon que l'agriculteur est propriétaire ou non. L'impact principal de la politique est un bénéfice imprévu, qui se traduit soit par une hausse de la valeur de la terre, soit par l'obtention de certificat de vente émis par le gouvernement et ayant une valeur marchande. Ce bénéfice se fait une fois pour toute. L'avantage est faible pour le non propriétaire ou pour le jeune exploitant cherchant à s'installer.

Les données sont un élément essentiel pour étudier l'impact des politiques agricoles sur le prix des terres, particulièrement en économétrie. Les données moyennes sont souvent non pertinentes pour évaluer les impacts des politiques. Il est nécessaire d'obtenir des données sur les prix montrant à la fois leur évolution dans le temps et leur variabilité géographique. On pourrait alors évaluer les impacts des réformes politiques sur les prix des terres. La Politique Agricole Commune européenne a en effet évolué à plusieurs reprises depuis les années 1990 et a engendré des changements structurels importants.

En augmentant la rentabilité des facteurs fixes, les politiques agricoles valorisent la terre et le capital. Toute réforme diminuant le budget alloué à la politique aurait donc l'effet inverse. Bourdon (1999) remarque que le point de vue théorique ne coïncide pas avec ce qui a été observé lors de la réforme de la PAC de 1992. La différence entre les prix observés et les prix simulés s'explique par le manque de rationalité instantanée des acteurs du marché de la terre. Il y a un effet "paquebot".

Cavailhès & Degoud (1995) ont développé des modèles économétriques utilisant des données françaises. Ils montrent qu'il y a une forte inertie des anticipations et que l'élasticité des prix de la terre à long terme par rapport aux prix des facteurs de productions est élevée. Ils concluent que la réforme de la PAC de 1992 a eu, sur le

long terme, l'impact attendu sur les prix des terres : une baisse de la rente foncière a accompagné la baisse du soutien des prix des produits agricoles.

Cependant, malgré l'idée répandue que le soutien agricole augmente le prix des terres par un phénomène de capitalisation, Mèze (2003) montre que les effets sont en réalité plus complexes et que les interactions entre les terres arables et les prairies permanentes jouent un rôle important dans la capitalisation des aides agricoles. Concernant les rentes, la capitalisation des aides est relativement faible. Le propriétaire n'a en effet aucun moyen de capter une part du soutien. La législation protège en effet davantage l'exploitant que le propriétaire. De ce fait, le loyer des terres agricoles pourrait même baisser si les aides sont modulées.

#### **3.1.1.3 Le découplage et les prix des terres vus par les modèles de programmation mathématique**

Différents modèles de programmation mathématique ont été utilisés pour estimer les impacts de la réforme de Luxembourg sur les prix des terres.

Küpker (2006) a étudié l'impact de la réforme sur les prix fictifs de la terre en Allemagne, à l'aide du modèle EU-FARMIS. Il distingue deux scénarios de découplage, un scénario régional et un scénario historique individuel (reprenant les deux options laissées au choix des États Membres). Il montre que l'option régionale engendre une augmentation des prix fictifs de la terre tandis que l'option individuelle entraîne une forte baisse de ces mêmes prix. Ses résultats sont en accord avec ceux de Courleux (2006) et s'expliquent par le fait que dans leur modèle, seule une faible part des paiements directs est capturée dans la valeur duale associée à la contrainte terre. En effet, les terres permettant de faire valoir les droits à paiement avec l'option individuelle sont plus nombreuses, par conséquent la contrainte liant droits à paiement et surface déclenchant ces droits n'est pas systématiquement saturée.

Judez et al. (2006) ont étudié l'effet de la réforme sur les prix fictifs en Espagne à l'aide du modèle PROMAPA. Ils montrent une baisse des prix du fait d'une diminution des paiements couplés. Cependant, il est nécessaire ici de préciser que les prix fictifs qu'ils évaluent n'intègre pas la valeur du droit à paiement unique. Il doit également être souligné que les deux modèles précédents (FARMIS et PROMAPA) sont basés sur la programmation mathématique positive (PMP). Il est donc légitime de se demander dans quelle mesure l'introduction d'une fonction de coût quadratique dans l'objectif influe sur le prix des terres évalués par les modèles basés sur la PMP. Aucune étude de sensibilité ne semble avoir été menée à ce jour.

Dans le contexte d'une réforme de la PAC, les modèles de programmation mathématique permettent d'obtenir des informations sur les impacts de la réforme sur les prix fictifs de la terre, et donc indirectement sur les loyers de la terre. Afin de mieux comprendre les liens entre les valeurs duales et les loyers, il faut d'abord mieux connaître les règles du marché de la terre et la façon dont les droits à paiement, introduits par la réforme de Luxembourg, sont attachés à la terre ou à l'exploitant.

### **3.1.2 Marché de la terre et droits à paiement**

#### **3.1.2.1 Régime foncier européen**

Le régime foncier définit la relation, légale ou usuelle, entre les individus ou groupes par rapport à la terre. En général, le régime foncier permet de déterminer qui utilise quelle ressource, pour combien de temps et dans quelles conditions (FAO 2002).

Dans la plupart des pays d'Europe du nord par exemple, la durée minimale des baux est imposée. Elle peut en général être étendue ou renouvelée. Dans tous les cas, la durée minimale est assez longue, autour de 10 ans, mais des durées de 18 à 25 ans ne sont pas rares (FAO 2001).

Le régime foncier européen encourage l'agriculture familiale, parfois en imposant une limite supérieure à la surface totale exploitable par un même groupe. Au Danemark, par exemple, la taille maximale est de 125 ha. Un certain nombre de pays, dont la France, ont mis en place un système de contrôle de la propriété afin d'assurer la continuité de l'agriculture familiale. En France, les SAFER (Sociétés d'Aménagement Foncier et d'Équipement Rural) contrôlent le marché foncier local. En achetant et en rétrocédant à des agriculteurs des terres, le rôle des SAFER est de favoriser l'installation et la restructuration d'une exploitation existante. Elles cherchent également à décourager la spéculation sur les terres ou les achats à but d'investissement. Même si ce système est coûteux et assez différent selon les régions, les SAFER ont assuré la continuité de l'agriculture familiale en France. Elles ont en effet un droit de préemption sur toutes les transactions. Depuis la loi de 1990, les SAFER peuvent également louer les terres. Elles sont très actives et contrôlent de près le marché foncier.

Dans de nombreux pays européens, les prix de vente sont encadrés. En Allemagne, la loi sur le transfert des terres limite le prix de vente des terres agricoles à 150% du prix moyen de vente des terres de qualité comparable. De nombreuses autres mesures de ce type existent afin d'encadrer les prix de vente, en lien avec le contrôle de l'usage des terres, soit par des interdictions de vente, des limitations du prix ou des restrictions pour la conversion à des fins non agricoles. En Irlande par exemple, les agriculteurs ont été imposés seulement à partir de 1974, et à des taux bien inférieurs à ceux appliqués aux non agriculteurs. De la même façon, en France, ceux contractant des baux de long terme (supérieur à 18 ans) pouvaient bénéficier de réduction d'impôts. En Italie, il existe des baisses de taxes sur l'achat de terres agricoles.

#### **3.1.2.2 Le transfert des droits à paiement dans l'accord de Luxembourg**

D'après l'article 46 de la *Council Regulation (EC) N° 1782* (2003), les droits à paiement peuvent être transférés dans le seul cas où l'autre exploitant est dans le même État Membre. Une exception est faite s'il y a héritage. Un État Membre peut décider que les droits seront transférables ou utilisables uniquement au sein d'une même région. Les droits peuvent être transférés dans le cadre d'une vente ou de tout transfert définitif avec ou sans terre. En revanche, la location ou équivalent ne sera autorisée que si le transfert de droits s'accompagne du transfert d'un nombre d'hectares éligibles

équivalent.

Hormis dans les cas de “force majeure” ou de circonstance exceptionnelle, un exploitant peut transférer ses droits à paiement sans terre seulement après en avoir utilisé au moins 80% durant un an, ou après avoir cédé volontairement à la réserve nationale tous les droits qu’il n’avait pas utilisé la première année de l’application de la réforme.

Dans le cas d’une vente des droits à paiement, avec ou sans terre, les États Membres, agissant en accord avec le principe général du droit communautaire, peuvent décider qu’une partie des droits vendus sera reversée à la réserve nationale ou que leur valeur unitaire sera diminuée, selon un critère fixé par la Commission.

L’article 9 de *Commission Regulation (EC) N° 795 (2004)* décrit les possibilités de retenues lors des ventes de droits à paiement. Chaque État Membre peut décider de la part à reverser à la réserve nationale selon 5 cas différents. Dans le cas d’une vente de droits sans terre (1), la valeur ou le nombre de droits peuvent être diminués d’au plus 30% ; cependant, pendant les 3 premières années d’application du nouveau système, la diminution peut aller jusqu’à 50%. Dans le cas d’une vente des droits avec terre (2), la diminution en valeur ou en nombre est au maximum de 10%. Dans le cas d’une vente de droits jachère sans terre (3), la diminution est au maximum de 30% ; cependant, pendant les 3 premières années, cela peut aller jusqu’à 50%. Dans le cas d’une vente de droits avec l’entreprise complète (4), la diminution est au maximum de 5%. Dans le cas d’une vente de droits quand le schéma d’application de la réforme est régional, la retenue sur la valeur des droits est au maximum de 10%. Aucune retenue ne s’applique dans le cas d’une vente de droits avec ou sans terre à un exploitant commençant l’activité agricole, ni dans le cas d’un héritage.

Les droits à paiement peuvent être transférés à tout moment de l’année. Les États Membres doivent définir l’échelle régionale appropriée pour le transfert de droits.

Au Royaume-Uni, les transferts peuvent se faire uniquement par vente, dons ou location, avec ou sans terre, ou par héritage. Concernant les restrictions géographiques des transferts, les exploitants habitant au Royaume-Uni peuvent posséder ou louer des droits partout dans le pays, mais les droits établis en Irlande du Nord, Écosse, Pays de Galles, ou dans chacune des trois régions administratives anglaises, peuvent seulement être utilisés dans ces régions. Les transferts entre des exploitants de différents États Membres peuvent se faire uniquement dans le cadre d’un héritage. Les droits concernés ne peuvent alors être utilisés que dans le pays d’origine. Au Royaume-Uni, le fait de transférer un droit ne modifie pas sa valeur. Le Royaume-Uni a décidé de ne pas utiliser cette possibilité pour alimenter sa réserve nationale, au moins pour la première année d’application.

En France, la zone géographique pour les transferts est le département. Les transferts sont autorisés entre les exploitants d’un même département et les droits peuvent être uniquement utilisés dans le département d’origine. Il n’y a pas de retenue sur les droits pour les exploitants s’installant, ni pour les extensions d’exploitation, ni lors de transferts familiaux. La retenue maximale est de 3% quand le transfert est accompagné

de la terre, même si le transfert concerne une exploitation entière. Cette limite passe à 10% quand le transfert implique la création d'une grosse exploitation (selon des règles départementales). Quand le transfert se fait sans terre, la retenue est de 50%.

### 3.1.2.3 Effets attendus du découplage sur le marché de la terre

D'après la littérature, le découplage pourrait s'accompagner d'une hausse ou d'une baisse des prix fictifs de la terre, selon l'option retenue pour l'application de la réforme. L'élément clé ici est dans la nature du lien entre le droit à paiement et la terre.

On peut s'attendre à une hausse des prix de la terre quand toutes les aides existantes auparavant – animales et végétales – sont également réparties sur les hectares exploités. Dans ce cas, il y a un lien fort entre la valeur du droit et la terre. C'est le cas quand les aides couplées sont transformées en un paiement unique à l'hectare. Le paiement reçu est alors directement proportionnel à la surface détenue par l'exploitant.

On peut s'attendre à une baisse des prix de la terre quand les aides découplées sont similaires à un paiement forfaitaire à l'exploitant. Dans ce cas, il y a un lien fort entre la valeur du droit et l'exploitant mais aucun avec la terre elle-même. Ce serait le cas du paiement unique individuel. Le paiement reçu ne dépendrait pas de la surface détenue par l'exploitant.

La réforme de Luxembourg introduit le paiement unique par exploitation. Cependant, si le paiement est à l'exploitant, il lui faut faire preuve des hectares éligibles pour le recevoir. Le paiement est donc directement lié à la terre et n'a de paiement à l'exploitation que le nom. Son caractère individuel tient au fait que la valeur du droit à l'hectare est différente selon l'exploitant, c'est un paiement unique à l'hectare individuel.

L'examen précis des réglementations européennes révèle donc un lien très fort entre le droit à paiement et la terre. Sans terre, les exploitants ne peuvent obtenir d'aides. Ceci n'était auparavant pas le cas pour les éleveurs qui pouvaient intensifier leur production en vendant de la terre tout en continuant à recevoir le même montant d'aides. Par conséquent, on peut s'attendre à une baisse de l'offre de terres agricoles, que ce soit pour des usages agricoles ou non. Les cultivateurs, en revanche, sont dans la même situation, avant et après réforme : s'ils se séparent d'une partie de leurs terres, ils perdent des aides (que celles-ci soient couplées ou non).

Globalement, la réforme pourrait donc diminuer la liquidité du marché foncier agricole. L'introduction des droits à paiement apparaît en effet comme un nouveau frein à l'échange. Cette réforme devrait également réduire les conversions de terres agricoles vers des usages non agricoles, les droits à paiement disparaissant complètement dans ce cas.

Dans quelques années, la PAC changera vraisemblablement à nouveau. Les décideurs devront anticiper les impacts attendus de nouvelles réformes. Nous avons donc pris en compte dans notre analyse un scénario de découplage total. La suite de ce chapitre est consacrée aux résultats du modèle AROPAj en ce qui concerne les prix fictifs de la terre.

## 3.2 Contribution d'un modèle à l'échelle européenne (AROPA<sub>j</sub>)

Dans le modèle AROPA<sub>j</sub>, la terre joue un rôle important parmi les facteurs quasi fixes, en plus du rôle joué par le nombre d'animaux. Chaque groupe-type dispose d'un certain nombre d'hectares et ne peut en utiliser plus que ce nombre. En d'autres termes, le nombre d'hectares à la disposition d'un groupe-type est une borne supérieure qui contraint l'optimisation de l'allocation des terres entre les différentes activités possibles. Les ressources en terre de chaque groupe-type sont des paramètres du modèle. La valeur duale associée à la contrainte de disponibilité en terre est égal au prix fictif de la terre quand aucune autre contrainte n'implique la ressource en terre. Quand la terre est impliquée dans d'autres contraintes, le prix fictif doit être calculé de façon différente, et c'est le cas quand la réforme de Luxembourg est mise en place dans le modèle. La conception des droits à paiement, liés à la terre interfère aussi avec la valeur du prix fictif.

### 3.2.1 Le prix fictif de la terre

Une des caractéristiques intéressantes des modèles de programmation mathématiques est que la valeur optimale de l'objectif peut être partagée entre les différents facteurs quasi fixes. Dans le cas du modèle AROPA<sub>j</sub>, ces facteurs sont la terre et les animaux. Nous nous intéressons ici à la terre, qui dans le cas de la réforme de Luxembourg intervient dans plusieurs contraintes. Deux types de résultats doivent être analysés séparément quand la réforme de Luxembourg et la prime unique sont introduite.

Les fondements théoriques de l'analyse reposent sur le théorème de l'enveloppe. Soit le programme de maximisation suivant ( $P$ ) :

$$\begin{aligned} \max_x \quad & f(x, \alpha) \\ \text{s.t.} \quad & g(x, \alpha) \leq 0 \end{aligned}$$

On note  $\lambda$  le vecteur des multiplicateurs associé à la contrainte à  $m$  dimensions  $g(x, \alpha) \leq 0$ . Notons  $\pi(\alpha)$  la fonction définie à l'optimum quand il existe. C'est le cas quand les fonctions  $f$  et  $g$  respectent les "bonnes" conditions de régularité. Notons  $x^*(\alpha)$  et  $\lambda^*(\alpha)$  une solution du programme quand elle existe. Soit un valeur de  $\alpha$  pour laquelle la solution du programme n'est pas dégénérée. La variation de l'optimum s'estime par :

$$\frac{\partial \pi}{\partial \alpha} = \frac{\partial f}{\partial \alpha}(x^*(\alpha), \alpha) + \lambda^*(\alpha) \cdot \frac{\partial g}{\partial \alpha}(x^*(\alpha), \alpha)$$

En pratique, cette expression peut être utilisée pour les programmes linéaires en étant vigilant quant aux problèmes d'unicité des solutions qui peuvent se produire particulièrement quand il y a des variables entières.

Soit maintenant la ressource en terre  $S$  d'un groupe-type du modèle AROPA<sub>j</sub>. Quand ce paramètre se trouve impliqué dans une ou plusieurs contraintes du modèle, du fait d'une option PAC, l'estimation de la variation marginale de la marge brute à

l'optimum doit prendre en compte les multiplicateurs associés. La réforme de Luxembourg entre dans ce cas, car la terre est prise en compte dans une contrainte sur la jachère. La surface en jachère doit être supérieure à un seuil calculé sur des bases historiques pour que l'exploitant reçoivent le paiement des aides.

Quand la réforme de Luxembourg est mise en place, la terre est impliquée dans deux différentes contraintes (voir tableau 2.2 du chapitre précédent), à savoir la contrainte de disponibilité de la terre et une contrainte qui autorise le versement des aides uniquement si la surface en jachère dépasse un certain seuil. Par conséquent, le prix fictif de la terre se décompose en 2 parties. La première partie est associée à la contrainte de disponibilité. La deuxième partie du prix fictif est relative à une contrainte politique.

Enfin, considérons le scénario de découplage total. Le programme de maximisation ( $P$ ) se réécrit en séparant le vecteur des activités  $x$  en 2 sous-vecteurs  $y$  et  $s$ . Le sous-vecteur  $s$  correspond aux surfaces allouées aux différents usages possibles de la terre  $S$ . Nous introduisons également les paramètres  $\mu$  et  $\nu$  qui représentent respectivement l'aide à l'hectare et un montant fixe d'aide individuelle. La liste des contraintes est ci-dessous décontractée de façon à expliciter la contrainte liée à la disponibilité de la terre. Les multiplicateurs sont maintenant  $\lambda = (\sigma, \tau)$  avec  $\sigma$  le multiplicateur lié à la disponibilité de la terre. Le vecteur des paramètres  $\alpha$  est réécrit  $(S, \beta)$ . Le programme ( $P$ ) devient donc :

$$\begin{aligned} \max_{s,y} \quad & f(s, y, \beta) + \mu \cdot s + \nu \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j s_j \leq S \quad (\sigma) \\ & h(s, y, \beta) \leq 0 \quad (\tau) \end{aligned}$$

Soient les deux options ( $P_1$ ) et ( $P_2$ ) dans lesquelles, pour la première,  $\mu_j = d$  pour tout  $j$  et  $\nu = 0$ , et pour la seconde,  $\mu_j = 0$  pour tout  $j$  et  $\nu > 0$ . Considérons le cas général d'une solution telle que la contrainte de disponibilité en terre est saturée (i.e.,  $\sum_j s_j = S$ ). Les solutions des 2 programmes ( $P_1$ ) et ( $P_2$ ) sont identiques. Par le théorème de l'enveloppe, les estimations de la variation marginale de la fonction objectif diffèrent :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_1}{\partial S} &= d + \sigma \\ \frac{\partial \pi_2}{\partial S} &= \sigma \end{aligned}$$

Considérons le cas où  $\nu = d S$  ce qui conduit à la même valeur de l'objectif à l'optimum. Nous avons maintenant 2 options équivalentes de découplage total. La première s'appuie sur un paiement unique à l'hectare, la seconde sur un paiement unique à l'exploitant, indépendant de la ressource en terre  $S$ .

Dans ce qui suit, nous considérons le cas où le paiement est lié à la terre, mais nous présenterons également dans le tableau 3.2 les deux parties du prix fictifs de la terre : celle liée à la contrainte de disponibilité et celle liée à la contrainte politique sur la jachère.

### 3.2.2 Contribution du facteur terre à la marge à l'échelle des États Membres

Comme cela a été montré dans le paragraphe précédent, le problème de maximisation de la marge s'analyse de façon primale ou de façon duale. L'aspect dual du problème conduit à donner un prix aux différents facteurs quasi fixes. La valeur de la terre est ainsi obtenue parmi les résultats du modèle. En général, les prix fictifs de la terre sont positifs pour tous les groupes-type du modèle<sup>1</sup>.

Quand les prix fictifs associés à d'autres contraintes sont négatifs (c'est-à-dire que les contraintes contribuent négativement à la marge brute), la valeur duale de la terre peut être plus élevée que la marge à l'hectare. Cela arrive dans plusieurs régions avec certaines productions – principalement la production porcine.

Le tableau 3.1 présente les estimations moyennes des marges par hectare, des aides par hectare et des prix fictifs de la terre pour chaque État Membre, pour les 3 scénarios proposés (Agenda 2000, réforme de Luxembourg, et découplage total). Dans ces 3 scénarios, le nombre d'animaux est autorisé à varier dans un intervalle de  $\pm 15\%$  autour de sa valeur initiale. Les 3 scénarios "PAC" sont notés respectivement *AG15*, *LX15*, *FD15*. Dans les 2 derniers scénarios, les primes sont calculés à partir d'un scénario Agenda 2000 où le capital animal est resté égal à sa valeur initiale. Dans le scénario Luxembourg, les estimations du prix fictif de la terre prennent en compte les 2 valeurs duales associées à la contrainte de disponibilité et la contrainte sur la jachère.

Il est nécessaire de préciser que les résultats présentés pour le scénario *AG15* ne correspondent pas au même budget d'aides européennes que les scénarios *AG00*, *LX15* et *FD15*. Cela signifie que la comparaison des marges et des prix fictifs entre les scénarios *LX15* et *AG15* peut parfois révéler une diminution significative. Ceci est uniquement dû au fait que le scénario *LX15* correspond à des aides historiques plus faibles (celles du scénario *AG00*) et que, n'agissant pas sur le budget européen, le scénario Luxembourg ne peut pas autant profiter de l'effet d'ajustement du capital animal que le scénario Agenda 2000.

La contribution moyenne des aides européennes à la marge agricole estimée par AROPA<sub>j</sub> est en accord avec ce qu'estiment d'autres études (Tangerman 2006). Le modèle AROPA<sub>j</sub> montre que cette contribution est de l'ordre de 30%. Parallèlement, la contribution nette de la terre est d'environ 70% dans le scénario *AG15*. La variabilité de cette dernière contribution est assez élevée et révèle parfois des contributions négatives d'autres facteurs comme le capital animal. Ceci est le cas en Belgique, aux Pays-Bas et

---

<sup>1</sup>La recherche de solutions optimales n'aboutit pas toujours complètement pour quelques groupes-type, pour lesquels le solveur ne donne pas la solution duale du problème, même si la solution primale est fournie. Dans ces cas, le solveur donne des valeurs nulles, fausses, à tous les prix fictifs. Il a donc été nécessaire de faire tourner le modèle en changeant légèrement un des paramètres – à savoir l'ajustement du capital animal modifié de  $+ 10^{-6}$  par rapport à sa valeur initiale. Le modèle a alors fourni à la fois la solution duale et des prix fictifs de la terre positifs. Cependant, il était trop coûteux en temps de prendre en compte ces résultats complémentaires. Les tableaux et les cartes qui suivent utilisent les résultats des groupes-type pour lesquels la valeur duale de la terre est strictement positive, les groupes-type pour lesquels le logiciel ne donne pas de solution duale ont été exclus de l'analyse. Ce problème a été rencontré pour 28 groupes-type sur un total de 1,074 groupes-type pour les 3 scénarios de PAC.

MS	Marges brutes			Aides			Prix fictif de la terre		
	AG15	LX15	FD15	AG15	LX15	FD15	AG15	LX15	FD15
Belg	641	648	670	288	288	299	932	1011	1060
Dane	810	813	833	320	320	322	782	868	859
Alle	1126	1189	1148	321	373	320	762	922	852
Grec	2136	2111	2113	655	614	614	1180	1526	1538
Espa	615	613	628	306	299	303	632	672	734
Fran	801	801	833	324	313	326	621	673	752
GBre	781	794	802	265	265	265	569	748	734
Irla	647	651	653	294	284	284	554	656	637
Ital	2349	2359	2370	357	355	355	792	883	884
Luxe	958	985	999	270	272	272	492	623	628
PBas	3748	3764	3768	297	296	297	3677	3805	3606
Autr	1001	1012	1025	324	323	325	741	782	856
Port	890	905	927	249	245	248	735	817	854
Finl	840	840	845	204	199	199	398	480	493
Suèd	766	778	789	225	222	221	479	551	557
UE15	1025	1039	1047	311	315	310	712	811	827

TAB. 3.1 – Comparaison pour chaque État Membre entre les marges à l’hectare, les aides à l’hectare et le prix fictif de la terre, pour 3 scénarios PAC : “Agenda 2000” (AG15), “réforme de Luxembourg” (LX15) et “découplage total” (FD15). Dans ces 3 scénarios, le capital animal peut varier de  $\pm 15\%$ .

MS	LX15		FD15	
	terre	jachère	terre	aides
Belg	812	198	761	299
Dane	545	323	537	322
Alle	540	382	532	320
Grèc	902	623	924	614
Espa	489	184	431	303
Eran	470	203	426	326
GBre	482	265	469	265
Irla	373	283	353	284
Ital	521	362	529	355
Luxe	351	272	356	272
PBas	3522	283	3309	297
Autr	533	249	531	325
Port	657	160	606	248
Finl	261	203	294	199
Suèd	328	223	336	221
EU15	548	267	517	310

TAB. 3.2 – Contributions de la contrainte de disponibilité de la terre et de la contrainte jachère (réforme de Luxembourg) ou du paiement unique à l’hectare (découplage total) au prix fictif de la terre (€/ha).

en Espagne<sup>2</sup>.

Quand le scénario *LX15* est introduit dans le modèle, le prix fictif total de la terre augmente pour tous les États Membres. C'est une conséquence du changement fondamental de la nature des aides. Même si certaines aides couplées sont maintenues (ou partiellement maintenues) pour les animaux, une grande partie des aides animales auparavant directement liées à l'animal sont maintenant associées à la terre. Le tableau 3.2 (deux colonnes de gauche) présente la contribution respective de la contrainte de disponibilité de la terre de la contrainte sur la jachère de la réforme de Luxembourg. La première colonne pourrait être comparée au prix fictif de la terre dans le scénario *AG15* (dans le scénario *AG15*, la jachère est liée aux terres arables et non à la ressource totale en terre). L'augmentation du prix fictif de la terre est un résultat direct du découplage des aides animales orientées vers une aide à l'hectare.

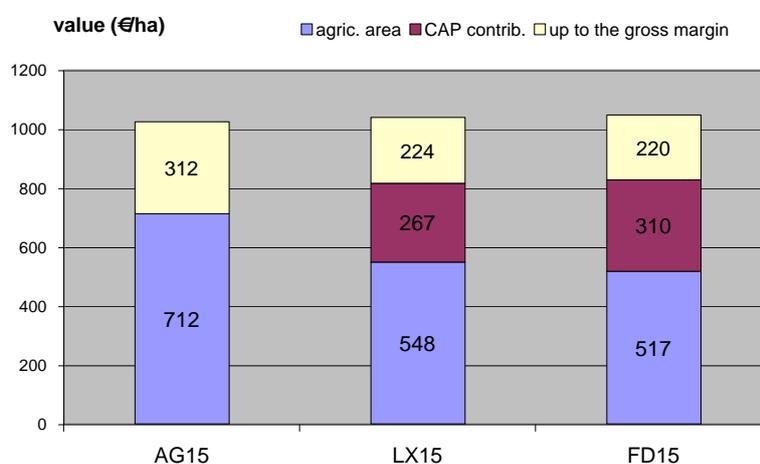


FIG. 3.1 – Contribution de la contrainte de surface et des règles de la PAC à la marge agricole

Quand le scénario *FD15* est introduit dans le modèle, la valeur duale associée à la contrainte de disponibilité diminue drastiquement par rapport à celles des scénarios *AG15* et *LX15*. Le paiement lié à la terre basé sur les aides historiques induit une hausse de la valeur duale de la terre (comme montré par le programme ( $P_2$ ) dans la section 3.2.1). Quand ce paiement est égal aux aides historiques – le paiement individuel moyen ou le paiement régional moyen sont équivalents ici – la valeur totale du prix fictif de la terre est plus élevée que pour les deux autres scénarios PAC (voir les 2 colonnes de droites du tableau 3.2).

Tous ces résultats sont synthétisés à l'échelle européenne sur la figure 3.1.

#### 3.2.3 Modifications régionales du prix fictif de la terre

Les estimations des prix fictifs à l'échelle des États Membres masquent bien évidemment des disparités régionales qui peuvent s'avérer importantes. Nous avons dis-

<sup>2</sup>Des problèmes de sous-estimation des prix à la production pour les porcs et les volailles sont recherchés.

cuté ci-dessus des variations estimées des prix fictifs en lien avec la spécialisation des exploitants (céréales ou élevage). Cet aspect ressort plus facilement encore à l'échelle régionale. L'échelle régionale est en effet plus adaptée pour analyser le lien entre les impacts de la réforme et la spécialisation des exploitants.

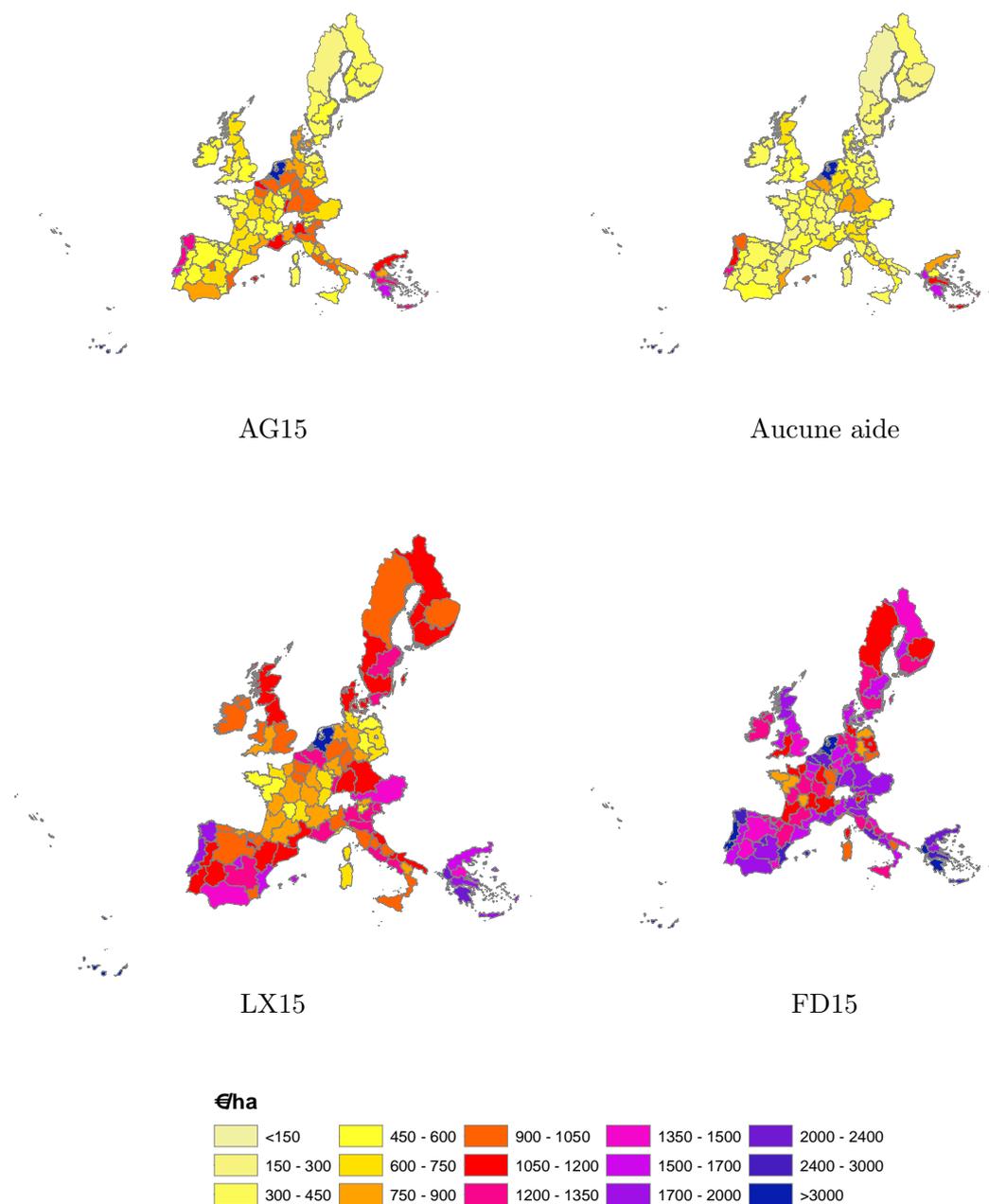
La figure 3.2 présente les prix fictifs de la terre pour chaque région dans les scénarios : *AG15*, *LX15* et *FD15*. La carte intitulée "Aucune aide" sur la figure 3.2 montre que, évidemment, le prix fictif de la terre diminue partout si aucune aide n'est proposée aux agriculteurs. Dans la situation de référence, et dans les options de réforme *LX15* et *FD15*, il est donc clair que la terre capte une partie des subventions agricoles. Les facteurs de production sont donc particulièrement affectés par les politiques agricoles et donc par les réformes qu'elles subissent.

Quand la politique agricole met en place une prime unique à l'hectare (scénario "découplage total") dont le montant est déterminé de sorte à garder le budget FEOGA constant, le prix fictif de la terre est plus élevé par rapport aux valeurs du scénario Agenda 2000 (figure 3.2). En effet, l'aide à l'hectare du scénario "découplage total" est entièrement associée au facteur terre alors qu'une partie de l'aide est, dans le scénario Agenda 2000, associée aux animaux et au lait. De plus, le découplage permet à chaque exploitant d'augmenter sa marge en allouant ses activités sans les contraintes de la PAC. Cette hausse de marge se répercute également sur la valeur des facteurs de production, donc sur le prix fictif de la terre. Le scénario de Luxembourg se situe entre ces deux scénarios. Les impacts sont différents selon les États Membres et l'option, régionale ou individuelle, retenue. Quand une partie des aides animales est recouplée (e.g., en France ou en Espagne), le prix fictif de la terre est plus faible que dans le scénario "découplage total" mais plus élevé que dans le scénario "Agenda 2000". Encore une fois, la politique "Luxembourg" est moins contraignante et permet donc à l'exploitant d'augmenter sa marge ce qui se répercute également sur le prix fictif de la terre. Quand la totalité des aides est découplée (e.g., en Allemagne ou en Italie), le prix fictif de la terre se situe encore entre les 2 scénarios Agenda 2000 et "découplage total". En effet, la politique Luxembourg implique quand même une contrainte sur l'utilisation des terres, il s'agit de la contrainte jachère, contrainte qui n'existe pas dans le scénario "découplage total". L'exploitant ne peut donc optimiser autant sa marge que dans le scénario "découplage total" et cela se répercute sur la rémunération des facteurs de production, et le prix fictif de la terre. L'Allemagne est cependant un cas particulier. La figure 3.2 montre que le prix fictif de la terre est plus élevé dans le scénario Luxembourg que dans le scénario "découplage total". Ceci est une conséquence du schéma particulier retenu par l'Allemagne concernant les prairies et la façon dont cela a été modélisé dans AROPAj. Cette activité reçoit en effet une prime à l'hectare différente de celle des terres arables. Cette incitation à la prairie implique dans la modélisation une hausse du budget FEOGA pour l'Allemagne (+743 millions €, +15.6%) ce qui, à travers une augmentation de la marge des groupes-type allemands, induit à son tour une hausse du prix fictif de la terre en Allemagne.

Les implications de la réforme selon la spécialisation sont mises en valeur par les

### 3.2. Contribution d'un modèle à l'échelle européenne (AROPA<sub>j</sub>)

---



---

FIG. 3.2 – Prix fictifs de la terre dans les scénarios AG15, LX15, et FD15, et dans le cas d'un politique "sans subvention" pour les terres et activités incluses dans le modèle.

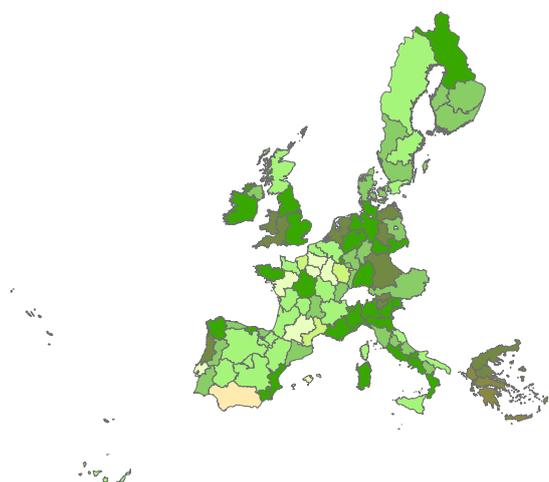
écarts entre les régions. Dans le scénario Luxembourg, le soutien à l'exploitant est introduit sous la forme d'un paiement découplé à l'hectare, ou parfois introduit sous forme d'aides couplées. Dans ce cas, le paiement à l'hectare ainsi que les aides couplées pour les cultures participent à la valeur du prix fictif de la terre. Ce n'est pas le cas des aides couplées à la production animale. Par conséquent, pour un même montant d'aides, la valeur de la terre est plus élevée quand la production de l'exploitation est liée aux cultures et plus faible quand la production est liée à l'élevage. La carte *LX15* sur la figure 3.2 montre clairement cet aspect, par exemple en France et en Espagne. Dans ces deux États Membres, certaines aides animales et céréalières sont partiellement recouplées, et la partie restant couplée des aides animales ne contribue pas à la hausse du prix fictif de la terre. Quand on compare les scénarios *LX15* et *FD15* au scénario *AG15*, et quand les aides animales sont en partie couplées, la hausse du prix fictif de la terre est plus faible dans le scénario *LX15* que dans le scénario *FD15*, pour lequel la totalité du droit est transférée vers la valeur de la terre.

Les figures 3.3 et 3.4 décrivent les variations du prix fictif de la terre à l'échelle régionale pour les scénarios *LX15* et *FD15* par rapport aux scénarios *AG00*. L'impact combiné de l'ajustement du capital animal et des nouvelles dispositions de politique agricoles induit de fortes différences entre les régions, en termes de variations de prix fictif de la terre, bien plus importantes que les moyennes européennes (+13% pour le scénario *LX15* et +15.5% pour le scénario *FD15*).

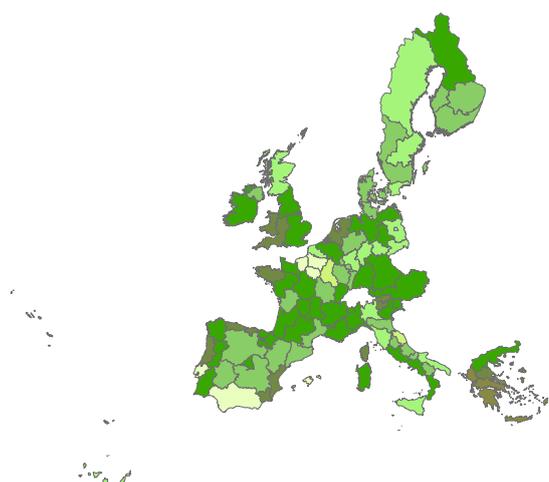
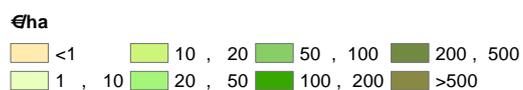
Un des intérêts du modèle AROPAj est sa bonne représentativité de la diversité des orientations technico-économiques (OTE) des exploitants en Europe et au sein de chaque région européenne. Il est donc possible de distinguer les groupes-type selon leurs OTE. Pour étudier les impacts différenciés de la réforme sur les éleveurs et les cultivateurs, nous nous sommes plus particulièrement concentrés sur les groupes-type ne comprenant que les OTE 1 (spécialisés en grandes cultures) d'une part, que nous appellerons les cultivateurs, et 41 (spécialisés lait) et 43 (combinant lait, élevage et viande) d'autre part, que nous appellerons les éleveurs. A l'échelle européenne, la figure 3.5 montre que les éleveurs voient les prix fictifs de leur terre s'élever davantage que les cultivateurs. Le "bruit" qui apparaît sur la figure s'explique en partie par les différents schémas de la réforme adoptés par les États Membres (taux de recouplage, base individuelle ou régionale). Quand on s'intéresse à quelques régions (tableau 3.3), ce résultat se vérifie. La terre des éleveurs bénéficie davantage de la réforme que la terre des cultivateurs. Le résultat est particulièrement fort en Italie car les exploitations sélectionnées ont un nombre d'animaux à l'hectare plus élevés que celles des autres régions présentées (environ 3 UGB<sup>3</sup> par hectare contre environ 1.5 dans les autres régions du tableau).

---

<sup>3</sup>Unité Gros Bétail



LX15 comparé à AG00



FD15 comparé à AG00

FIG. 3.3 – Augmentation régionale du prix fictif de la terre quand le scénario PAC est *LX15* ou *FD15* (€/ha).

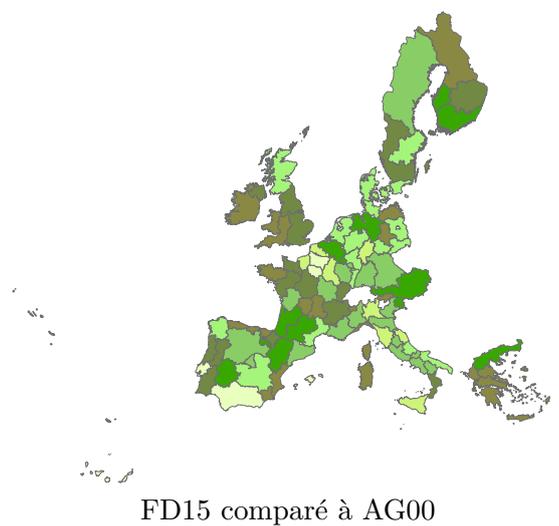
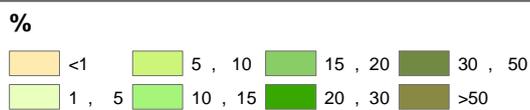
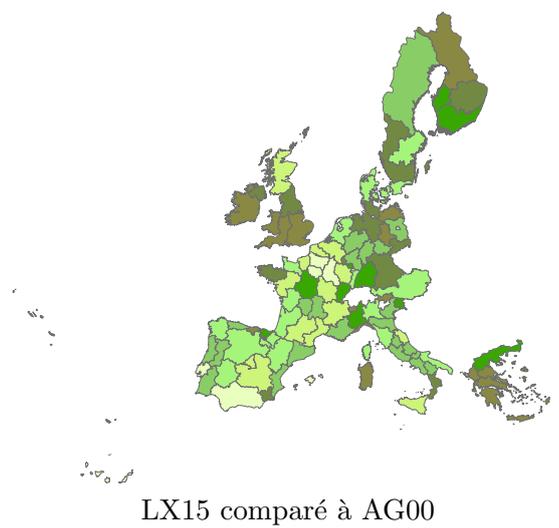


FIG. 3.4 – Augmentation régionale du prix fictif de la terre quand le scénario PAC est *LX15* ou *FD15* (% du prix *AG00*).

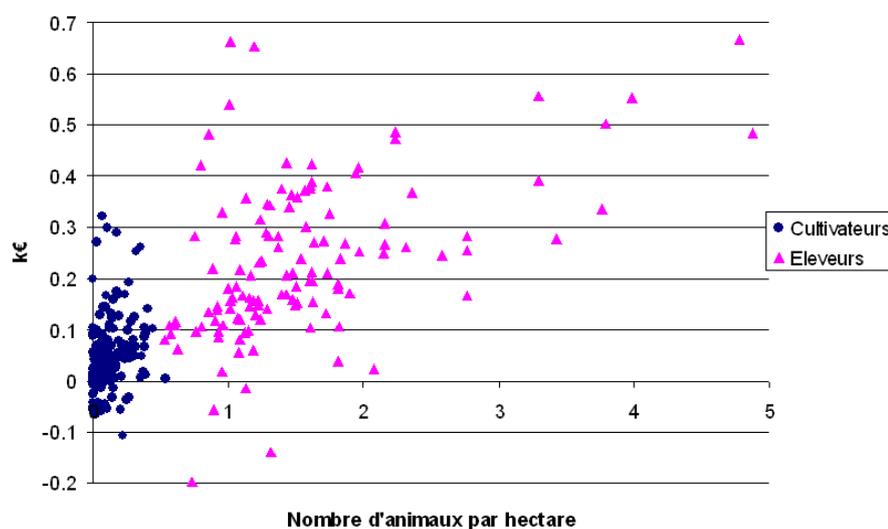


FIG. 3.5 – Variation du prix fictif de la terre (en k€) pour les éleveurs et les cultivateurs selon le nombre d'animaux à l'hectare

## Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre dans quelle mesure les politiques agricoles peuvent influencer sur la valeur de la terre. L'objectif principal est de donner une estimation de la variation des prix fictifs de la terre à l'échelle régionale. La modification de la nature de l'aide pourrait donc avoir une influence importante sur les prix des terres agricoles. Nous avons retenu dans la modélisation un paiement unique similaire à un paiement à l'hectare. Cela signifie que toutes les aides auparavant dédiées à l'élevage et maintenant découplées sont liées à la terre. La mise en place de la réforme de Luxembourg implique également le maintien de certaines aides couplées (pour les céréales et l'élevage), selon le choix laissé aux États Membres. Nous avons également pris en compte la contrainte de la nouvelle PAC sur la jachère obligatoire (pour tous les États Membres) et les incitations au maintien des prairies (en Allemagne). Le choix de l'option régionale a été modélisé quand cela a été possible. Enfin, nous avons également analysé les impacts d'une réforme allant dans le sens d'un découplage plus complet, avec un paiement unique à l'hectare sans contrainte de production (découplage total). Afin d'estimer les impacts de l'ajustement du capital animal dans un cadre plus réaliste, le capital animal est autorisé à varier de  $\pm 15\%$  par rapport à son niveau de référence.

Dans ce cadre, nous avons montré que le prix fictif de la terre pourrait, du fait de la réforme de Luxembourg, subir une hausse importante (hausse moyenne aux alentours de 100 € par hectare, +12%). Mais de grandes différences sont à prévoir d'un État Membre à l'autre et d'une région à l'autre, d'une part selon les modalités retenues pour l'application de la réforme, mais aussi selon la spécialisation des exploitations.

EM	Région	Différence absolue de la valeur de la terre en € par ha		Représentativité des groupes-type dans la région			
		Cultiv.	Élev.	surface		population	
				Cultiv.	Élev.	Cultiv.	Élev.
Allemagne	Baden-Wurt.	102	275	9%	24%	5%	25%
Allemagne	Schleswig-Holst.	96	361	30%	32%	22%	40%
France	Bse-Normandie	-15	112	9%	24%	5%	25%
France	Hte-Normandie	-15	120	48%	13%	41%	19%
Espagne	Pais Vasco	11	226	19%	10%	12%	18%
Italie	Friuli-Venezia	66	518	57%	5%	65%	2%
UK	England-East	137	205	76%	5%	64%	7%

TAB. 3.3 – Variation des prix fictifs pour les éleveurs et les cultivateurs dans quelques régions RICA

Quand une politique de découplage total est mise en place, la hausse des prix fictifs est légèrement plus marquée à l'échelle européenne, avec encore une fois de grandes variations à l'échelle nationale et régionale.

Dans cette analyse statique, les droits à paiement dans les scénarios “Luxembourg” et “découplage total” sont transférés dans leur totalité à la valeur de la terre. Cependant, à partir de l'étude des règles sur la transférabilité de la terre et des droits associés de l'Accord du Luxembourg, nous avons noté que les droits sont le plus souvent seulement partiellement transférés avec la terre. Par conséquent, l'acheteur ne recevra pas la totalité des droits liés à la terre. Du point de vue de l'acheteur, nos résultats ne représentent pas la valeur de marché de la terre. Cependant, du point de vue de l'exploitant/vendeur, la valeur de la terre que nous avons estimée à travers le prix fictif représente la contribution de la valeur ajoutée de la terre dans son revenu lorsque le travail n'agit pas comme une contrainte explicite. Dans la réalité, on peut considérer qu'un hectare de terre supplémentaire engage un certain nombre d'heures travaillées en plus. L'écart entre le prix fictif calculé par le modèle et le coût de transaction locative observé dans la réalité représente la valorisation marginale de ces heures travaillées<sup>4</sup>. La mise en place des droits et des règles de transfert induit donc une divergence entre la valeur de marché telle que se la représente l'acheteur et celle que considère le vendeur.

Afin d'évaluer les impacts de la réforme sur le marché foncier, d'autres considérations seraient à prendre en compte. D'abord, le marché foncier est très contrôlé par les États Membres. Ensuite, la valeur de la terre peut énormément varier dans une région donnée, selon des caractéristiques pédo-climatiques et la qualité du sol. Enfin, les agriculteurs peuvent rapidement faire face à des coûts de transport convexes quand leurs parcelles sont éloignées du centre de leur exploitation. Pour résumer, la PAC et sa dernière réforme continuent à distordre le marché foncier, et plus les paiements découplés des productions seront liés au facteur terre, plus les distorsions existeront. Un point clé de l'analyse se joue aussi dans les règles de transfert des terres et des droits.

<sup>4</sup>Pour la région Ile de France par exemple, le prix réel est de l'ordre de 100€ par hectare alors que le modèle estime le prix fictif à 700€ par hectare.

Le modèle AROPAj couvre partiellement l'agriculture européenne et ceci ne doit pas être perdu de vue dans l'analyse des résultats. Par exemple, les cultures permanentes (olive, vigne) ne sont pas prises en compte. De plus, le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) sur lequel le modèle se base, ne prend pas précisément en compte les exploitations "à temps partiel" dans certains États Membres. Enfin, le modèle AROPAj se concentre sur un nombre limité de facteurs fixes – la terre et le capital animal – et sur les contraintes auxquelles font face les exploitants du fait des obligations requises par la PAC (i.e., jachère obligatoire). Néanmoins, le RICA couvre de façon plutôt homogène les systèmes d'exploitations de l'Union Européenne, et le modèle AROPAj couvre plus de 80% de la surface agricole européenne (UE15). Qualitativement et quantitativement, le modèle est capable de fournir des résultats pertinents à l'échelle européenne et dans le domaine complexe des prix de la terre. L'introduction de paiements liés à la terre augmente sa valeur. Dans le cadre d'une réforme de découplage, le lien entre la terre et les droits restent un des seuls moyens pour les décideurs publics de garder prise sur l'usage des terres. Si l'existence d'une agriculture européenne et d'agriculteurs européens représente un service socialement important, les droits liés à la terre contribuent à maintenir l'état des terres agricoles en préservant l'option agricole pour le futur.

## Deuxième partie

L'agriculture, un secteur  
impliqué dans le changement  
climatique avec des spécificités  
propres.



## Chapitre 4

# Un secteur économique à la fois source et puits de GES

### Introduction

La recherche de productivité agricole était un centre d'intérêt majeur du siècle dernier. Le rendement des principales espèces a ainsi considérablement augmenté<sup>1</sup> en particulier dans la deuxième moitié du XXIème siècle, à la fois grâce à l'amélioration génétique des variétés et aux progrès dans les techniques agricoles (Janick 2001). L'agriculture fait maintenant face à une nouvelle problématique : celle de l'effet de serre. Le protocole de Kyoto, signé en 1997 par 189 pays, engage les États de l'Annexe 1 (39 pays développés et économies en transition) l'ayant ratifié<sup>2</sup> à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990. Parmi l'ensemble des activités économiques, l'activité agricole est une source d'émissions de gaz à effet de serre. Elle peut également être un puits en stockant du carbone à la fois dans la biomasse aérienne, et dans les sols. A la fois source et puits de gaz à effet de serre, le secteur est à même de contribuer à l'effort général de réduction des émissions mis en avant par le protocole de Kyoto. L'objectif de ce chapitre est d'analyser les questions clés concernant le rôle de l'agriculture dans les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique plus généralement. La particularité du secteur agricole tient, entre autres, au fait qu'il émet des gaz différents du CO<sub>2</sub> : le méthane et le protoxyde d'azote. La prise en compte de plusieurs gaz nécessite l'emploi de facteurs d'équivalence afin de mesurer les émissions dans une unité commune, les Pouvoirs de Réchauffement Global (PRG) : à chaque gaz est associé un PRG.

La compréhension de la contribution du secteur agricole à l'effet de serre (section 4.1) et au changement climatique (section 4.2) permettra d'analyser les potentiels

---

<sup>1</sup>de +100% pour le blé à +400% pour la pomme de terre entre le début et la fin du XXIème siècle (Janick 2001).

<sup>2</sup>Au 18 novembre 2005, les pays de l'Annexe 1 ayant ratifié le protocole de Kyoto sont au nombre de 35 : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Biélorussie, la Bulgarie, le Canada, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, la Lettonie, le Liechtenstein, la Lituanie, le Luxembourg, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République tchèque, la Roumanie, le Royaume-Uni, la Russie, la Slovaquie, la Slovénie, la Suède, la Suisse et l'Ukraine.

d'abattement du secteur (section 4.3).

## 4.1 Contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre

### 4.1.1 Un secteur responsable d'une part importante des émissions

L'agriculture est responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine, que ce soit à l'échelle mondiale (26%), à l'échelle européenne (10% pour l'UE15), ou française (17%). Les émissions agricoles représentent plus d'un quart des émissions mondiales car elles sont proportionnellement très importantes dans les pays en développement, où le secteur contribue pour une grande part au PIB. Elles sont également très importantes en France mais pour une autre raison, la structure particulière du parc énergétique. En effet, la production d'électricité, essentiellement d'origine nucléaire et d'origine hydraulique, réduit fortement les émissions de GES françaises, et renforce en contrepartie le rôle de l'agriculture.

Le tableau 4.1 présente les émissions mondiales de GES pour l'année 2000. L'ensemble des gaz est pris en compte et l'électricité est imputée aux secteurs qui la consomment.

Production d'énergie hors électricité et vapeur	5%
Industries manufacturières	23%
Transports routiers	12%
Autres transports	4%
Résidentiel/tertiaire	22%
Agriculture	26%
Halocarbures (chaîne du froid, semi-conducteurs)	8%

TAB. 4.1 – Répartition par activité des émissions mondiales (2000). Source : [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

La figure 4.1 présente les émissions françaises et européennes pour l'année 2004. Les secteurs d'activités distingués sont ceux du rapport "Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux" (2000). Le secteur agricole comprend uniquement les émissions de méthane et de protoxyde d'azote. Le secteur "Énergie sauf transports" rassemble les émissions issues de la combustion d'énergie fossile pour la production d'électricité et de chaleur, les raffineries, les industries manufacturières, les ménages et les services. Le secteur "Procédés industriels" est composé des émissions des cimenteries, des industries chimiques, de la chaîne du froid, ... Les émissions du secteur "Transport" correspondent à la combustion d'énergie fossile. Le secteur "Déchets" correspond à des émissions de méthane.

Tous les chiffres présentés ici concernent les émissions brutes, c'est à dire que les puits ne sont pas pris en compte. Cela signifie essentiellement que les bénéfices liés à l'exploitation forestière, conduisant à la séquestration de carbone dans les arbres transformés en produits durables, ne sont pas imputés à l'activité agricole, sylviculture

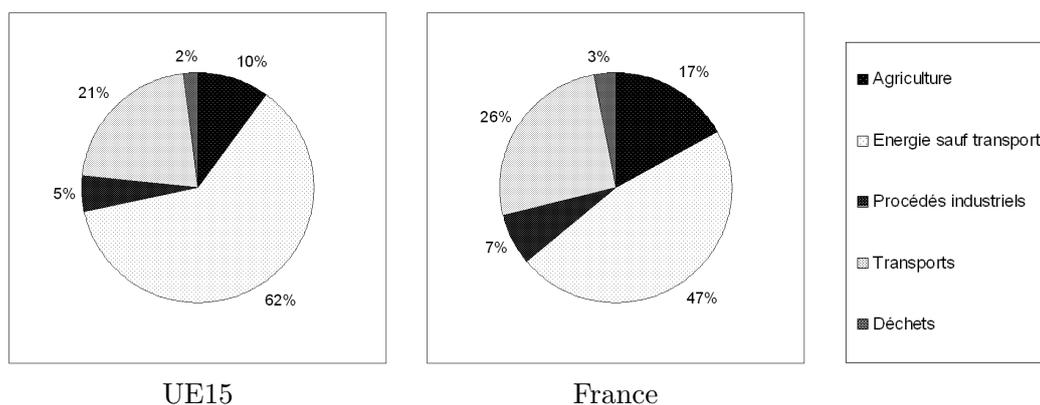


FIG. 4.1 – Émissions européennes et françaises (2004). Source : EEA 2006

comprise.

#### 4.1.2 Nature des émissions d'origine agricole

En parallèle d'une représentation sectorielle des émissions, il est également intéressant de les présenter selon la nature des gaz émis à des fins de comparaison. Six gaz ou familles de gaz sont retenus dans le panier de gaz du protocole de Kyoto : le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ). Afin de comparer les émissions de ces différents gaz, une métrique a été adoptée : des facteurs d'équivalence, les Pouvoirs de Réchauffement Global (PRG), permettent de convertir chaque tonne de gaz émise à une même date en "équivalent  $\text{CO}_2$ ". Ainsi, une tonne de méthane émise est équivalente à 23 tonnes de  $\text{CO}_2$  (tableau 4.2). Les gaz à effet de serre se distinguent par leur impact physique sur le climat (contribution à l'effet de serre) et leur durée de vie dans l'atmosphère. Le PRG est un indice servant à évaluer la contribution relative au réchauffement de la planète d'une émission dans l'atmosphère d'un kilogramme d'un gaz à effet de serre particulier par comparaison avec l'émission d'un kilogramme de dioxyde de carbone. Le PRG est une mesure de l'effet radiatif relatif d'un gaz donné par rapport au  $\text{CO}_2$ , pour une période de temps déterminée (IPCC 2001). A ce stade, il faut rappeler que tous les chiffres présentés précédemment repose sur ces coefficients d'équivalence. Ainsi, la part de l'agriculture, émettant uniquement du  $\text{N}_2\text{O}$  et du  $\text{CH}_4$  dans les émissions de GES françaises, et mondiales a été calculée en utilisant ces coefficients d'équivalence. Tout changement dans ces coefficients modifierait la part du secteur agricole dans les émissions totales d'origine anthropique.

L'agriculture joue un rôle particulier dans les émissions de GES car elle n'émet que du méthane et du protoxyde d'azote (d'après la méthodologie d'inventaire recommandée par le GIEC). L'agriculture émet trois quart du  $\text{N}_2\text{O}$  et du  $\text{CH}_4$ , avec en 2005 respectivement 77,5% et 72% des émissions françaises ce qui place ce secteur au premier rang pour ces deux polluants. Ces gaz "mineurs" représentent un peu plus d'un quart des émissions globales (tableau 4.3).

#### 4.1. Contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre

---

Gaz	PRG relatif à 100 ans / CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	23
N <sub>2</sub> O	296
HFC	5700 à 11900
PFC	12 à 12 000
SF <sub>6</sub>	22200

TAB. 4.2 – PRG des 6 gaz ou familles de gaz retenus par le protocole de Kyoto

Gaz	Part des émissions
CO <sub>2</sub>	70%
CH <sub>4</sub>	13%
N <sub>2</sub> O	14%
HFC	2.5%
PFC	0.3%
SF <sub>6</sub>	0.3%

TAB. 4.3 – Répartition des émissions par gaz en France en 2004. Source : CITEPA

La fermentation entérique ainsi que la gestion des déjections animales émettent du CH<sub>4</sub> et dans une moindre proportion du N<sub>2</sub>O, les rizières engendrent des émissions de CH<sub>4</sub>, et les sols agricoles sont source de N<sub>2</sub>O, à la suite de l'application de fertilisants azotés.

La part de l'agriculture pour le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O est en augmentation depuis 1990, bien que les émissions en masse soient en baisse, ce qui s'explique par la baisse des émissions des autres secteurs (le CH<sub>4</sub> des décharges, d'une part, et le N<sub>2</sub>O de la chimie, d'autre part). Par contre en 2005 sa contribution aux émissions globales baisse par rapport à 1990 en raison de l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> (de l'énergie en particulier) sur la même période.

#### 4.1.3 Le puits agricole

Les sols agricoles sont susceptibles de stocker du carbone sous forme organique (Arrouays et al. 2002). Cette matière organique provient des organes (feuilles, racines) et organismes morts, des déjections animales, mais aussi de la rhizodéposition (molécules organiques excrétées par les racines dans le sol), et comprend la biomasse microbienne. Ce stockage a la particularité d'être temporaire. Il n'existe pas (quasiment) de stockage définitif de carbone dans les sols, car toute matière organique est à terme minéralisée. Les temps de résidence du carbone organique dans les sols, qui sont en moyenne de quelques dizaines d'années, vont de quelques heures à plusieurs millénaires.

L'usage des terres ainsi que les pratiques culturales ont une influence importante sur les niveaux de stock de carbone dans les sols. Une expertise de l'INRA sur le stockage de carbone dans les sols agricoles français (Arrouays et al. 2002) a montré qu'en modifiant les utilisations du sol et les pratiques il était possible d'accroître de façon significative le stockage de carbone. Les activités agricoles susceptibles de stocker du carbone sont

celles qui permettent d'accroître les "entrées" de matière organique (augmentation de la production primaire, accroissement de l'incorporation des résidus de cultures et des déjections animales, épandage de déchets organiques non agricoles) tout en retardant les "sorties" par minéralisation (ralentissement en jouant sur la composition de la matière organique, l'utilisation des sols et les pratiques culturales). Le stockage additionnel maximal est ainsi obtenu en passant d'une culture annuelle à une végétation pérenne.

L'afforestation et la conversion des terres arables en prairies permettent ainsi un stockage additionnel d'environ 0.45 t par hectare et par an sur 20 ans pour les deux pratiques. L'afforestation induit en outre une augmentation du stock de carbone dans la biomasse. Des pratiques culturales permettent également une augmentation du stock de carbone. La suppression du labour ou les techniques culturales simplifiées (TCS) qui consistent à travailler le sol sur des profondeurs faibles sont des voies à explorer. Si ces techniques commencent à émerger en France, elles se heurtent encore à une réticence chez les agriculteurs qui considèrent le labour comme la seule façon de "bien travailler la terre" (colloque TCS, MEDD, 2004). Par ailleurs, la mise en place de Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN) ou l'enherbement des cultures permanentes (vignobles, vergers) peuvent permettre de limiter les émissions de  $N_2O$  en particulier en période hivernale et d'accroître le carbone stocké dans le sol.

L'étude soulève toutefois quelques difficultés. De grandes incertitudes subsistent sur les potentiels de stockage, très sensibles aux conditions locales (conditions pédoclimatiques). L'incertitude sur les flux de stockage présentés dans l'étude est évaluée à 50%, notamment du fait d'un trop faible nombre d'expérimentations de longue durée en France ou en Europe de l'Ouest. Les résultats sont également très sensibles aux effets induits sur les émissions d'autres GES.

Enfin, une incertitude supplémentaire réside dans l'effet du changement climatique sur le cycle du carbone. L'augmentation de la concentration atmosphérique en  $CO_2$  peut en effet stimuler la croissance et donc le stockage de carbone dans la biomasse. En étudiant les hêtraies régulières du Nord-Est de la France entre 1900 et 2000, Bontemps et al. (2005) mettent en évidence une accélération de la productivité de 50% depuis 1900, l'essentiel de cette transition s'étant déroulé entre 1950 et 1980. Outre les dépôts azotés, liés au développement industriel et agricole, l'augmentation de la concentration atmosphérique en  $CO_2$  aurait joué un rôle majeur dans ce phénomène. Concernant les sols, si le réchauffement climatique accroît la production de biomasse et donc les "entrées" de matière organique, la hausse de la température accélère la minéralisation et donc la "sortie" de carbone. Le bilan sur les stocks de carbone dans le sol se situerait entre +2 et -2% pour les 20 années à venir.

Par ailleurs, le contrôle et la vérification du stockage étant difficiles, la rémunération du stockage du carbone sous les formes envisagées ci-dessus semble difficile à mettre en œuvre. Un système individualisé et fiable de contrôle serait trop coûteux à mettre en place. Il faudrait donc rémunérer le stockage sur la base de coefficients moyens qui négligeraient la variabilité spatio-temporelle du stockage (Antle et al. 2003, Feng et al. 2002, Ragot & Schubert 2006). Enfin, cette solution n'est pas durable puisque les

stocks cessent de croître après quelques dizaines d'années. Une politique encourageant le stockage de carbone dans les sols agricoles présenterait donc des difficultés de mise en œuvre.

Émetteur de GES, mais aussi puits de carbone, le secteur agricole peut jouer un rôle en limitant ses émissions ou en augmentant sa capacité de stockage de carbone. L'effet de serre ne se limite cependant pas à la concentration atmosphérique en GES.

## 4.2 Les phénomènes autres que les émissions de GES

### 4.2.1 Le rôle de l'albédo

En plus de la concentration atmosphérique en GES, la "couleur" de la surface terrestre joue un rôle dans l'absorption de l'énergie solaire et dans le système climatique. L'albédo d'une surface mesure la part de l'énergie solaire réfléchie vers l'atmosphère, le complément étant absorbé par le sol, le réchauffant. Ainsi, un miroir parfait a un albédo égal à 1, tandis qu'une surface noire un albédo égal à 0. Les surfaces terrestres selon leur "occupation" ont des albédos très différents. L'albédo d'une forêt de conifères varie entre 0.05 et 0.15, celui de surfaces cultivées entre 0.15 et 0.25 tandis qu'une surface enneigée peut avoir un albédo de 0.9. Toute modification de l'usage des sols pourrait donc avoir une incidence sur le système climatique. Ainsi, de Noblet et al. (1996) montrent le rôle de la végétation lors de la dernière glaciation. Au départ, les glaciations sont expliquées par les variations des paramètres astronomiques de la Terre. Dans ce cas, cependant, ce phénomène ne semble pas tout expliquer. D'autres interactions sont à prendre en compte. Leur étude souligne le rôle important de la dynamique naturelle de la végétation. L'entrée dans la dernière glaciation aurait ainsi été possible du fait de rétroactions entre la distribution des écosystèmes et le climat. L'extension d'un certain type de végétation (toundra) aurait ainsi augmenté l'albédo de la Terre et amplifié son refroidissement.

L'effet albédo n'est pas à négliger car il peut compenser et même parfois dépasser l'effet puits de carbone d'une forêt (Betts 2000). Si l'afforestation est une des solutions mises en avant pour réduire la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone, l'albédo de la surface ainsi modifiée pourrait être diminué. En effet, une forêt a en général un albédo plus faible qu'une surface cultivée, en particulier en cas de neige. Les arbres restent alors plus sombres qu'un paysage recouvert de neige. Une diminution de l'albédo associée à l'afforestation induit un forçage radiatif<sup>3</sup> positif sur le climat. Dans les zones les plus au nord, cet effet serait plus important que celui du stockage de carbone. L'albédo d'une terre cultivée serait ainsi de 0.2 environ tandis que celui d'une forêt dense de conifères s'élèverait à 0.15. En cas de neige, ces valeurs passeraient respectivement à 0.78 et 0.26 (Betts 2000). Dans les régions boréales, l'effet net de l'afforestation des zones cultivées pourrait résulter en un forçage radiatif positif. Dans les zones tempérées, la prise en compte de l'effet albédo pourrait diviser par deux l'effet net de l'afforestation sur le forçage radiatif et donc sur le climat.

---

<sup>3</sup>modification du bilan radiatif terrestre

### 4.2.2 Climat et cycle du carbone

Le cycle du carbone est un cycle biogéochimique qui correspond à l'ensemble des échanges d'éléments carbone. Il est particulièrement complexe du fait des différents échanges entre les quatre réservoirs de carbone que sont l'hydrosphère (océans), la lithosphère (les roches), la biosphère (la matière vivante) et l'atmosphère (Figure 4.2).

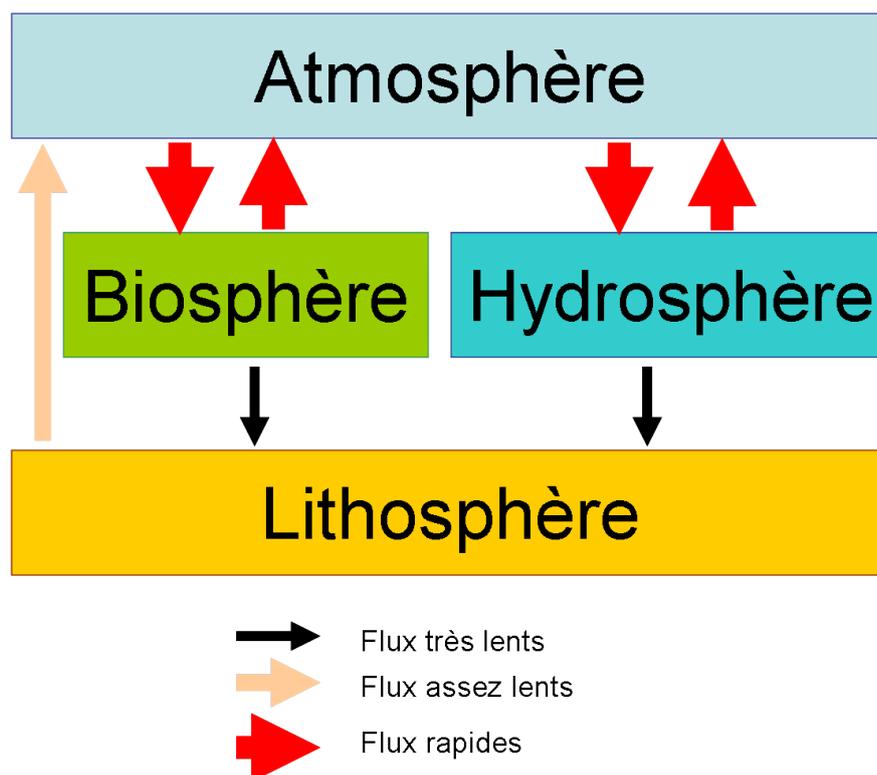


FIG. 4.2 – Le cycle du carbone

Les échanges entre l'atmosphère et la biosphère se font *via* la photosynthèse qui fixe le carbone dans la biomasse, et la respiration et la fermentation qui dégagent du  $\text{CO}_2$ . A cela, il faut ajouter la déforestation. Les échanges entre l'hydrosphère et l'atmosphère se font à travers la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'hydrosphère et parfois lors de dégazage. Les échanges biosphère-lithosphère se font par fossilisation. Les échanges hydrosphère-lithosphère se font par sédimentation au fond des océans. Enfin, les échanges entre l'atmosphère et la lithosphère se font par l'extraction et la combustion de charbon, de pétrole et de gaz. La figure 4.2 montre la vitesse des différents flux. Les flux rapides avec l'atmosphère sont susceptibles d'avoir des conséquences dans le court terme sur le climat (de la décennie à quelques siècles), les conséquences des flux assez lents ne s'observent que sur le moyen terme (quelques siècles), les conséquences des flux très lents ne s'observent que sur le très long terme (plusieurs millions d'années). Ces flux sont trop lents pour rééquilibrer les rejets de carbone d'origine anthropiques.

Des interactions existent entre le climat et le cycle du carbone. Tout changement de climat influe sur le bilan net de  $\text{CO}_2$  à la surface, qui en retour modifie la concentra-

tion de ce même gaz dans l'atmosphère (Friedlingstein et al. 2003). Le réchauffement climatique pourrait par exemple diminuer la dissolution du CO<sub>2</sub> dans les océans. La solubilité du dioxyde de carbone dans les océans dépend en effet de leur température. En augmentant cette température, suite à la hausse des taux atmosphériques de dioxyde de carbone, la capacité de stockage des océans diminue. De la même façon, le changement climatique modifie les interactions entre l'atmosphère et la biosphère, diminuant encore l'absorption de carbone.

En retour, le climat est influencé par la dynamique du cycle du carbone. Toute redistribution des surfaces fortement anthropisées (sous l'effet du changement climatique, par exemple) aura donc potentiellement un effet sur le climat et, par voie de conséquence, sur la redistribution prescrite en amont. Les terres agricoles dans les pays développés ont été particulièrement perturbées au cours du dernier siècle. Ces changements pourraient avoir eu une influence plus importante sur le climat que les émissions de GES (Pielke et al. 2002). Eastman et al. (2001*b*) et Eastman et al. (2001*a*) ont montré que le changement d'usage des sols, le pâturage et l'augmentation du CO<sub>2</sub> peuvent de façon significative, modifier le système climatique régional dans les grandes plaines centrales des États-Unis.

Le système climat-gestion des terres agricoles mérite donc d'être couplé pour évaluer au mieux le changement climatique futur et les coûts associés. Le travail mené par Sébastien Gervois dans le cadre de sa thèse (Gervois 2004) a mis en évidence que le changement d'exploitation des surfaces au cours du dernier siècle (modification de la nature des fertilisants, augmentation de ces fertilisants, introduction de l'irrigation) a dominé la réponse des surfaces continentales européennes en termes de bilans d'eau et de carbone, et de flux échangés avec l'atmosphère. Les effets liés au changement climatique et à sa variabilité, à l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> sont, en comparaison, négligeables. Il apparaît donc fondamental, au regard du changement climatique futur, de ne pas négliger l'aspect "gestion des terres agricoles" (de Noblet-Ducoudré et al. 2004).

La participation du secteur agricole au changement climatique étant claire, il est maintenant possible de s'intéresser aux moyens disponibles pour limiter le changement climatique *via* les activités agricoles. Deux voies semblent possibles : agir sur l'occupation des sols pour augmenter l'albédo des surfaces terrestres et agir sur les activités agricoles pour limiter les émissions et augmenter le stock de carbone dans les sols. Modifier l'occupation des sols agricoles afin d'augmenter l'albédo n'est pas encore suffisamment étudié à ce jour pour présenter ici des résultats quantifiés. Il est davantage attendu actuellement du secteur agricole qu'il réduise ses émissions en GES.

## 4.3 Possibilités d'abattement dans le secteur agricole

### 4.3.1 Évaluer les coûts d'abattement du secteur agricole

L'agriculture émettant une grande part des émissions de GES, il est naturel d'essayer d'impliquer ce secteur dans toute politique de réduction des émissions. Le protocole

de Kyoto permet, *via* l'article 3.4 de prendre en compte dans une certaine mesure le stockage de carbone dans les sols au travers de changements d'occupation des sols et de pratiques agricoles. Cependant, comme cela a été précisé plus haut, l'expertise Carbone-Sol de l'INRA montre qu'une politique spécifique est peu réalisable. Il semble plus facile de considérer l'ensemble des émissions du secteur, à savoir les émissions de méthane et de protoxyde d'azote, et de chercher à les réduire.

La connaissance des mécanismes physiques à l'origine des émissions agricoles permet d'envisager des méthodes de réduction de ces émissions. Ainsi, la façon dont les animaux sont nourris a un impact direct sur la fermentation entérique et les émissions qui en découlent. De même, les quantités d'engrais épandues sont en lien direct avec les émissions d'azote des sols agricoles (les conditions locales ont également une influence importante, Freibauer (2003)). Il semble donc possible en jouant sur ces deux facteurs de réduire les émissions d'origine agricole. La première question qui vient alors à l'esprit est : à quel coût ? En effet, si le secteur agricole peut participer aux réductions d'émissions a un coût supérieur à ceux d'autres secteurs, il ne serait pas efficace de l'engager dans la lutte contre le changement climatique. De Cara et al. (2005) évaluent ainsi les coûts d'abattement du secteur agricole européen à l'aide du modèle AROPAj. Ils montrent que le secteur agricole européen pourrait réduire ses émissions de 8% pour un coût de 55 € la tonne de CO<sub>2</sub> et de 4% à un coût de 20 € la tonne de CO<sub>2</sub>. En outre, ils insistent sur la variabilité spatiale des coûts d'abattement ainsi que sur les gains d'une politique utilisant des instruments de marché (permis négociables, taxe) plutôt qu'une norme uniforme.

Dans leur approche, les émissions sont calculées à partir des intrants azotés, de la nature de l'alimentation animale et de la méthodologie du GIEC (facteurs d'émission). Le facteur préconisé par le GIEC pour calculer les émissions de N<sub>2</sub>O des sols agricoles suite à l'utilisation d'engrais est ainsi de 1.25% N<sub>2</sub>O-N par kg d'azote sous forme d'engrais. Durandea et al. (2007) remettent en cause ces coefficients en couplant le modèle AROPAj à un modèle biophysique de croissance des plantes. Un autre facteur d'incertitude existe dans l'évaluation des PRG, coefficients permettant de comparer les émissions entre elles, en particulier ici les émissions de protoxyde d'azote et de méthane. Ces coefficients d'équivalence seront discutés lors du chapitre suivant.

### 4.3.2 De la théorie à la pratique : les projets domestiques

Le secteur agricole semble pouvoir fournir des solutions de réduction des émissions à un coût relativement faible. Le prix du CO<sub>2</sub> sur le marché européen de quotas (Powernext carbon) est resté supérieur à 20 € entre septembre 2005 et mars 2006, tandis que le Commissariat général du Plan propose de retenir une valeur tutélaire pour la tonne de CO<sub>2</sub> à 27 €. Cependant, les sources d'émissions sont diffuses, donc difficilement contrôlables.

Néanmoins, la Caisse des dépôts s'est intéressée à la meilleure façon d'inciter des secteurs à émissions diffuses, comme l'agriculture, dans les politiques de réductions des émissions de GES (Société des Agriculteurs de France 2006). Dans le cadre du protocole

de Kyoto, il est possible d'obtenir des crédits d'émissions en montant un projet visant à réduire les émissions dans un pays tiers (Mécanisme de Développement Propre ou Mise en Œuvre Conjointe selon que le pays hôte a ou non des engagements quantitatifs de réduction d'émissions). Les mécanismes de projets domestiques permettent d'appliquer ce schéma au sein d'un même pays. Le système des projets domestiques présente l'avantage d'inciter la réduction des émissions dans les secteurs qui ne sont pas facilement couverts par le protocole de Kyoto et qui sont de surcroît les secteurs les plus sensibles et les plus diffus : transport, bâtiment, agriculture et industrie. En élargissant le signal "prix" du carbone à ces secteurs, les projets domestiques permettent de créditer les actions de réduction d'émission conduites dans ces secteurs. Dans le secteur agricole et forestier, des réductions importantes d'émissions pourraient être obtenues grâce à des projets concernant notamment l'utilisation des biocombustibles, la gestion des déjections animales, la diminution de la fertilisation azotée et le stockage du carbone dans la biomasse. Par exemple, une modification dans la gestion des déjections, notamment pour le lisier de porcs et les déjections bovines par la mise en place d'un méthaniseur de déjections à tous les gros élevages porcins et bovins, permettrait de réduire les émissions de 3,4 MteqCO<sub>2</sub> par an. Dans ce cas, le méthane peut être récupéré pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

La mise en place du dispositif des mécanismes de projets a été officialisée par l'arrêté du 2 mars 2007 relatif à l'agrément des activités de projet relevant des articles 6 et 12 du protocole de Kyoto.

## Conclusion

Il est important de retenir que dans la problématique du changement climatique le secteur agricole est impliqué en aval. Grand émetteur de GES, il est amené à jouer un rôle important dans les efforts de réduction des émissions encadrés par des accords internationaux (protocole de Kyoto), européennes (directive sur les quotas), et nationales (PNAQ<sup>4</sup>, projets domestiques).

Les potentiels de réduction semblent importants, et à des coûts modérés. Néanmoins, le caractère diffus des émissions agricoles pose plusieurs difficultés, en particulier, celles liées aux coûts de contrôle et de transaction. En outre, de grandes incertitudes demeurent dans l'évaluation des émissions agricoles, car celles provenant des sols essentiellement dépendent fortement des conditions locales telles que le climat ou la nature du sol. Cependant, des potentiels d'abattement pourraient être mis en œuvre par l'intermédiaire des projets domestiques.

Le modèle AROPAj, présenté au chapitre 3 peut être employé pour évaluer ces coûts d'abattement du secteur agricole. A titre d'exemple, une application sera présentée au chapitre 6, dans le cadre d'une analyse de sensibilité à la valeur des PRG.

Par ailleurs, la nature des gaz émis par le secteur agricole invite à s'interroger sur les coefficients d'équivalence utilisés pour comptabiliser les émissions agricoles (méthane

---

<sup>4</sup>Plan National d'Allocation des Quotas

et protoxyde d'azote) en "équivalent CO<sub>2</sub>". Les Pouvoirs de Réchauffement Global sont en effet une notion clé, et pourtant débattue, dans l'évaluation des coûts d'abattement. C'est l'objet du chapitre suivant. Mais l'impact de l'agriculture sur le climat ne se résume pas à ses émissions. L'aspect comportemental, c'est à dire la façon d'utiliser le sol (et donc la valeur de l'albédo), est déterminant en termes de conséquences climatiques. Les projets d'afforestation visant à stocker du carbone dans les sols et la biomasse aérienne pourraient au final afficher un bilan inférieur à celui issu d'une pure comptabilité carbone.

Nous n'oublierons pas, enfin, que le secteur agricole est particulièrement vulnérable au changement climatique, cet aspect sera développé dans la troisième et dernière partie de ce document.



## Chapitre 5

# La mesure de l'équivalence des différents gaz à effet de serre

### Introduction

Depuis que la Russie a ratifié le protocole de Kyoto, aucun obstacle ne semble pouvoir empêcher son application en 2008<sup>1</sup>. Le protocole prévoit en plus d'engagements quantifiés de réductions des émissions pour les pays signataires (pays de l'annexe 1), la mise en place de trois mécanismes dits *de flexibilité* leur permettant d'atteindre leurs objectifs à moindre coût : un système de marché de permis d'émissions négociables ; la mise en œuvre conjointe (MOC) ; et le mécanisme de développement propre (MDP). Schématiquement, le MDP consiste pour un pays de l'annexe 1 à développer un projet réduisant les émissions dans un pays non engagé<sup>2</sup> et à recevoir en contrepartie des crédits carbone. Le 18 novembre 2004, l'UNFCCC<sup>3</sup> enregistrait le premier projet de MDP : *Brazil NovaGerar Landfill Gas to Energy* (EcoSecurities, Ltd 2004).<sup>4</sup> La particularité de ce projet est qu'il propose d'*émettre* –plutôt que d'*abattre*– du CO<sub>2</sub>. En effet, le projet consiste à récolter le méthane issu d'une décharge et le brûler afin de produire de l'électricité. L'intérêt pour l'effet de serre repose sur le fait que le méthane a un pouvoir de réchauffement global (PRG) 21 fois<sup>5</sup> plus élevé que le CO<sub>2</sub> alors que la réaction de combustion transforme chaque tonne de méthane en 2.75 tonnes de CO<sub>2</sub> (ou 44/16, le rapport des masses molaires). Par conséquent, la simple transformation par combustion d'un gaz en un autre (à PRG plus faible) permet de diviser approximativement par 8 (de 21 à 2.75) les émissions de GES (exprimée en tCO<sub>2</sub>-équivalent). Cet exemple est loin d'être anecdotique, un grand nombre de projets identiques ont depuis été accepté par l'UNFCCC. L'exemple ci-dessus illustre bien l'importance des autres gaz et le rôle

<sup>1</sup>Pour entrer en vigueur, il fallait qu'au moins 55 pays ratifient le traité et que les pays l'ayant ratifié émettent au total au moins 55% des émissions de CO<sub>2</sub> en 1990. La première condition était remplie depuis 2002, la deuxième en 2004 avec la ratification de la Russie.

<sup>2</sup>Le traité distingue les pays engagés, dits pays de l'annexe 1, qui ont des engagements de réductions d'émissions chiffrées, des autres, non engagés.

<sup>3</sup>United Nation Framework Convention on Climate Change

<sup>4</sup>pour plus d'informations sur ce projet et sur d'autres projets MDP <http://cdm.unfccc.int/Projects>.

<sup>5</sup>D'après les valeurs utilisées dans le protocole de Kyoto, qui sont celles retenues dans le Second Rapport du GIEC (2001).

du PRG quand il s'agit de créer des instruments économiques efficaces.

L'effet de serre est un phénomène naturel renforcé par les émissions anthropiques de plusieurs gaz. Cette nature plurielle a nécessité la prise en compte dans la conception des accords internationaux des gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone (le panier de gaz du protocole de Kyoto, article 5.3). Les études sur le sujet ont toutes clairement démontré la supériorité d'un point de vue économique des stratégies d'abattement "multi-gaz" par rapport à celles basées sur le seul CO<sub>2</sub>. L'idée sous-jacente est facile à comprendre : une cible prenant en compte plusieurs gaz permet d'utiliser toutes les options de réduction d'émissions, en particulier les plus efficaces, et d'atteindre ainsi un même objectif à un coût plus faible. L'amplitude des coûts évités, même si elle varie selon les modèles donnent l'avantage sans ambiguïté aux stratégies multi-gaz (Hayhoe et al. 1999, Reilly et al. 1999). Afin de comparer les gaz à effet de serre entre eux et les coûts d'abattement associés, ces études utilisent une règle d'équivalence basée sur le PRG. L'exemple donné ci-dessus montre le rôle clé que joue la notion de PRG, pondérant les gaz entre eux, et donc reflétant leurs prix relatifs.

Dans ce chapitre, nous nous répondrons à la question suivante : Dans quelle mesure les PRG peuvent être utilisés pour concevoir des instruments économiques contre le changement climatique ? Aussi, nous nous intéressons aux propriétés analytiques d'instruments économiques utilisant les PRG.

Dans la littérature, la question a été abordée de deux façons (Delucchi & Lipman 2003). La première consiste à analyser les trajectoires d'abattement permettant d'atteindre une cible donnée (en concentration de GES, en forçage radiatif ou en température) et à sélectionner celle associée au coût le plus faible. Ce type d'approche "coût-efficacité" a l'avantage d'éviter les difficultés liées à l'évaluation d'une fonction de dommages. Elles correspondent en outre à l'objectif affiché de la Convention de Rio (1992) qui est de maintenir les concentrations à un niveau tel que soit évitée toute interférence dangereuse avec le système climatique.

Le coût total pour atteindre une cible donnée peut être calculé en utilisant d'autres indices que le PRG et ensuite comparé à celui utilisant le PRG (Manne & Richels 2001, O'Neil 2003, Shine et al. 2005, Sarofim et al. 2005). Le deuxième type d'approche cherche plutôt à résoudre le problème global, à savoir trouver la solution optimale en abattement qui minimise la somme des coûts d'abattement et des dommages (Reilly & Richards 1993, Kandlikar 1996, Moslener & Requate 2001, par exemple).

Le modèle développé ci-dessous tient plus de la deuxième approche. Cependant, il se différencie des autres études sur plusieurs aspects. D'abord, les coûts d'abattement ne sont pas explicitement modélisés comme dans les modèles minimisant les coûts (Kandlikar 1996, Moslener & Requate 2001), mais plutôt représentés à travers les substitutions induites dans les profils de consommation et leurs impacts sur le bien-être (non environnemental). Cette formulation plus générale nous permet en particulier de prendre en compte des fonctions de coûts d'abattement non séparables. Ensuite, nous analysons la relation entre l'horizon temporel utilisé pour calculer les PRG et le taux d'actualisation. Cette discussion ne serait pas possible dans le cadre retenu par Kandli-

kar (1996) par exemple, où l'horizon temporel du planificateur est supposé être le même que celui utilisé pour les PRG. Enfin, nous nous intéressons aux propriétés d'instruments basés sur le PRG.

La section 5.1 reprend et discute les principales critiques de la notion de PRG. La section 5.2 présente le cadre général d'analyse utilisé. Nous discutons également des principales caractéristiques de la solution et présentons l'expression générale d'une taxe basée sur les PRG. Dans le cas particulier d'une relation linéaire entre les dommages et la concentration en GES, nous soulignons la relation entre l'horizon choisi pour le calcul des PRG et le taux d'actualisation (section 5.3). Cette analyse montre que l'horizon temporel choisi dans le calcul des PRG définit implicitement des taux d'actualisation différents pour chaque GES. La section 5.4 présente la solution dans le cas d'une fonction de bien-être quadratique et de facteurs d'émissions constants. La section 5.5 examine le cas de dommages quadratiques.

## 5.1 Pouvoir de Réchauffement Global : une perspective économique

La mise en place d'une cible multi-gaz nécessite un indice permettant de comparer les gaz entre eux et de ramener les quantités émises de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc... dans une unité commune (par exemple la tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>). Fuglestad et al. (2003) passent en revue les indices existants, parmi lesquels le PRG est le plus communément utilisé. Cet indice trouve son origine dans la méthodologie développée pour comparer les substances responsables de la destruction de l'ozone (Lashof & Ahuja 1990). Il est calculé selon la formule suivante (IPCC 2001) :

$$\text{GWP}_{j,\text{CO}_2}(\hat{T}) = \frac{\int_0^{\hat{T}} z_j^n(t) \theta_j(t) dt}{\int_0^{\hat{T}} z_{\text{CO}_2}^n(t) \theta_{\text{CO}_2}(t) dt} \quad (5.1)$$

où  $z_j^n(t)$  et  $z_{\text{CO}_2}^n(t)$  représentent les quantités restant dans l'atmosphère des gaz  $j$  et de CO<sub>2</sub>, respectivement, à l'instant  $t$  après l'émission d'1 kg à l'instant  $t = 0$ .  $\theta_j(t)$  et  $\theta_{\text{CO}_2}(t)$  représentent les forçages radiatifs instantanés des gaz  $j$  et de CO<sub>2</sub>, respectivement. Le PRG représente donc le forçage radiatif du gaz  $j$  sur un horizon  $\hat{T}$  rapporté à celui du CO<sub>2</sub>.

À première vue, le concept de PRG est avant tout un concept physique et non économique. Cependant, cet indice joue un rôle économique crucial, comme l'exemple introductif l'a montré : il détermine le prix relatif auquel les quantités d'émissions de GES peuvent être échangées.

Ce concept soulève plusieurs difficultés. D'abord, la notion d'équivalent CO<sub>2</sub> n'est pas appropriée. En effet, du point de vue du forçage radiatif, une tonne de méthane ne peut se substituer à un nombre donné de tonnes de CO<sub>2</sub> car leur évolution dans l'atmosphère est différente. En outre, il existe encore de nombreuses incertitudes sur l'évolution des GES dans l'atmosphère (demi-vie, décomposition en autres GES, interactions...). Ensuite, le choix de l'horizon  $\hat{T}$  est déterminant et le choix d'un horizon

de 100 ans dans les PRG utilisés dans le cadre du protocole de Kyoto relève plus de la convention arbitraire que d'un résultat fondé scientifiquement. Enfin, la définition du PRG n'a pas de lien avec un objectif économique et comme on le verra plus bas, suppose un taux d'actualisation nul, hypothèse rarement retenue en économie.

### 5.1.1 Comparaison du PRG et d'un indice économique d'équivalence

Dans l'analyse de Kandlikar (1996), l'indice d'équivalence entre les gaz est calculé à partir d'un problème de contrôle optimal visant la minimisation des coûts liés aux émissions : les coûts d'abattement et les dommages. Il s'agit de résoudre le problème suivant :

$$\min \int_0^T \{A_1(a_1(t)) + A_2(a_2(t)) + D(z_1(t), z_2(t))\} \exp(-\delta t) dt \quad (5.2)$$

sous les contraintes :

$$\dot{z}_1 = -\gamma_1 z_1(t) + \beta(s_1(t) - a_1(t)) \quad (5.3)$$

$$\dot{z}_2 = -\gamma_2 z_2(t) + s_2(t) - a_2(t) \quad (5.4)$$

où  $D$  et  $\delta$  sont respectivement la fonction de dommage et le taux d'actualisation et  $A_i$ ,  $a_i$ ,  $z_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $s_i$  sont respectivement le coût d'abattement, le niveau d'abattement, la concentration atmosphérique, le temps de demi-vie, et les émissions dans le cadre du scénario "Business as Usual" du gaz  $i$ .  $\beta$  correspond à la fraction de CO<sub>2</sub> non absorbée (par les océans,...).

Le Hamiltonien  $H$  du problème est donné par :

$$H = \{A_1(a_1(t)) + A_2(a_2(t)) + D(z_1(t), z_2(t))\} \exp(-\delta t) + \lambda_1(t)[- \tau_1 z_1(t) + \beta(s_1(t) - a_1(t))] + \lambda_2(t)[- \tau_2 z_2(t) + s_2(t) - a_2(t)] \quad (5.5)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$\frac{\partial H}{\partial a_i} = 0 \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z_i} = -\dot{\lambda}_i \quad (5.7)$$

Ce qui nous conduit aux équations :

$$\lambda_1 = \frac{1}{\beta} \frac{\partial A_1}{\partial a_1} \exp(-\delta t) \text{ et } \lambda_2 = \frac{\partial A_2}{\partial a_2} \exp(-\delta t) \quad (5.8)$$

$$\dot{\lambda}_1 = \tau_1 \lambda_1 - \left[ \frac{\partial D(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right] \exp(-\delta t) \text{ et } \dot{\lambda}_2 = \tau_2 \lambda_2 - \left[ \frac{\partial D(z_1, z_2)}{\partial z_2} \right] \exp(-\delta t) \quad (5.9)$$

A partir des équations ci-dessus, en éliminant  $\lambda_i$  et en posant  $\frac{\partial A_i}{\partial a_i} = M_i$  (coût marginal d'abattement du gaz  $i$ ), on obtient :

$$\dot{M}_1 = (\tau_1 + \delta)M_1 - \beta \left[ \frac{\partial D(z_1, z_2)}{\partial z_1} \right] \quad \text{et} \quad \dot{M}_2 = (\tau_2 + \delta)M_2 - \left[ \frac{\partial D(z_1, z_2)}{\partial z_2} \right] \quad (5.10)$$

Dans le cas simple où le dommage ne dépend que de la hausse de la température  $\theta$  et qu'on modélise  $\theta$  par l'équation :

$$\theta(t) = \int_0^t R(z_1(\tau), z_2(\tau))G(t - \tau) d\tau \quad (5.11)$$

où  $G(t)$  modélise la réponse du système climatique, prenant en compte un phénomène de retard.

En écrivant :

$$\frac{\partial D(z_1, z_2)}{\partial z_i} = \frac{\partial D}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z_i} \quad (5.12)$$

Sous l'hypothèse de linéarité et de séparabilité de  $R$  ( $R(z_1, z_2) = R_1(z_1) + R_2(z_2)$ ), Kandlikar aboutit au résultat suivant, où  $F_i(\tau)$  est l'augmentation additionnelle de la concentration en gaz  $i$  par unité émise au temps initial<sup>6</sup> :

$$M_i(t) = \int_t^T \frac{\partial D(\theta(u))}{\partial \theta(u)} \left\{ \int_0^u \frac{\partial R(z_i(\tau))}{\partial z_i(\tau)} G(u - \tau) F_i(\tau) d\tau \right\} \exp(-ru) du \quad (5.13)$$

Kandlikar définit l'indice d'équivalence entre gaz comme le ratio des coûts marginaux d'abattement  $M_1/M_2$ .

A partir de cette définition, on retrouve l'expression du PRG dans le cas particulier où :

- le dommage est une fonction linéaire de la température,
- la fonction  $H(u - \tau)$  peut être remplacée par un dirac et,
- pour un taux d'actualisation nul.

On voit donc que la notion de PRG pour évaluer le poids des différents GES par rapport au CO<sub>2</sub> repose sur des hypothèses fortes qui peuvent être en contradiction avec celles employées dans l'analyse économique.

### 5.1.2 Remise en cause du PRG dans une perspective économique

La littérature remettant en cause la notion de PRG est riche. Dans une analyse du débat sur la pertinence du PRG, O'Neil (2000) a identifié deux difficultés majeures. La première est relative à la sélection d'un critère dans la longue chaîne de causalité depuis les émissions jusqu'aux coûts économiques des dommages (voir aussi Fuglestad et al. (2003)). La notion de PRG est centrée sur un maillon de début de la chaîne (le forçage radiatif). A l'opposé, des indices d'équivalence alternatifs que l'on peut trouver dans la littérature économique (Reilly & Richards 1993, Kandlikar 1996, Manne & Richels 2001) sont basés sur le rapport entre les valeurs marginales sociales des concentrations de chaque GES. Par conséquent, ils sont construits à partir de la fin

<sup>6</sup>Par exemple, on considère souvent pour le CO<sub>2</sub> la fonction  $F_i(t) = \beta \exp(-\tau_i t)$

de la chaîne de causalité (coûts d'abatement ou dommages économiques). Ce n'est donc pas surprenant que des indices basés sur des critères différents aboutissent à des résultats divergents dans la mesure où la progression dans la chaîne de causalité ne se fait pas de façon linéaire. La conclusion de cette discussion pourrait être que les difficultés conceptuelles associées au PRG apparaissent moins du fait de sa définition elle-même que de l'usage qui en est fait dans les études économiques. Le PRG ne peut simplement pas représenter des variables qu'il n'était pas censé mesurer à l'origine, à moins d'hypothèses très restrictives. C'est l'argument principal de Kandlikar (1996), qui met à jour les hypothèses économiques implicites sous lesquelles le PRG est égal au rapport des prix fictifs.

La deuxième difficulté tient à la façon dont le critère d'intérêt est évalué. Est ce que les mesures instantanées sont appropriées? Est ce que des mesures intégrées sur une période donnée serait meilleures? Si ce dernier cas est retenu, quel est l'horizon le plus adapté? Du fait de la nature dynamique du changement climatique, la plupart des indices d'équivalence, comme celui de Kandlikar ou le PRG, sont intégrés sur une période donnée. Contrairement au PRG, Kandlikar introduit un taux d'actualisation. En effet, ne pas actualiser déforme les trajectoires d'abatement entre les gaz à courte durée de vie et ceux à longue durée de vie (Tol et al. 2003, Michaelowa 2003). Par conséquent, ne pas actualiser les indices d'équivalence conduit à choisir des trajectoires d'abatement qui ne correspondent pas aux arbitrages inter-temporels optimaux.

Le PRG reste un concept clé pour les politiques et les scientifiques. Néanmoins, depuis son introduction dans le premier rapport du GIEC au début des années 1990 (Lashof & Ahuja 1990), la plupart des évaluations prenant en compte plusieurs gaz se fondent sur le PRG. En effet, il semble être l'indice le plus opérationnel pour les négociations, aucun autre indice ne l'a jamais supplanté. Une des principales raisons à cela est que, à tort ou à raison, il est plus facile de se mettre d'accord sur un indice fondé sur les forçages radiatifs et les durées de vie dans l'atmosphère (issus de la science "dure") plutôt que sur un indice qui dépend d'évaluations économiques des dommages du changement climatique et de taux d'actualisation de long terme.

Pour résumer, les trois principales critiques que l'on retrouve contre l'utilisation du PRG à des fins d'analyse économique sont : (i) une hypothèse implicite sur une fonction de dommages linéaire, (ii) l'absence d'actualisation, (iii) un horizon temporel arbitraire. Par la suite, nous reprendrons ces critiques pas à pas. Après la présentation du modèle général (section 5.2), nous supposons que (i) est vraie afin de se concentrer sur les 2 dernières critiques (sections 5.3 et 5.4). Enfin, nous reviendrons sur l'hypothèse de linéarité de la fonction de dommages dans la section 5.5.

## 5.2 Cadre d'analyse : Un problème de contrôle optimal à plusieurs gaz

### 5.2.1 Formulation du problème général

On considère une économie à  $m$  biens privés ( $i = 1, \dots, m$ ). Les quantités d'équilibre à l'instant  $t$  sont représentées par le vecteur  ${}^t\mathbf{x}_t = (x_{1t}, \dots, x_{mt})$ . La consommation et/ou la production de ces biens engendrent les émissions de  $n$  gaz à effet de serre ( $j = 1, \dots, n$ ) dans des quantités  ${}^t\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}_t) = (\varepsilon_1(\mathbf{x}_t), \dots, \varepsilon_n(\mathbf{x}_t))$ . L'évolution des concentrations atmosphériques  $z_{jt}$ <sup>7</sup> de ces gaz dans l'atmosphère obéit aux équations<sup>8</sup> :

$$\dot{z}_{jt} = \dot{z}_j^n(t) + \dot{z}_j^a(t) = -\tau_{jt}z_{jt} + \varepsilon_j(\mathbf{x}_t) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.14)$$

Le vecteur associé est noté  ${}^t\mathbf{z}_t = (z_{1t}, \dots, z_{nt})$ .

Les deux termes de droite de l'équation (5.14) reflètent respectivement l'évolution naturelle et anthropique de l'accumulation du gaz  $j$  dans l'atmosphère. Un processus d'absorption naturel tend à faire diminuer  $z_{jt}$  au taux  $\tau_{jt}$ . Cela revient à supposer que si les émissions d'origine anthropique étaient nulles, la concentration atmosphérique du gaz  $j$  reviendrait à son niveau pré-industriel au taux  $\tau_{jt}$ . En toute généralité,  $\tau_{jt}$  n'est pas constant. Il reflète en effet les interactions chimiques entre les composants atmosphériques et peut dépendre de la composition de l'atmosphère. Néanmoins, on sait très peu de choses sur la forme fonctionnelle de  $\tau_{jt}$ . Par la suite, nous considérerons que  $\tau_j$  est constant. La durée de demi-vie du gaz  $j$  dans l'atmosphère est donc égal à  $1/\tau_j$ .

Nous évaluerons le bien-être (hors considération environnementale) par une fonction  $U(\mathbf{x}_t)$ .  $U(\cdot)$  est supposée continûment différentiable. On suppose également qu'il existe un unique vecteur de consommation  $\mathbf{x}_t^{\text{BAU}}$  (BAU pour *business-as-usual*) qui maximise  $U(\cdot)$ . Pour toutes les valeurs de  $\mathbf{x}$  qui seront considérées par la suite, nous supposons que  $U(\cdot)$  est croissante par rapport à  $x_i$  ( $U'_{x_i} > 0$  pour  $x_i < x_i^{\text{BAU}}$ ).

L'impact des concentrations en GES sur le climat est limité à la variation de la température moyenne, noté  $\theta(\mathbf{z})$ . Chaque gaz  $j$  contribue à l'augmentation de température via son forçage radiatif  $\theta'_{z_j}(\mathbf{z})$ , qui est supposé positif. Aucun effet retard n'est considéré ici.

Les dommages économiques liés au changement climatique sont notés  $D(\theta)$ <sup>9</sup>. Suivant les hypothèses trouvées dans la littérature,  $D(\cdot)$  est supposée croissante et convexe par rapport à  $\theta$  ( $D'(\cdot) > 0$  et  $D''(\cdot) \geq 0$ ). Le changement climatique est supposé être une externalité globale pure : les agents n'internalisent pas spontanément l'effet sur le climat de leurs décisions économiques. En outre, nous supposerons que le changement climatique entraîne une perte économique qui affecte directement le surplus total. Le taux d'actualisation est noté  $\delta$ . Le problème que doit résoudre le planificateur social

<sup>7</sup>  $z_{jt}$  représente plus exactement l'écart entre la concentration à  $t$  et la concentration pré-industrielle.

<sup>8</sup> On considère ici le coefficient  $\beta$  égal à 1.

<sup>9</sup> Cette représentation suppose une description simplifiée du système climatique où le forçage radiatif total est lié de façon linéaire à la température moyenne. Le coefficient de cette relation linéaire est le paramètre de sensibilité du climat (IPCC 2001).

qui cherche à maximiser le bien être sur un horizon infini s'écrit :

$$\max_{\mathbf{x}_t} \int_0^{\infty} [U(\mathbf{x}_t) - D(\theta(\mathbf{z}_t))] \exp(-\delta t) dt \text{ s.c.} \quad (5.14) \quad (5.15)$$

A partir du Hamiltonien du problème, les conditions d'optimalité associées sont :

$$\mathbf{x} \in \arg \max_{\mathbf{x}} \mathcal{H} = U(\mathbf{x}) - D(\theta(\mathbf{z})) - \sum_{j=1}^n \lambda_j (-\tau_j z_j + \varepsilon_j(\mathbf{x}_t)) \quad (5.16)$$

$$\dot{\lambda}_j = \delta \lambda_j + \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial z_j} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.17)$$

Soit  $\mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]}$  et  $\mathbf{H}_{[\varepsilon_j, \mathbf{x}]}$  les matrices  $m \times m$  Hessiennes de  $U$  et  $\varepsilon_j$ , respectivement. La concavité du Hamiltonien par rapport à la variable de commande  $\mathbf{x}$  est assurée du fait que la matrice Hessienne de  $\mathcal{H}$  par rapport à  $\mathbf{x}$  est définie négative. Par conséquent, il suffit que la matrice  $(\mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \mathbf{H}_{[\varepsilon_j, \mathbf{x}]})$  soit non singulière et définie négative. Tous les  $\lambda_j$  sont positifs à l'optimum<sup>10</sup>. Par conséquent, les hypothèses standards sur la concavité de  $U(\cdot)$  et  $\varepsilon_j(\cdot)$  ( $\mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]}$  définie négative et  $\mathbf{H}_{[\varepsilon_j, \mathbf{x}]}$  semi-définie positive) sont suffisantes pour assurer que le Hamiltonien est concave par rapport aux variables de commande. Les conditions nécessaires sont donc également suffisantes pour avoir les conditions d'optimalité statiques qui découlent de (5.16) :

$$\phi_i(\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{x}) = U'_{x_i}(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^n \lambda_j \varepsilon'_{j, x_i}(\mathbf{x}) = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5.18)$$

L'équation (5.18) implique que, à chaque instant, le bien-être marginal issu de la consommation d'un bien  $i$  est égal à la somme pondérée par les prix fictifs des émissions associées à  $x_i$ . A l'optimum,  $\lambda_j$  reflète donc la valeur marginale sociale des émissions de gaz  $j$ .

L'équation (5.18) définit localement une fonction vecteur  $\mathbf{f}(\cdot)$  telle que  $\mathbf{x}^* = \mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda})$  au voisinage de  $\boldsymbol{\lambda}^*$ , solution de (5.16)–(5.17). Par conséquent,  $\mathbf{f}(\cdot)$  définit implicitement les niveaux optimaux de consommation des biens comme une fonction de leur valeur sociale. Les conditions du théorème des fonctions implicites sont vérifiées car la matrice jacobienne de  $\phi$  par rapport à  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{J}_{[\phi, \mathbf{x}]}(\boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \mathbf{H}_{[\varepsilon_j, \mathbf{x}]}$ , est non singulière en  $\boldsymbol{\lambda}^*$ .  $\mathbf{J}_{[\mathbf{f}, \mathbf{x}]}$  représente la variation marginale dans la consommation comme une fonction des prix fictifs et s'obtient en différenciant totalement (5.18) par rapport à  $\mathbf{x}$  et  $\boldsymbol{\lambda}$  :

$$\mathbf{J}_{[\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}]}(\boldsymbol{\lambda}^*) = \left( \mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]}(\mathbf{x}^*) - \sum_{j=1}^n \lambda_j^* \mathbf{H}_{[\varepsilon_j, \mathbf{x}]}(\mathbf{x}^*) \right)^{-1} {}^t \mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}]}(\mathbf{x}^*) \quad (5.19)$$

<sup>10</sup>Les expressions du Hamiltonien (5.16) et des équations d'évolution des prix fictifs (5.17) sont modifiées par rapport à leur expression canonique de sorte que les  $\lambda_j$  sont positifs. En fait, la variable d'état (concentrations) a ici un impact négatif sur la fonction objectif. La co-variable canonique associée à l'équation d'évolution de  $z_j$  devrait donc être négative. Sans perdre en généralité,  $\lambda_j$  est choisi par la suite comme l'opposé du prix fictifs standard.

Notons que le vecteur à  $m$  composantes  ${}^t\mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}]}(\mathbf{x}^*)\boldsymbol{\lambda}$  représente le profil marginal d'émissions évaluées aux prix  $\boldsymbol{\lambda}$ . La  $i$ -ème entrée de ce vecteur correspond à la valeur sociale marginale des émissions totales causées par le bien  $i$ .

$\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda})$  représente la demande sociale en biens privés comme fonction des "prix" des gaz à effet de serre. Les coûts d'abattement marginaux pourraient donc être dérivés de l'équation (5.19) comme la perte marginale en utilité privée résultant d'un changement dans les niveaux de consommation et doit être comparée à la valeur marginale sociale des GES. Contrairement aux modèles minimisant les coûts (Kandlikar 1996, Moslener & Requate 2001), la formulation présentée ici est plus générale et en particulier ne nécessite pas d'hypothèse spécifique sur la séparabilité des coûts d'abattement. Notons que  $\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda})$  dépend des taux marginaux de substitution entre tous les biens à travers  $\mathbf{H}_{[U, \mathbf{x}]}$ .

En remplaçant  $\mathbf{x}$  par  $f(\boldsymbol{\lambda})$  dans les équations (5.17) et en les combinant avec les équations (5.14), la dynamique des prix fictifs et des concentrations peut s'écrire :

$$\dot{z}_j = -\tau_j z_j + \varepsilon_j(\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda})) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.20)$$

$$\dot{\lambda}_j = (\delta + \tau_j)\lambda_j - D'(\theta(\mathbf{z}))\theta'_{z_j}(\mathbf{z}) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.21)$$

### 5.2.2 Linéarisation et état stationnaire

Soit  $\boldsymbol{\Delta}_{[-\tau]}$  et  $\boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]}$  les matrices  $n \times n$  diagonales avec  $(-\tau_j)$  et  $(\delta + \tau_j)$  la  $j$ -ième composante, respectivement. En prenant le développement de Taylor au premier ordre des équations (5.20)–(5.21), le système différentiel se linéarise au voisinage de tout point  $(\bar{\mathbf{z}}, \bar{\boldsymbol{\lambda}})$  :

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{z}} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Delta}_{[-\tau]} & \mathbf{A}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}) \\ \mathbf{B}(\bar{\mathbf{z}}) & \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{a}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}) \\ \mathbf{b}(\bar{\mathbf{z}}) \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

où

$$\mathbf{A}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}) = \mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}]}(\mathbf{f}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}))\mathbf{J}_{[\mathbf{f}, \boldsymbol{\lambda}]}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}) \text{ et } \mathbf{a}(\bar{\boldsymbol{\lambda}}) = \varepsilon(\mathbf{f}(\bar{\boldsymbol{\lambda}})) - \mathbf{A}(\bar{\boldsymbol{\lambda}})\bar{\boldsymbol{\lambda}} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{B}(\bar{\mathbf{z}}) = -D'' \cdot \mathbf{J}_{[\theta, \mathbf{z}]}(\bar{\mathbf{z}}) {}^t\mathbf{J}_{[\theta, \mathbf{z}]}(\bar{\mathbf{z}}) - D' \cdot \mathbf{H}_{[\theta, \mathbf{z}]}(\bar{\mathbf{z}})\mathbf{b}(\bar{\mathbf{z}}) = -D' \mathbf{J}_{[\theta, \mathbf{z}]}(\bar{\mathbf{z}}) - \mathbf{B}(\bar{\mathbf{z}})\bar{\mathbf{z}} \quad (5.24)$$

$\mathbf{A}(\bar{\boldsymbol{\lambda}})$  représente l'approximation linéaire de la variation optimale des émissions associée à une variation marginale des prix fictifs.  $\mathbf{B}(\bar{\mathbf{z}})$  représente la variation du dommage associée à une variation marginale des concentrations. L'état stationnaire  $(\mathbf{z}^\infty, \boldsymbol{\lambda}^\infty)$  du système (5.20)–(5.21) –s'il existe– est défini par  $\dot{\mathbf{z}} = 0$  et  $\dot{\boldsymbol{\lambda}} = 0$ . Il est possible de le calculer de façon itérative en résolvant le système linéarisé (5.22) au voisinage de  $(\mathbf{z}^\infty, \boldsymbol{\lambda}^\infty)$ .

### 5.2.3 Dynamique du rapport des prix fictifs

A partir de l'équation d'évolution de  $\lambda_j$  (5.21), on peut facilement voir que  $\lambda_j^*$  représente la valeur intégrée dans le temps du dommage marginal dû au gaz  $j$ , actualisé

(au taux  $\delta$ ) et prenant en compte la durée de vie du gaz ( $\tau_j$ ). Par conséquent, avec l'équation (5.18), cette équation est la transposition dans un cadre dynamique du résultat statique standard, où la valeur sociale des émissions serait égale au dommage marginal. Le rapport des prix fictifs de deux gaz  $j$  et  $k$  choisis de façon arbitraire donne donc la valeur sociale relative du gaz  $j$  par rapport au gaz  $k$ . Si le gaz  $k$  est choisi comme référence, une taxe de premier rang sur les émissions du gaz  $j$ , qui décentralise l'optimum serait  $\frac{\lambda_j^*}{\lambda_k^*}$ . A priori, cette valeur n'est pas constante dans le temps.

En dérivant par rapport au temps et en utilisant l'équation (5.21), on obtient :

$$\left(\frac{\dot{\lambda}_j}{\lambda_k}\right) = \frac{\lambda_j}{\lambda_k}(\tau_j - \tau_k) + \frac{D'(\theta(\mathbf{z}))\theta'_{z_k}(\mathbf{z})}{\lambda_k} \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_k} - \frac{\theta'_{z_j}(\mathbf{z})}{\theta'_{z_k}(\mathbf{z})}\right) \quad (5.25)$$

L'évolution du rapport des prix fictifs est dirigée par deux quantités importantes : (i) la différence entre les taux d'absorption naturelle ( $\tau_j - \tau_k$ ), et (ii) le rapport des impacts moyens sur la température ( $\theta'_{z_j}(\mathbf{z})/\theta'_{z_k}(\mathbf{z})$ ). A partir de l'équation (5.25), on peut également voir que si les taux d'absorption sont identiques, le signe de la dérivée du rapport des prix fictifs dépend seulement de la position relative de  $\lambda_j/\lambda_k$  par rapport à  $\theta'_{z_j}(\mathbf{z})/\theta'_{z_k}(\mathbf{z})$ .

Supposons, sans perdre en généralité, que  $\tau_j \geq \tau_k$ , c'est-à-dire que le gaz  $j$  a une durée de vie plus courte que le gaz  $k$ . Puisque  $\lambda_j$  et  $\lambda_k$  sont positifs, le premier terme de l'équation (5.25) est positif. Le dommage est supposé croissant par rapport à la température, et l'impact marginal de la concentration en gaz  $k$  sur la température est positif. Par conséquent, le second terme de l'équation (5.25) dépend de la position relative des rapports des prix fictifs et des forçages radiatifs. Si le gaz  $j$ , en plus d'être à plus courte durée de vie que le gaz  $k$ , a un assez faible impact sur la température –i.e.,  $\theta'_{z_j}(\mathbf{z})/\theta'_{z_k}(\mathbf{z})$  est assez petit– alors  $\lambda_j/\lambda_k$  est croissant<sup>11</sup>. Si le forçage radiatif du gaz  $j$  est assez grand par rapport à celui du gaz  $k$ , le signe de (5.25) est ambigu. Ceci illustre la possibilité d'une évolution non monotone des prix fictifs comme celle décrite par Moslener & Requate (2001).

#### 5.2.4 Taxe sur les émissions

Dans le problème décrit par (5.15), chaque gaz est pris en compte séparément. Par conséquent, dans ce cas, il n'y a pas besoin d'utiliser d'indice d'équivalence pour comparer ou agréger les émissions. La section précédente a permis de montrer que l'indice d'agrégation approprié est le vecteur des prix fictifs optimaux  $\boldsymbol{\lambda}^*$ . Les composantes de  $\boldsymbol{\lambda}^*$  ne sont ni nécessairement constantes ni monotones.

Supposons maintenant qu'il existe un indice d'équivalence constant imposé pour chaque gaz de sorte que le planificateur central ne peut l'utiliser comme variable de commande. Cet indice convertit les émissions de gaz  $j$  en équivalent gaz 1. Soit  ${}^t\boldsymbol{\gamma} = (1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$  le vecteur des indices d'équivalence des gaz  $j$  en gaz 1. Toutes

---

<sup>11</sup>Dans le cas d'un rapport des forçages radiatifs constant, si à un instant  $\lambda_j/\lambda_k$  est plus grande que  $\theta'_{z_j}(\mathbf{z})/\theta'_{z_k}(\mathbf{z})$ , alors  $\lambda_j/\lambda_k$  est également croissant.

les composantes du vecteur  $\gamma$  sont constantes. Les émissions totales en tonnes d'équivalent gaz 1 sont  ${}^t\gamma \cdot \varepsilon(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \gamma_j \varepsilon_j(\mathbf{x})$ . Soit  $p_t$  la taxe sur les émissions exprimée en numéraire par tonne d'équivalent gaz 1.

La maximisation par les agents privés (à qui on fait payer le prix  $p_t$  de l'externalité) de la part non environnementale du surplus conduit aux conditions suivantes :

$$U'_{x_i}(\mathbf{x}_t) = p_t \sum_{j=1}^n \gamma_j \varepsilon'_{x_i,j}(\mathbf{x}) \quad (i = 1, \dots, m) \quad (5.26)$$

En utilisant un argument similaire à celui utilisé dans la section 5.2.1, les équations (5.26) définissent implicitement le vecteur de consommation  $\tilde{\mathbf{x}}_t$  comme une fonction  $\mathbf{g}(p_t \gamma)$ , qui dépend du vecteur des taxes sur les émissions converties en tonnes d'équivalent gaz 1 ( $p_t \gamma$ ). Le problème auquel fait face le planificateur social est donc modifié :

$$\max_{p_t} \int_0^{\infty} [U(\mathbf{g}(p_t \gamma)) - D(\theta(\mathbf{z}))] e^{-\delta t} dt \quad (5.27)$$

$$\text{s.t.} \quad \dot{z}_{jt} = -\tau_j z_{jt} + \varepsilon_j(\mathbf{g}(p_t \gamma)) \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.28)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité sont :

$$p_t \in \arg \max_{p_t} \tilde{\mathcal{H}} = U(\mathbf{g}(p_t \gamma)) - D(\theta(\mathbf{z})) - \sum_{j=1}^n \mu_j (-\tau_j z_j + \varepsilon_j(\mathbf{g}(p_t \gamma))) \quad (5.29)$$

$$\dot{\mu}_j = \delta \mu_j + \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial z_j} \quad (j = 1, \dots, n) \quad (5.30)$$

où  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_j)_{j=1, \dots, n}$  sont les nouveaux prix fictifs associés aux équations d'évolution des variables d'état. En différenciant  $\tilde{\mathcal{H}}$  par rapport à  $p_t$ , avec l'équation (5.26), et en résolvant en  $p_t$ , on obtient :

$$p_t = \frac{{}^t\gamma \cdot (\mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}_t]}(\mathbf{g}(p_t \gamma)) \mathbf{J}_{[\mathbf{g}, p_t \gamma]}(p_t \gamma)) \boldsymbol{\mu}}{{}^t\gamma \cdot (\mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}_t]}(\mathbf{g}(p_t \gamma)) \mathbf{J}_{[\mathbf{g}, p_t \gamma]}(p_t \gamma)) \gamma} \quad (5.31)$$

où  $\mathbf{J}_{[\mathbf{g}, p_t \gamma]}(p_t \gamma)$  est la matrice Jacobienne de  $\mathbf{g}$ .

L'équation (5.31) donne l'expression générale de la taxe fondée sur la règle d'équivalence  $\gamma$ . Si pour tout  $j$ ,  $\gamma_j$  est le PRG standard du gaz  $j$ , alors  $p_t$  est la taxe optimale sur les émissions fondée sur le PRG. La taxe optimale est définie localement comme une combinaison linéaire des valeurs optimales des prix fictifs  $\boldsymbol{\mu}$  du problème modifié. La  $j$ ème composante du vecteur  ${}^t\gamma \cdot (\mathbf{J}_{[\varepsilon, \mathbf{x}_t]} \cdot \mathbf{J}_{[\mathbf{g}, p_t \gamma]}(p_t \gamma))$  est la variation marginale des émissions en gaz  $j$  convertie en équivalent gaz 1 résultant d'un changement de la taxe. Le numérateur de (5.31) est donc égal à la variation marginale en équivalent gaz 1, évaluée aux prix fictifs  $\boldsymbol{\mu}$ . Le dénominateur peut s'interpréter comme un facteur de normalisation. Il représente la variation marginale des émissions en équivalent gaz 1, mais évaluée cette fois avec la règle d'équivalence  $\gamma$ .

L'équation (5.31) – combinée à la définition de la matrice Jacobienne  $\mathbf{g}(\cdot)$ ,  $\mathbf{J}_{[\mathbf{g}, p_t \gamma]}(\cdot)$  – fournit une interprétation géométrique intéressante de la taxe optimale fondée sur  $\gamma$ .

Si  ${}^t\mathbf{J}_{[\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{x}_t]}$  est de plein rang –i.e., le profil d'émissions d'un gaz  $j$  (la  $j$ -ième colonne de  ${}^t\mathbf{J}_{[\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{x}_t]}$ ) ne peut être obtenu à partir d'une combinaison linéaire des profils d'émissions des autres gaz– alors la matrice apparaissant à la fois au numérateur et au dénominateur de l'équation (5.31) est définie positive. Par conséquent, cette matrice définit une norme  $\|\cdot\|$  de  $\mathfrak{R}^n$ . Soit  $\cos(\cdot, \cdot)$  le cosinus de l'angle entre les deux vecteurs de  $\mathfrak{R}^n$  défini par la forme bilinéaire associée à cette norme. La taxe optimale peut s'exprimer :

$$p_t = \frac{\|\boldsymbol{\mu}_t\|}{\|\boldsymbol{\gamma}\|} \cdot \cos(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\mu}_t) \quad (5.32)$$

La taxe optimale fondée sur  $\boldsymbol{\gamma}$  se décompose en un facteur  $(\frac{\|\boldsymbol{\mu}_t\|}{\|\boldsymbol{\gamma}\|})$ , et une mesure de l'angle entre  $\boldsymbol{\gamma}$  et  $\boldsymbol{\mu}_t$ . Le premier facteur est une mesure agrégée de la prise en compte de la valeur sociale des émissions par  $\boldsymbol{\gamma}$ . Le deuxième facteur mesure le biais induit par l'utilisation de  $\boldsymbol{\gamma}$ .

### 5.3 Cas d'un dommage linéaire

Considérons d'abord le cas d'un dommage économique linéaire par rapport aux concentrations. Cette hypothèse, irréaliste dans le cas du changement climatique présente l'avantage de simplifier la comparaison entre les prix fictifs optimaux et le PRG. Elle permet en outre de se concentrer sur deux questions soulevées par le calcul du PRG : le choix arbitraire de l'horizon temporel et le taux d'actualisation. On fait donc ici les hypothèses :

$$\text{H1} \quad D(\theta) = \alpha \cdot \theta \text{ avec } \alpha > 0 \quad (5.33)$$

$$\text{H2} \quad \theta(\mathbf{z}) = {}^t\boldsymbol{\theta} \cdot \mathbf{z} \text{ avec } \boldsymbol{\theta} = (\theta_j) \in \mathfrak{R}^{+n} \quad (5.34)$$

Sous les hypothèses (H1) et (H2), l'équation (5.21) se réduit à une équation différentielle linéaire du premier ordre avec un second membre constant et positif. En résolvant cette équation pour les gaz  $j$  et  $k$  et en utilisant les conditions de transversalité, on obtient le rapport des prix fictifs :

$$\frac{\lambda_j^*}{\lambda_k^*} = \frac{\alpha\theta_j}{\delta + \tau_j} / \frac{\alpha\theta_k}{\delta + \tau_k} = \frac{\theta_j(\delta + \tau_k)}{\theta_k(\delta + \tau_j)} \quad (5.35)$$

Il en découle que  $\lambda_j^*/\lambda_k^*$  est constant sous (H1) et (H2). A cause de la linéarité du lien entre concentrations et dommages, la valeur sociale du gaz  $j$  par rapport au gaz  $k$  ne varie pas dans le temps. En introduisant (H2) dans l'équation (5.1), le PRG –également constant par définition– s'écrit :

$$\text{GWP}_{j,k}(\hat{T}) = \frac{\theta_j \tau_k (1 - e^{-\tau_j \hat{T}})}{\theta_k \tau_j (1 - e^{-\tau_k \hat{T}})} \quad (5.36)$$

L'équation (5.36) montre que le PRG diffère du ratio optimal des prix fictifs pour au moins deux raisons : (i) le choix de l'horizon ( $\hat{T}$ ) qui apparaît dans l'expression du PRG mais pas dans celle du rapport des prix fictifs, et (ii) le taux d'actualisation ( $\delta$ ) qui n'affecte que le rapport des prix.

De plus, le signe de la différence entre le PRG et le rapport des prix dépend seulement des taux de décroissance naturels, du taux d'actualisation et de l'horizon utilisé dans le calcul du PRG. Sous (H1)-(H2), il ne dépend ni du dommage marginal ( $\alpha$ ), ni du rapport des forçages radiatifs instantanés.

**Proposition 5.1** *Considérons un triplet de gaz  $j, j'$  et  $k$  tels que  $\tau_j > \tau_{j'} > 0$  et  $\tau_j \neq \tau_k, \tau_{j'} \neq \tau_k > 0$ . Sous (H1) et (H2) et pour un horizon temporel  $\hat{T} > 0$  :*

- i) Il existe un unique taux d'actualisation positif  $\hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$  tel que  $GWP_{j,k}(\hat{T}) = \lambda_j^*/\lambda_k^*$ .*
- ii)  $\hat{\delta}_{j,k}(\hat{T}) < \hat{\delta}_{j',k}(\hat{T})$  pour tout  $\hat{T} > 0$ .*
- iii) Si  $\tau_j > \tau_k$ , alors  $GWP_{j,k}(\hat{T}) < \lambda_j^*/\lambda_k^* \iff \delta > \hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$ .*  
*Si  $\tau_j < \tau_k$ , alors  $GWP_{j,k}(\hat{T}) < \lambda_j^*/\lambda_k^* \iff \delta < \hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$ .*

**Démonstration** Voir annexe

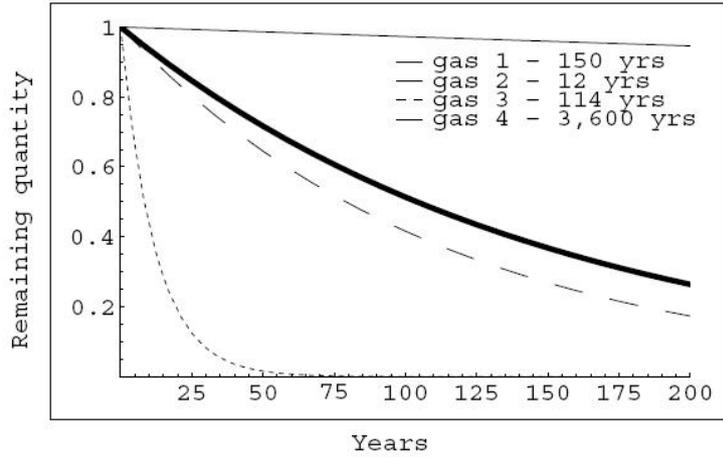
La proposition 5.1 apporte un éclairage intéressant sur la différence entre le PRG et des indices fondés sur le bien être. Elle montre que cette différence dépend du taux d'actualisation et de l'horizon utilisé dans le calcul du PRG. La proposition illustre aussi l'arbitrage entre ces deux quantités.

Les résultats de la proposition 5.1 sont représentés sur la figure 5.1. La figure 5.1.a montre l'évolution naturelle des concentrations de quatre gaz. Les gaz 2, 3 et 4 sont caractérisés par des temps de demi-vie moyen de 12, 114 et 3600 années, respectivement (courbes matérialisées respectivement par des points, des tirets et un trait plein). Ces temps de demi-vie peuvent être associés au CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, et SF<sub>6</sub> respectivement (IPCC 2001). Le gaz 1 est supposé avoir un temps de demi-vie moyen de 150 années (trait épais). Ce temps de demi-vie est dans la plage de valeurs données pour le CO<sub>2</sub>.

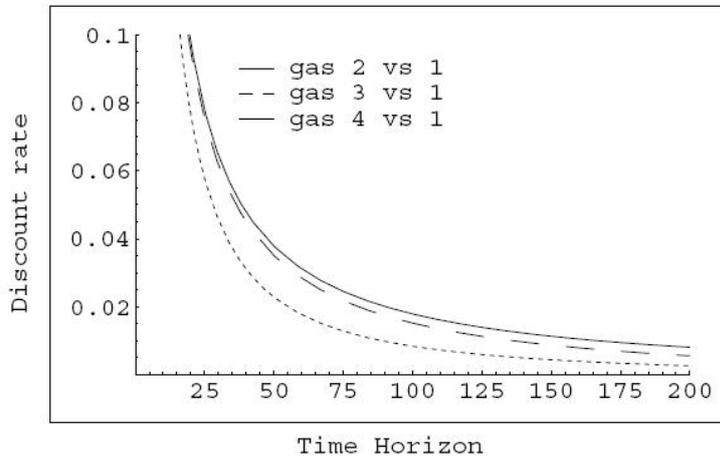
La figure 5.1.b illustre l'arbitrage entre l'horizon temporel  $\hat{T}$  et le taux d'actualisation. Le gaz 1 est pris comme référence. Si  $\hat{T}$  est fixé, par exemple à 100 ans (la convention retenue par l'IPCC), alors le point (i) de la proposition implique qu'il existe une unique valeur du taux d'actualisation telle que  $GWP_{2,1}(100) = \frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*}$ . Pour le gaz à plus courte durée de vie,  $\hat{\delta}_{2,1}(100)$  serait approximativement égal à 0.8%. Pour un horizon de 500 ans, il descend à 0.02%. Pour le gaz 4 –le gaz à la plus longue durée de vie dans notre exemple– les taux d'actualisation sont plus élevés (1.79% et 0.26% pour 100 et 500 ans, respectivement). Puisque le gaz 4 a une durée de vie plus longue que le gaz 2, un taux d'actualisation plus élevé assure l'égalité entre le PRG et le rapport des prix. Les courbes sur la figure 5.1.b ne se croisant pas, on voit qu'il n'existe pas de couple  $(\delta, \hat{T})$  tel que *tous* les PRG pourraient être en même temps égaux au rapport des prix fictifs leur correspondant.

Inversement, on peut fixer le taux d'actualisation et en déduire l'horizon temporel qui assure l'égalité entre le PRG et le rapport des prix fictifs. Pour les valeurs usuelles du taux d'actualisation dans les problèmes environnementaux de long terme, par exemple inférieur à 3%, les horizons temporels tels qu'il y a égalité entre rapport des prix et PRG sont proches de 100 ans. Par exemple, pour un taux de 1.5%, l'horizon est de 67.4,

5.3. Cas d'un dommage linéaire



a. Évolution des concentrations pour quatre taux de décroissance naturels



b. Combinaisons de  $(\hat{T}, \delta)$  pour lesquelles  $GWP_{j,1}(\hat{T}) = \frac{\lambda_j^*}{\lambda_1^*}$

FIG. 5.1 – Arbitrage entre taux d'actualisation et horizon temporel (dommage linéaire)

101.37, et 117.3 années (gaz 2, 3, et 4, respectivement). Cependant, le calcul du PRG est très sensible à la valeur de l'horizon  $\hat{T}$ . Calculer le PRG du gaz 2 (resp. 4) sur un horizon de 67.4 (resp 117.3) ans au lieu de 100 ans induit en effet une hausse de 34% (resp. 5%) de l'indice. De plus, pour des taux très bas, la différence entre les horizons s'élargit entre les gaz à courte et à longue durée de vie.

Il est souvent mis en avant que le PRG surestime la valeur sociale des gaz à courte durée de vie et sous-estime celle des gaz à durée de vie longue (Manne & Richels 2001). Le point (iii) de la proposition 5.1 limite la validité de cette affirmation et insiste sur le rôle crucial que jouent  $\delta$  et  $\hat{T}$ . Pour un horizon donné  $\hat{T}$ , le PRG surévalue (resp. sous-évalue) les gaz à plus courte durée de vie (resp. à plus longue durée de vie) que le gaz de référence si le taux d'actualisation est faible. La proposition inverse tient si le taux d'actualisation est grand. Les résultats sur un horizon de 100 ans sont présentés dans le tableau 5.1. Les 3 premières lignes correspondent au cas examiné sur la figure 5.1 ( $\tau_1 = 1/150$ ). L'étendue des taux d'actualisation pour lequel le PRG est plus grand (plus petit) que le rapport des prix fictifs est indiqué par un '+' ('-'). Le tableau 5.1 montre que l'affirmation que le PRG surévalue les gaz à courte durée de vie n'est vraie que si le taux d'actualisation est faible. Pour des taux d'actualisation plus grands (tout en restant raisonnables), le PRG surestime les gaz à courte durée de vie et sous-évalue les gaz à longue durée de vie. Les deux dernières lignes du tableau 5.1 étudient la sensibilité des résultats par rapport à la durée de demi-vie du gaz de référence. La demi-vie du CO<sub>2</sub> est en effet difficile à définir car il interagit avec plusieurs réservoirs à des vitesses très différentes, donnant un intervalle de 5 à 200 ans (IPCC 2001).

Gaz	demi-vie ( $\tau_j$ )	Taux d'actualisation $\delta$			
		$]0, \hat{\delta}_{2,1}(100)[$	$] \hat{\delta}_{2,1}(100), \hat{\delta}_{3,1}(100)[$	$] \hat{\delta}_{3,1}(100), \hat{\delta}_{4,1}(100)[$	$] \hat{\delta}_{4,1}(100), +\infty[$
	$\tau_1 = 1/150$	$]0, 0.84\%[$	$]0.84\%, 1.52\%[$	$]1.52\%, 1.79\%[$	$]1.79\%, +\infty[$
Gaz 2	1/12	+	-	-	-
Gaz 3	1/114	+	+	-	-
Gaz 4	1/3600	-	-	-	+
	$\tau_1 = 1/50$	$]0, 0.43\%[$	$]0.43\%, 1.20\%[$	$]1.20\%, 1.51\%[$	$]1.51\%, +\infty[$
Gaz 2	1/12	+	-	-	-
Gaz 3	1/114	-	-	+	+
Gaz 4	1/3600	-	-	-	+
	$\tau_1 = 1/200$	$]0, 0.91\%[$	$]0.91\%, 1.57\%[$	$]1.57\%, 1.84\%[$	$]1.84\%, +\infty[$
Gaz 2	1/12	+	-	-	-
Gaz 3	1/114	+	+	-	-
Gaz 4	1/3600	-	-	-	+

TAB. 5.1 – Taux d'actualisation pour lesquels le PRG surestime (+) ou sous-estime (-) la valeur sociale des gaz à effet de serre (dommage linéaire,  $\hat{T} = 100$ )

Ces résultats confirment le fait que le PRG n'est pas l'indice adéquat pour mesurer l'équivalence *économique* entre les gaz. Le cas linéaire étudié ici simplifie beaucoup le lien entre le climat et le dommage économique. Mais cela réduit aussi le biais entre des indices fondés sur le pouvoir radiatif et des indices fondés sur le dommage écono-

mique et ne remet donc pas en cause les conclusions. Les résultats montrent néanmoins qu'un biais subsiste. Il est lié au taux d'actualisation et au choix arbitraire de l'horizon temporel.

Par ailleurs, les résultats mettent en évidence l'arbitrage possible entre le taux d'actualisation et l'horizon temporel choisi dans le calcul du PRG. On peut discuter le fait que le choix d'un taux d'actualisation n'est pas moins arbitraire que le choix d'un horizon temporel. La valeur à retenir pour le taux d'actualisation nourrit un "vif débat" parmi les économistes, particulièrement dans les problèmes environnementaux de long terme comme le changement climatique (Guesnerie 2004). Le choix d'une valeur de  $\delta$  dépend, entre autres, des hypothèses sur les préférences futures et la productivité du capital. A partir de la figure 5.1, l'hypothèse d'un horizon de 100 ans peut apparaître comme un compromis qui prend en compte des valeurs raisonnables du taux d'actualisation. Cependant, des calculs simples montre que le PRG est très sensible au choix de l'horizon en particulier pour les gaz à courte durée de vie.

Enfin, le signe de la différence entre le PRG et le rapport des prix dépend du taux d'actualisation, de l'horizon et de la différence entre les demi-vies des gaz. Par conséquent, pour un horizon et un taux d'actualisation donnés, le PRG sous-évalue certains gaz et en surévalue d'autres. L'analyse montre que dans le cas linéaire de petites variations du taux d'actualisation sont susceptibles d'inverser le signe de cette différence.

## 5.4 Dommage linéaire, facteurs d'émissions constants et surplus quadratique

Afin d'aller plus loin dans l'analyse de l'évolution du système sous les hypothèses (H1) et (H2), des hypothèses supplémentaires sont nécessaires en ce qui concerne la forme analytique des facteurs d'émissions et du surplus. Dans cette section, nous ajoutons les hypothèses suivantes :

$$\text{H3} \quad \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{x} \text{ avec } \mathbf{E} = (e_{ji}) \in \mathfrak{R}^{n \times m} \quad (5.37)$$

$$\text{H4} \quad U(\mathbf{x}) = {}^t \mathbf{u} \mathbf{x} - \frac{1}{2} {}^t \mathbf{x} \mathbf{V} \mathbf{x} \text{ avec } \mathbf{u} \in \mathfrak{R}^{+m}, \mathbf{V} \in \mathfrak{R}^{m \times m} \text{ symétrique définie positive} \quad (5.38)$$

$$\text{H5} \quad v_{ii} > 0 \text{ pour tout } i = 1, \dots, m \text{ et } v_{ik} = v_{ki} \leq 0 \text{ pour tout } i \neq k \quad (5.39)$$

$$(5.40)$$

L'hypothèse (H3), impliquant que la relation entre les quantités de biens et les émissions est linéaire, concorde avec l'utilisation de facteurs d'émissions constants préconisés par l'IPCC. (H4) est une hypothèse plus forte. Afin d'avoir les propriétés de concavité discutées dans la section 5.2.1,  $\mathbf{V}$  est une matrice  $m \times m$  non singulière, définie positive. (H5) impose des propriétés standards sur le système de demande (symétrie, demande décroissante), à savoir (i)  $\mathbf{V}$  est symétrique, (ii) les coefficients diagonaux  $v_{ii}$  sont positifs, (iii) les coefficients non diagonaux  $v_{ik}$  ( $i \neq k$ ) sont négatifs.

Les quantités d'équilibre dans le scénario "Business-as-usual" maximisent  $U(\mathbf{x})$ . Sous (H4), ces quantités sont  $\mathbf{x}^{\text{BAU}} = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{u}$ . Par souci de simplicité, les préférences sont

supposées constantes dans le temps, impliquant des émissions d'équilibre constantes pour le scénario Business-as-usual. De plus, sous (H3), les émissions associées –données par  $\varepsilon^{\text{BAU}} = \mathbf{E}\mathbf{x}^{\text{BAU}} = (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}) \mathbf{u}$  – sont aussi constantes. L'équation d'évolution de  $z_j$  se réduit donc à une équation différentielle du premier ordre avec un second membre constant. La trajectoire de la concentration  $z_j$  est donc complètement caractérisée par sa concentration initiale  $z_{j0}$  :

$$z_{jt}^{\text{BAU}} = \left(z_{j0} - \frac{\varepsilon_j^{\text{BAU}}}{\tau_j}\right)e^{-\tau_j t} + \frac{\varepsilon_j^{\text{BAU}}}{\tau_j} \quad (5.41)$$

Sous (H3) et (H4), la concentration business-as-usual du gaz  $j$  tend vers  $\varepsilon_j^{\text{BAU}}/\tau_j$  quand  $t$  tend vers l'infini.  $z_j^{\text{BAU}}$  croît (resp. décroît) de façon monotone si la concentration initiale  $z_{j0}$  est supérieure (resp. inférieure) à la concentration stationnaire.

Considérons maintenant l'évolution de  $\mathbf{z}$  quand sont pris en compte les dommages. On calcule les émissions optimales  $\varepsilon^*$  en introduisant (H3) et (H4) dans les conditions d'optimalité (5.18), ce qui donne :

$$\varepsilon^* = \mathbf{E}\mathbf{x}^* = (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}) \mathbf{u} - (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \boldsymbol{\lambda}^* \quad (5.42)$$

Les quantités d'équilibre optimales  $\mathbf{x}^*$  dépendent linéairement de  $\boldsymbol{\lambda}^*$ . Il est facile de vérifier que c'est également le cas de la réduction de la consommation par rapport au scénario business-as-usual ( $\mathbf{x}^{\text{BAU}} - \mathbf{x}^* = (\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \boldsymbol{\lambda}^*$ ) et pour l'abattement optimal ( $\varepsilon^{\text{BAU}} - \varepsilon^* = (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \boldsymbol{\lambda}^*$ ).

Comme montré dans la section 5.3,  $\boldsymbol{\lambda}^*$  est constant dans le temps sous (H1) et (H2) et  $\lambda_j^*$  est égal à  $\alpha\theta_j/(\delta + \tau_j)$ . Ceci implique des émissions constantes sous (H4). Par conséquent, sous les hypothèses (H1)-(H4), l'équation d'évolution de  $z_j$  se réduit à une équation différentielle linéaire du premier ordre avec un second membre constant. Les solutions de cette équation prennent donc une forme similaire à celle décrite par (5.41), dans laquelle  $\varepsilon_j^{\text{BAU}}$  est remplacé par  $\varepsilon_j^*$ . La trajectoire optimale de la concentration du gaz  $j$  ( $z_j^*$ ) décroît (resp. croît) de façon monotone si la concentration initiale est plus grande (resp. plus faible) que les concentrations d'équilibre  $\varepsilon_j^*/\tau_j$ .

Considérons maintenant une taxe fondée sur la règle d'équivalence  $\gamma$ . Les hypothèses (H3) et (H4) et l'équation (5.31) donnent :

$$p_t = \frac{{}^t\gamma (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \tilde{\boldsymbol{\mu}}}{{}^t\gamma (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \gamma} \quad (5.43)$$

La taxe est une combinaison linéaire des prix fictifs  $\mu_j$ . Les coefficients de cette combinaison linéaire dépendent de la règle d'équivalence, du taux marginal de substitution entre les biens et des facteurs d'émissions. Si le rang de  $(\mathbf{E}) = n$ , l'interprétation géométrique donnée par l'équation (5.32) est encore valable. Cette interprétation est cependant plus simple, puisque la définition de la norme ne dépend pas des niveaux de consommation sous les hypothèses (H3)-(H4).

Sous (H1)-(H4), les émissions ( $\tilde{\varepsilon}$ ) dans un scénario avec taxe et règle d'équivalence  $\gamma$  sont :

$$\tilde{\varepsilon} = \mathbf{E}\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{u} - \frac{{}^t\gamma (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \tilde{\boldsymbol{\mu}}}{{}^t\gamma (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \gamma} (\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}) \gamma \quad (5.44)$$

Comme sous les hypothèses (H1) et (H2), le système différentiel caractérisant  $\tilde{\mu}$  est exactement le même que celui caractérisant  $\lambda^*$ . Les solutions sont donc identiques. On a donc  $\tilde{\mu} = \lambda^*$ . Comme conséquence directe, les émissions dans le scénario avec taxe sont constantes et la trajectoire des concentrations prend une forme similaire à celle décrite par l'équation (5.41). Les résultats de cette section sont résumés dans la proposition suivante.

**Proposition 5.2** *Sous (H1)-(H5), on a les résultats suivants :*

- i)  $\varepsilon_j^* \leq \varepsilon_j^{BAU}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_j \leq \varepsilon_j^{BAU}$ ,  $z_j^* \leq z_j^{BAU}$  et  $\tilde{z}_j \leq z_j^{BAU}$  pour tout  $j = 1, \dots, n$
- ii)  ${}^t\lambda^*(\varepsilon^* - \tilde{\varepsilon}) \leq 0$  pour tout  $\gamma > 0$
- iii)  ${}^t\gamma(\varepsilon^* - \tilde{\varepsilon}) = 0$  pour tout  $\gamma > 0$

**Démonstration** Voir annexe

Le point (i) de la proposition 5.2 indique que les émissions optimales et celles du scénario avec taxe sont plus faibles que celles du scénario business-as-usual. Ceci n'est pas surprenant car les dommages sont ignorés dans le scénario BAU, alors qu'ils sont pris en compte dans les deux autres scénarios. L'importance de ce résultat réside dans le fait qu'il est valable *pour tous les gaz*. Les deux scénarios induisent donc une amélioration de l'environnement comparé au scénario de *laissez-faire*.

Les parties (ii) et (iii) de la proposition 5.2 se concentrent sur les émissions agrégées. Comment peut-on comparer les émissions du scénario optimal et celles du scénario avec taxe? Deux règles d'agrégation sont possibles. La première correspond au vecteur des prix fictifs  $\lambda^*$ . Les émissions de chaque gaz sont pondérées par leur valeur sociale. Les valeurs sociales totales des émissions dans les deux scénarios peuvent ainsi être comparées. La proposition 5.2.(ii) indique que la valeur totale des émissions optimales  ${}^t\lambda^* \cdot \varepsilon^*$  est supérieure à la valeur totale des émissions du scénario avec taxe  ${}^t\lambda^* \cdot \tilde{\varepsilon}$ . En d'autres termes, la taxe fondée sur la règle d'équivalence  $\gamma$  induit une perte sociale nette.

Le point (iii) de la proposition est plus surprenant. La seconde règle d'agrégation possible est la règle  $\gamma$ . Le résultat (iii) montre que les émissions totales –agrégées avec  $\gamma$ – sont identiques dans le scénario optimal et le scénario avec taxe. Ce résultat est directement lié à l'hypothèse d'un dommage linéaire, car il nécessite  $\lambda^* = \tilde{\mu}$ . Il est valable indépendamment du choix de  $\gamma$ . En d'autres termes, une taxe fondée sur une règle d'équivalence comme celle du PRG conduit aux mêmes émissions totales en équivalent  $CO_2$  que le scénario optimal. Géométriquement, cela signifie que  $\tilde{\varepsilon}$  appartient à un hyperplan de  $\mathbb{R}^n$  défini par  ${}^t\gamma \cdot \varepsilon = {}^t\gamma \cdot \varepsilon^*$ . Le scénario avec une taxe fondée sur  $\gamma$  implique un changement des émissions de chaque gaz mais ces changements se compensent à un niveau agrégé. Nécessairement, certaines émissions seront plus élevées, d'autres plus faibles.

Ce résultat est illustré graphiquement dans le cas où  $n = 2$  (figure 5.2). La solution du programme (5.15) mène aux émissions optimales  $\varepsilon^* = (\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*)$ . Les émissions totales

en équivalent gaz 1 sont  $t\gamma \cdot \varepsilon^*$ . Tous les points  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  sur la ligne CD (pente  $-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ ) sont caractérisés par le même total en tonnes d'équivalent gaz 1. Si le rapport des prix fictifs  $\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*}$  est inférieur à  $\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ , les émissions sous le scénario avec taxe  $\tilde{\varepsilon} = (\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2)$  sont nécessairement sous la ligne EF (pente  $-\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*}$ ). Par conséquent,  $\tilde{\varepsilon}$  est sur le segment AC. Il s'ensuit que  $\tilde{\varepsilon}_1$  est supérieur à  $\varepsilon_1^*$  et  $\tilde{\varepsilon}_2$  est inférieur à  $\varepsilon_2^*$ . Le même raisonnement s'applique si  $\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*} > \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ .

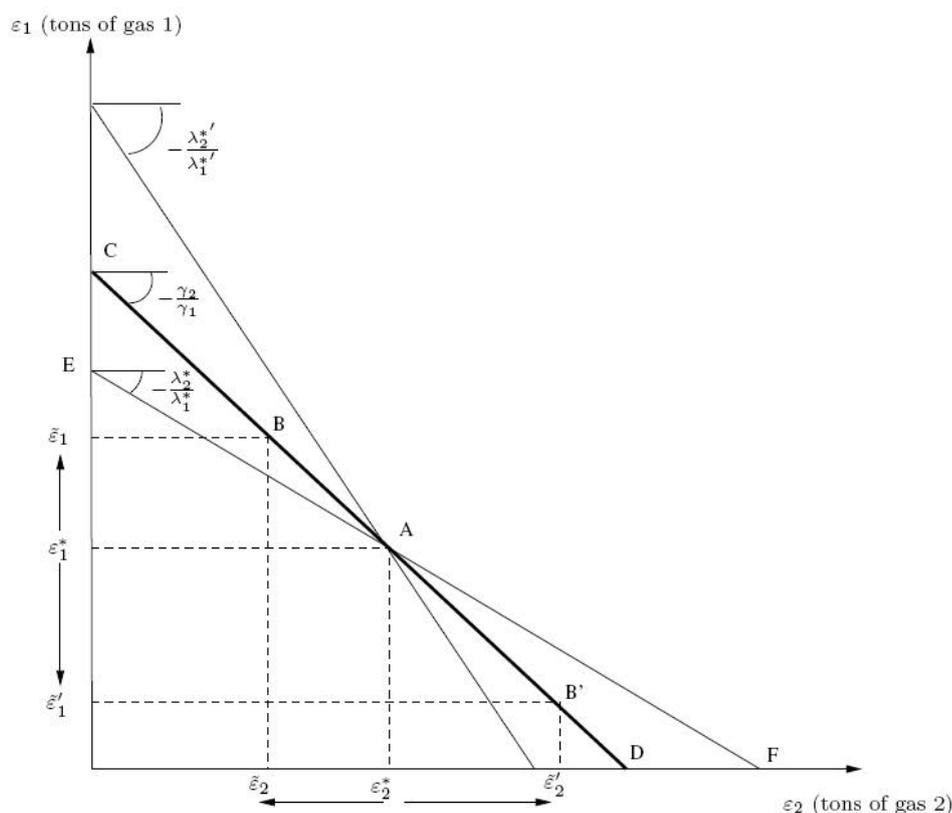


FIG. 5.2 – Positionnement des émissions du scénario optimal (A) par rapport aux émissions du scénario avec taxe et règle d'équivalence  $\gamma$  (dommage linéaire) selon que  $-\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*} < -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$  (B) ou  $-\frac{\lambda_2^*}{\lambda_1^*} > -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$  (B')

Dans le cas où  $\gamma$  est le vecteur des PRG standards, on se trouve dans la situation B ou B' selon la place du taux d'actualisation par rapport à  $\hat{\delta}(\hat{T})$  et selon la demi-vie du gaz 2 par rapport à celle du gaz 1 (voir proposition 5.1).

## 5.5 Dommage quadratique, facteurs d'émissions constants et surplus quadratique

### 5.5.1 Solution de premier rang

Dans cette section, l'hypothèse de linéarité de la fonction de dommage est relâchée. Les hypothèses (H2)-(H4) sont conservées tandis que (H1) est remplacée par (H1') :

$$\text{H1'} \quad D(\theta) = \frac{1}{2}\beta\theta^2 \text{ with } \beta > 0 \quad (5.45)$$

Sous l'hypothèse (H1'), le dommage marginal est croissant par rapport à  $\theta$ . Le dommage marginal ne peut donc être réduit au forçage radiatif modulo un facteur multiplicatif.  $D'(\theta)$  dépend de  $\theta$ , qui dépend à son tour des concentrations de GES.

En utilisant (H1') et (H2)-(H4) dans le système différentiel linéarisé (5.22), on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{z}} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Delta}_{[-\tau]} & -\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E} \\ -\beta\boldsymbol{\theta} {}^t\boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (5.46)$$

Le système différentiel est linéaire sous les hypothèses (H1'), (H2)-(H4). De plus, (H1') et (H2) impliquent que  $\mathbf{b}(\bar{\mathbf{z}})$  est égal au vecteur nul. Enfin, comme dans la section précédente,  $\mathbf{a}(\bar{\boldsymbol{\lambda}})$  est constant et égal aux émissions du scénario business-as-usual ( $\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{u}$ ).

Soit  $\nu_k$  ( $k = 1, \dots, 2n$ ) les valeurs propres de la matrice  $2n \times 2n$  du système (5.46) et  $\boldsymbol{\Omega}$  la matrice  $2n \times 2n$  des  $2n$  vecteurs propres  $\boldsymbol{\omega}_k$ . La solution générale du système (5.46) s'écrit :

$$z_{jt}^* = \sum_{k=1}^{2n} \omega_{j,k} (c_k e^{-\nu_k t} + \frac{d_k}{\nu_k}) \text{ pour tout } j = 1, \dots, n \quad (5.47)$$

$$\lambda_{jt}^* = \sum_{k=1}^{2n} \omega_{n+j,k} (c_k e^{-\nu_k t} + \frac{d_k}{\nu_k}) \text{ pour tout } j = 1, \dots, n \quad (5.48)$$

où les  $c_k$  sont les  $2n$  constantes d'intégration obtenues à partir des concentrations initiales  $\mathbf{z}_0$  et des conditions de transversalité, et  $d_k$  est la  $k$ -ième composante du vecteur  $\mathbf{d}$  défini par

$$\boldsymbol{\Omega}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{E}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (5.49)$$

Afin d'obtenir la solution analytique du système (5.46), il est nécessaire de diagonaliser une matrice  $2n \times 2n$ . Le comportement de la solution générale dépend de la non singularité de cette matrice (existence d'un état stationnaire) et du signe des valeurs propres (point selle).

### 5.5.2 Taxe basée sur une règle d'équivalence constante

Le même raisonnement peut être appliqué avec une taxe basée sur une règle d'équivalence entre les gaz  $\gamma$  :

$$\begin{pmatrix} \dot{z} \\ \dot{\mu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_{[-\tau]} & -\frac{\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}\gamma {}^t\gamma\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}}{{}^t\gamma\mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}\gamma} \\ -\beta\theta {}^t\theta & \Delta_{[\delta+\tau]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ \mu \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{E}\cdot\mathbf{V}^{-1}\mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (5.50)$$

Ici aussi, l'existence d'un état stationnaire et le comportement en dynamique de la solution générale dépend de la singularité de la matrice du système (5.50) et du signe des valeurs propres.

La comparaison de la solution générale de premier rang et de celle avec taxe n'est pas aussi évidente que dans le cas linéaire. En particulier, les émissions avec taxe agrégées avec  $\gamma$  ne sont pas égales aux émissions de premier rang agrégées avec  $\gamma$  puisque le dommage n'est pas linéaire par rapport aux concentrations. En d'autres termes, le biais induit par la règle d'équivalence  $\gamma$  est double : (i) la combinaison optimale de GES émis n'est pas celle de la solution de premier rang ; (ii) le changement de combinaison modifie la valeur sociale des émissions de chaque GES de sorte que les émissions totales (agrégées avec la règle  $\gamma$ ) diffèrent aussi de leur niveau de premier rang.

### 5.5.3 Illustration pour deux gaz

Nous nous limitons ici au cas de deux gaz afin d'illustrer de façon analytique les propriétés dynamiques du système, en étudiant la solution de premier rang et la solution obtenue dans le cas avec la règle d'équivalence  $\gamma$  et la taxe.

**Proposition 5.3 (État stationnaire)** *Dans le cas de deux gaz et sous les hypothèses (H1'), (H2)-(H4) :*

- i) *Les deux systèmes (5.46) et (5.50) admettent un unique état stationnaire.*
- ii) *Dans les deux cas, l'état stationnaire est un point selle.*

**Démonstration** Voir annexe.

La proposition 5.3 montre l'existence et l'unicité de l'état stationnaire dans les deux cas. De plus, pour deux gaz, l'état stationnaire est un point selle. C'est-à-dire que deux des valeurs propres de la matrice  $4 \times 4$  du système (5.46) (respectivement (5.50)) sont négatives, alors que les deux autres sont positives. Soit  $\nu_1$  et  $\nu_2$  (respectivement  $\tilde{\nu}_1$  et  $\tilde{\nu}_2$ ) les valeurs propres positives, et  $\nu_3$  et  $\nu_4$  (respectivement  $\tilde{\nu}_3$  et  $\tilde{\nu}_4$ ) les négatives.  $c_3$  et  $c_4$  (respectivement  $\tilde{c}_3$  et  $\tilde{c}_4$ ) –les coefficients associés aux valeurs propres négatives dans (5.46) (respectivement (5.50))– sont nuls le long de la trajectoire optimale de premier rang (respectivement dans le cas d'une taxe et d'une règle d'équivalence  $\gamma$ )

**Proposition 5.4 (État stationnaire et rapport des prix fictifs)** *Dans le cas de deux gaz ( $\tau_2 > \tau_1$ ), sous (H1'), (H2)-(H4) :*

- i) *le rapport des prix fictifs à l'état stationnaire est tel que :  $\frac{\lambda_2^{*\infty}}{\lambda_1^{*\infty}} = \frac{\tilde{\mu}_2^{\infty}}{\tilde{\mu}_1^{\infty}} = \frac{\theta_2(\delta+\tau_1)}{\theta_1(\delta+\tau_2)}$ .*

ii) une condition suffisante pour avoir  $\lambda^{*\infty} \geq \tilde{\mu}^\infty$  est  $\frac{\theta_2\tau_1}{\theta_1\tau_2} \leq \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \leq \frac{\theta_2(\delta+\tau_1)}{\theta_1(\delta+\tau_2)}$  (si  $\tau_2 < \tau_1$ , on inverse les bornes). La condition est aussi nécessaire si  $\text{rang}(\mathbf{E})=n$ .

iii) Une condition suffisante pour avoir  $\begin{pmatrix} \mathbf{z}^{*\infty} \\ \lambda^{*\infty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{z}}^\infty \\ \tilde{\mu}^\infty \end{pmatrix}$  est  $\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{\theta_2(\delta+\tau_1)}{\theta_1(\delta+\tau_2)}$ .

**Démonstration** Voir annexe.

Les rapports des prix fictifs à l'état stationnaire sont identiques entre le cas du premier rang et le cas d'une taxe avec règle d'équivalence  $\gamma$  (i). Ce résultat est indépendant du choix de  $\gamma$ . La trajectoire optimale et le prix fictif stationnaire des émissions de chaque GES peuvent différer. Néanmoins, le rapport des prix fictifs à l'état stationnaire n'est pas modifié. Par conséquent, la discussion de la section 5.3 peut s'appliquer dans le cas d'un dommage quadratique. Selon les demi-vie, le taux d'actualisation et l'horizon temporel, le PRG sous-estime ou surestime la valeur sociale à l'état stationnaire du gaz 2 par rapport au gaz 1.

La partie (ii) de la proposition indique que les prix fictifs peuvent être plus élevés avec la solution de premier rang par rapport à ceux calculés avec une taxe et une règle d'équivalence  $\gamma$ . Ceci est le cas quand le coefficient  $\frac{\gamma_2}{\gamma_1}$  se situe entre le rapport des prix fictifs à l'état stationnaire  $(\frac{\theta_2(\delta+\tau_1)}{\theta_1(\delta+\tau_2)})$  et le PRG calculé pour un horizon temporel infini  $(\frac{\theta_2\tau_1}{\theta_1\tau_2})$ . La première borne représente le dommage relatif intégré sur un horizon infini. La deuxième représente l'impact relatif sur la température intégré sur un horizon infini. Autrement dit, si le coefficient d'équivalence entre les deux gaz n'est ni trop grand, ni trop petit, la valeur sociale accordée aux émissions à l'état stationnaire sera plus grande dans le cas de premier rang qu'avec la taxe et la règle d'équivalence  $\gamma$ .

La partie (iii) de la proposition 5.4 montre qu'un coefficient d'équivalence bien choisi peut en fait conduire exactement aux mêmes concentrations et prix fictifs à l'état stationnaire que celles du premier rang. Encore une fois, ce coefficient est  $\frac{\theta_2(\delta+\tau_1)}{\theta_1(\delta+\tau_2)}$ , i.e., le dommage marginal relatif intégré sur un horizon infini. En d'autres termes, si le PRG est utilisé comme facteur d'équivalence, l'horizon temporel à prendre dans le calcul devrait être choisi de sorte à ce qu'il soit en accord avec le taux d'actualisation (voir discussion section 5.3).

## Conclusion

A la question : "Que serait la règle d'équivalence optimale entre les différents GES ?" la réponse des économistes est un indice basé sur le bien-être qui prend en compte à la fois les dommages marginaux, et les coûts d'abattement marginaux et qui fasse la différence entre les impacts de court et de long terme, par exemple en actualisant les dommages de long terme.

Ce chapitre évalue les conséquences économiques du choix d'un indice proposé par les physiciens, et dans lequel n'interviennent pas de paramètres économiques. Pour de nombreuses raisons, les rapports d'évaluation de l'IPCC ont mis en avant l'utilisation du PRG. Le concept s'est même imposé, prenant la forme d'une norme internationale et héritant du caractère "légalement contraignant" des objectifs quantitatifs fixés à Kyoto.

Ce chapitre propose une formulation générale d'une taxe basée sur le PRG –ou sur toute autre règle d'équivalence donnant des facteurs d'équivalence constants entre les gaz. L'interprétation géométrique de la taxe met à jour de façon explicite le biais induit par l'utilisation d'une règle d'équivalence constante dans le temps. Le biais est proportionnel à une mesure de l'"angle" entre le vecteur des coefficients d'équivalence et celui des prix fictifs. La valeur de ce biais dépend des impacts sur le bien être marginal induits par la consommation de biens privés.

Les résultats de ce chapitre explicitent de quelle manière les PRG ne sont pas une mesure adéquate de la valeur économique relative des GES. Dans ce sens, les résultats sont en accord avec ceux obtenus par les études coût-efficacité. Cependant, il existe une différence importante entre un cadre où l'on cherche à maximiser le bien être (notre approche) et le cadre usuel coût-efficacité. Dans le cadre usuel, on cherche les stratégies d'abattement qui permettent d'atteindre une cible donnée (en température ou en concentrations) à un moindre coût. Par conséquent, la valeur sociale d'abattement des GES à courte durée de vie –comme le méthane– est très faible. On en déduit que les réductions d'émissions de méthane devraient être mises en œuvre au dernier moment, quand on approche de la cible. Le méthane se trouve surévalué par le PRG, d'autant plus que son "prix PRG" est 21 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>. La question de savoir si le PRG surestime ou sous-estime les GES à courte durée de vie est plus complexe à analyser dans un cadre maximisant le bien être. La réponse à cette question dépend du taux d'actualisation, de l'horizon et des durées de vie des GES. En particulier, si le taux d'actualisation est assez élevé, l'abattement des GES à courte durée de vie peut en fait être plus intéressant que ce qu'une étude fondée sur les PRG pourrait laisser penser.

Comment comparer les émissions associées à un scénario avec taxe à celles de l'optimum de premier rang ? Si les dommages sont linéaires par rapport aux concentrations, la combinaison entre les abattements change du fait du biais induit par l'utilisation d'une règle d'équivalence constante (des abattements plus élevés pour les GES surévalués et plus faibles pour les GES sous-évalués). Cependant, les émissions totales en CO<sub>2</sub> équivalent sont maintenues inchangées. Ceci n'est pas vrai dans le cas plus réaliste d'un dommage convexe. Dans ce dernier cas, à l'état stationnaire, la valeur sociale des émissions n'est pas modifiée entre le premier rang et la taxe. Cependant, les concentrations à l'état stationnaire et les trajectoires optimales changent entre le scénario premier rang et le scénario avec taxe.

La taxe avec PRG peut être considérée comme un instrument de second rang. La distribution optimale de l'abattement entre les secteurs et/ou entre les pays dépend fortement de la façon dont est traitée la question de la pluralité des GES et de la façon dont sont conçus les instruments économiques devant les prendre en compte. Par exemple, les niveaux d'abattement optimaux du secteur agricole –secteur principal pour les émissions autres que le CO<sub>2</sub>– sont particulièrement sensibles aux prix relatifs du méthane et du protoxyde d'azote. Nous allons explorer cette question dans le chapitre suivant. Les implications politiques et économiques de la mise en place d'une taxe

utilisant le PRG sont donc potentiellement très étendues.

## Annexe A : Notations

Les variables marquées par une étoile (par exemple,  $\mathbf{x}^*$ ) correspondent à la solution du problème général décrit en section 5.2.1. Ce sont donc les solutions optimales de premier rang. Les variables marquées par un tilda (par exemple,  $\tilde{\mathbf{x}}$ ) correspondent à un scénario de taxation décrit en section 5.2.4, basé sur une règle d'équivalence  $\gamma$  entre les différents gaz à effet de serre. Les solutions correspondent alors à un optimum de second rang.

On note  $\mathbf{J}_{[\mathbf{f},\mathbf{x}]}$  la matrice jacobienne de  $\mathbf{f}$  par rapport à  $\mathbf{x}$  :

$$\mathbf{J}_{[\mathbf{f},\mathbf{x}]} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

## Annexe B : Démonstrations

**Démonstration** de la proposition 5.1

- i) **Existence.** Si elle existe,  $\hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$  est solution de  $\frac{\lambda_j^*}{\lambda_k^*} = \text{GWP}_{j,k}(\hat{T})$ . En utilisant (5.35) et (5.36) on obtient :

$$\hat{\delta}_{j,k}(\hat{T}) = \frac{\tau_j \tau_k (e^{-\tau_k \hat{T}} - e^{-\tau_j \hat{T}})}{\tau_j (1 - e^{-\tau_k \hat{T}}) - \tau_k (1 - e^{-\tau_j \hat{T}})} \quad (5.51)$$

**Positivité.** Soit  $u$  et  $v$  le numérateur et le dénominateur de (5.51), respectivement. Considérons que  $\tau_j > \tau_k$ . On sait que dans ce cas  $u > 0$ . Considérons la fonction  $f(x) = \frac{\ln(x)}{1-\frac{1}{x}}$  et le changement de variable  $\ln(s) = \hat{T}\tau_j$  et  $\ln(t) = \hat{T}\tau_k$ .  $f(x)$  est croissante pour  $x \geq 1$ . Donc,  $\tau_j > \tau_k$  implique  $s > t (> 1)$  and  $f(s) > f(t)$ . Cela implique que  $\ln(s)(1 - 1/t) > \ln(t)(1 - 1/s)$  or  $\hat{T}\tau_j(1 - e^{-\tau_k \hat{T}}) > \hat{T}\tau_k(1 - e^{-\tau_j \hat{T}})$ . Comme  $\hat{T} > 0$ , nous avons  $v > 0$ . Comme  $\hat{\delta}_{j,k}(\hat{T}) = \hat{\delta}_{k,j}(\hat{T})$ , la démonstration pour  $\tau_j < \tau_k$  est évidente.

**Unicité.** Il est suffisant de montrer que  $\hat{\delta}_{j,k}(T)$  est strictement monotone et décroissante par rapport à  $T$ , i.e.,  $vu' - uv' < 0$  pour tout  $\tau_j, \tau_k, T > 0$ . En réarrangeant et en simplifiant, il vient :

$$vu' - uv' = \tau_j \tau_k (\tau_j - \tau_k) [\tau_j e^{-\tau_j T} (1 - e^{-\tau_k T}) - \tau_k e^{-\tau_k T} (1 - e^{-\tau_j T})] \quad (5.52)$$

Considérons  $g(x) = \frac{x \ln(x)}{1-\frac{1}{x}}$  et le même changement de variable que précédemment.  $g(x)$  est décroissante par rapport à  $x$  pour  $x \geq 1$ . De la même façon que ci-dessus,  $\tau_j > \tau_k$  implique  $s > t (> 1)$  et  $g(s) < g(t)$ . Par conséquent, le terme entre crochets dans (5.52) est négatif. QED.

- ii) A partir de l'équation (5.51), nous avons : (a) si  $v > 0$ , alors  $\frac{\lambda_j^*}{\lambda_k^*} > \text{GWP}_{j,k}(\hat{T}) \iff \delta > \hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$ , et (b) si  $v < 0$ , alors  $\frac{\lambda_j^*}{\lambda_k^*} > \text{GWP}_{j,k}(\hat{T}) \iff \delta < \hat{\delta}_{j,k}(\hat{T})$ . De (i), nous savons que le signe de  $v$  est le même que celui de  $u$ , qui est le même que celui de  $(\tau_j - \tau_k)$ . QED.

**Démonstration** de la proposition 5.2

- i) Notations :  $\mathbf{A} = \mathbf{E}\mathbf{V}^{-1} {}^t\mathbf{E}$  et  $\tilde{\mathbf{A}} = \frac{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}}{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}}$ . Sous (H4), nous savons que  $\mathbf{V}$  est définie positive.  $\mathbf{A}$  est donc semi-définie positive (définie si  $\text{rang}(\mathbf{E}) = m$ ) et  $\tilde{\mathbf{A}}$  est semi-définie positive.  
 Donc,  ${}^t\boldsymbol{\lambda}^*(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} - \boldsymbol{\varepsilon}^*) = {}^t\boldsymbol{\lambda}^*\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}^* \geq 0$ . Parallèlement,  ${}^t\boldsymbol{\lambda}^*(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} - \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}) = \frac{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\mu}}}{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}} {}^t\boldsymbol{\lambda}^*\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}$ .  
 Comme  $\boldsymbol{\lambda}^* = \tilde{\boldsymbol{\mu}}$  et  $\mathbf{A}$  est symétrique sous (H5), nous avons  ${}^t\boldsymbol{\lambda}^*(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} - \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}) = \frac{({}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\mu}})^2}{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}} \geq 0$ . QED.
- ii) Nous avons  ${}^t\boldsymbol{\lambda}^*(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} - \boldsymbol{\varepsilon}^*) = {}^t\boldsymbol{\lambda}^*\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}^* - \frac{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\mu}}}{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}} {}^t\boldsymbol{\lambda}^*\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}$ . Comme  $\boldsymbol{\lambda}^* = \tilde{\boldsymbol{\mu}}$  sous (H1)-(H2) et  $\mathbf{A}$  est symétrique et semi-définie positive, (ii) découle d'une application directe de l'inégalité de Cauchy-Schwarz. QED.
- iii) Nous avons  ${}^t\boldsymbol{\gamma}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} - \boldsymbol{\varepsilon}^*) = {}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}^* - \frac{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\tilde{\boldsymbol{\mu}}}{{}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}} {}^t\boldsymbol{\gamma}\mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}$ . Comme  $\boldsymbol{\lambda}^* = \tilde{\boldsymbol{\mu}}$  sous (H1)-(H2), (iii) est démontrée. QED.

**Démonstration** de la proposition 5.3

- i) Soit  $\mathbf{M}$  (resp.  $\tilde{\mathbf{M}}$ ) la matrice  $4 \times 4$  du système (5.46) (resp. (5.50)). Le calcul de  $|\mathbf{M}|$  donne  $|\mathbf{M}| = \tau_1\tau_2(\delta + \tau_1)(\delta + \tau_2) \left[ \beta {}^t\boldsymbol{\theta} \left( \boldsymbol{\Delta}_{[\tau]}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]}^{-1} \right) \boldsymbol{\theta} + 1 \right]$ . Comme  $\mathbf{A}$  est semi-définie positive,  $|\mathbf{M}| > 0$ . La démonstration de  $|\tilde{\mathbf{M}}| > 0$  est similaire, avec  $\tilde{\mathbf{A}}$  remplaçant  $\mathbf{A}$ . QED.
- ii) Le calcul des valeurs propres de  $\mathbf{M}$  donne :

$$\nu_{1/2} = \frac{1}{2} \left( \delta + \sqrt{\delta^2 + 2 \left( Q \pm \sqrt{Q^2 - 4|\mathbf{M}|} \right)} \right), \quad \nu_{3/4} = \frac{1}{2} \left( \delta - \sqrt{\delta^2 + 2 \left( Q \pm \sqrt{Q^2 - 4|\mathbf{M}|} \right)} \right)$$

où  $Q = \beta {}^t\boldsymbol{\theta}\mathbf{A}\boldsymbol{\theta} + \tau_1(\delta + \tau_1) + \tau_2(\delta + \tau_2) > 0$ .  $\nu_1$  et  $\nu_2$  sont positives et associées aux trajectoires optimales convergentes.  $\nu_3$  et  $\nu_4$  sont négatives et associées aux trajectoires optimales divergentes. On procède de la même façon pour les valeurs propres de  $\tilde{\mathbf{M}}$ , avec  $\tilde{\mathbf{A}}$  remplaçant  $\mathbf{A}$ . QED

**Démonstration** de la proposition 5.4

- i) L'inversion par blocs de  $\mathbf{M}$  et le calcul de  $\mathbf{M}^{-1} \begin{pmatrix} -\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$  donne :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{z}^{*\infty} \\ \boldsymbol{\lambda}^{*\infty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left( \boldsymbol{\Delta}_{[\tau]} + \beta \mathbf{A} \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]}^{-1} \boldsymbol{\theta} {}^t\boldsymbol{\theta} \right)^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} \\ \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]}^{-1} \mathbf{A} \left( \boldsymbol{\Delta}_{[\tau]} + \beta \mathbf{A} \boldsymbol{\Delta}_{[\delta+\tau]}^{-1} \boldsymbol{\theta} {}^t\boldsymbol{\theta} \right)^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{BAU}} \end{pmatrix} \quad (5.53)$$

A partir de l'équation (5.53) pour  $\boldsymbol{\lambda}^{*\infty}$  et en réarrangeant (dans le cas  $n = 2$ ), on trouve :

$$\lambda_1^{*\infty} = \frac{\theta_1\tau_2\varepsilon_1^{\text{BAU}} + \theta_2\tau_1\varepsilon_2^{\text{BAU}}}{|\mathbf{M}|} \beta(\delta + \tau_2)\theta_1 \quad (5.54)$$

$$\lambda_2^{*\infty} = \frac{\theta_1\tau_2\varepsilon_1^{\text{BAU}} + \theta_2\tau_1\varepsilon_2^{\text{BAU}}}{|\mathbf{M}|} \beta(\delta + \tau_1)\theta_2 \quad (5.55)$$

Le calcul du rapport des prix fictifs s'en déduit. Le même raisonnement s'applique à  $\frac{\tilde{\mu}_2^\infty}{\tilde{\mu}_1^\infty}$ , avec  $\tilde{\mathbf{M}}$  à la place de  $\mathbf{M}$ . QED.

- ii) Des équations (5.54)–(5.55), on déduit facilement que  $\frac{\tilde{\mu}_1^\infty - \lambda_1^{*\infty}}{\lambda_1^{*\infty}} = \frac{\tilde{\mu}_2^\infty - \lambda_2^{*\infty}}{\lambda_2^{*\infty}} = \left( |\mathbf{M}| - |\tilde{\mathbf{M}}| \right) / |\tilde{\mathbf{M}}|$ . Le signe de  $\tilde{\mu}_j^\infty - \lambda_j^{*\infty}$  ( $j = 1, 2$ ) est donc le même que celui de  $|\mathbf{M}| - |\tilde{\mathbf{M}}|$ .

$$|\mathbf{M}| - |\tilde{\mathbf{M}}| = \frac{\beta \gamma_1^2 \theta_1^2 \tau_2 (\delta + \tau_2)}{{}^t \boldsymbol{\gamma} \mathbf{A} \boldsymbol{\gamma}} |\mathbf{A}| \left( \frac{\gamma_2}{\gamma_1} - \frac{\theta_2 (\delta + \tau_1)}{\theta_1 (\delta + \tau_2)} \right) \left( \frac{\gamma_2}{\gamma_1} - \frac{\theta_2 \tau_1}{\theta_1 \tau_2} \right) \quad (5.56)$$

Comme  $\mathbf{A}$  est semi-définie positive (définie si  $\text{rang}(\mathbf{E}) = n$ ), la partie (ii) est démontrée. QED.

- iii) La démonstration consiste simplement à introduire  $\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{\theta_2 (\delta + \tau_1)}{\theta_1 (\delta + \tau_2)}$  dans l'équation (5.53), on réarrange et on trouve  $\mathbf{z}^{*\infty} = \tilde{\mathbf{z}}^\infty$ . QED.



## Chapitre 6

# De l'effet de la valeur des PRG sur les coûts d'abattement du secteur agricole européen.

### Introduction

Le chapitre précédent a mis en lumière les atouts et les faiblesses du concept de PRG. Ces indices sont néanmoins actuellement utilisés pour comparer les émissions des différents GES et ils s'imposent par les accords internationaux. Uniquement basés sur des critères physiques, leur implication économique est fondamentale : ils représentent les prix relatifs des différents GES par rapport au CO<sub>2</sub>. Les PRG ont donc un rôle prépondérant car ils déterminent le poids relatif des réductions des émissions des différents gaz à effet de serre les uns par rapport aux autres. Le secteur agricole émet principalement deux gaz à effet de serre : le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Les émissions agricoles considérées sont uniquement celles qui ont un lien direct avec l'activité agricole, conformément aux normes de comptabilisation internationales (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001), reprises par le CITEPA<sup>1</sup>. Ne sont donc pas prises en compte les émissions associées à la production des intrants et des outils, ni celles associées au transport des produits. Les émissions associées à l'utilisation d'énergie fossile sur l'exploitation ne sont pas non plus comptabilisées au titre des émissions d'origine agricole. L'étendue des émissions "d'origine agricole" est restreinte aux émissions directement imputables à l'activité de production agricole.

Il faut également noter que la séquestration de carbone dans la biomasse aérienne et dans les sols agricoles n'est pas non plus comptabilisée au titre des émissions d'origine agricole, mais prise en compte dans la catégorie "UTCUTF" (Usage des terres, changement d'usage des terres, et foresterie). Les puits de carbone que sont les sols agricoles et la biomasse aérienne ont été mis en avant par les pays disposant d'une grande quantité de terres afin de fournir des possibilités d'abattement larges et peu coûteuses. Avec l'inclusion des puits de carbone dans le protocole de Kyoto, cette question a conduit à un

---

<sup>1</sup>Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique, chargé de comptabiliser les émissions de GES françaises.

certain nombre de controverses sur la façon de calculer la séquestration de carbone dans les inventaires nationaux et sur son rôle dans la lutte contre le changement climatique. En fait, prendre en compte la séquestration pose le problème de la non permanence de ce stockage (Arrouays et al. 2002). En effet, un changement de pratique peut conduire à un retour immédiat du carbone stocké dans l’atmosphère. La séquestration de carbone associée aux activités agricoles n’est donc pas évaluée dans ce chapitre.

Ce secteur est amené à jouer un rôle dans la lutte contre le changement climatique à travers une réduction des émissions d’origine agricole. Il est donc intéressant de souligner la sensibilité des coûts d’abattement du secteur agricole à la valeur des PRG. L’objet de ce chapitre est de mesurer l’influence de la valeur des PRG sur les coûts d’abattement du secteur agricole européen.

Le modèle AROPAj, présenté précédemment, est un outil adapté à l’évaluation des coûts d’abattement du secteur agricole européen, même si la flexibilité laissée aux exploitants agricoles est limitée dans le modèle. Les agents économiques modélisés par les groupes-type ont une structure d’exploitation fixe : leur surface agricole utile est constante par exemple ; il n’est pas non plus possible de prendre en compte des investissements réduisant les émissions (comme des méthaniseurs) ou une diminution des intrants azotés à travers la prise en compte de fonction de réponse des rendements à l’azote (comme aux chapitres 8 et 9). L’étude présentée dans ce chapitre s’appuiera donc sur cet outil.

Parmi les valeurs des indices d’équivalence potentiels, la communauté scientifique économiste, si elle en a proposé beaucoup, n’est pas parvenue à un consensus. Aucun indice d’équivalence fondé sur des critères économiques ne semble en effet émerger. Les travaux présentés au chapitre précédent sous forme analytique sont difficiles à quantifier. Les hypothèses qui nous permettraient de le faire seraient très fortes et hypothéqueraient la robustesse des valeurs numériques. Nous nous sommes donc tournés vers le concept de PRG, qui permet de proposer différentes valeurs numériques des indices, selon l’horizon temporel choisi (20, 100 ou 500 ans).

Une première section présente la méthode utilisée pour calculer les coûts d’abattement du secteur agricole européen. Une deuxième section met en lumière les principaux résultats obtenus, selon la valeur des PRG du  $\text{CH}_4$  et du  $\text{N}_2\text{O}$ .

## 6.1 Méthode utilisée

### 6.1.1 Calcul des émissions dans le modèle AROPAj

La méthode de calcul des émissions dans le modèle AROPAj reprend celle proposée par l’IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2001). Elle a été introduite dans le modèle par De Cara et al. (2005). Elle combine l’utilisation de données sur les activités spécifiques aux pays (sur les effectifs animaux, les surfaces cultivées, les engrais utilisés, les systèmes de gestion des déjections, etc.) et des facteurs d’émissions. Les pays de l’UE15, en tant que signataires de la convention cadre des Nations-Unies sur le changement climatique, s’obligent à faire un bilan chaque année de leurs émis-

sions de GES selon cette méthode de calcul. Les États choisissant d'autres facteurs d'émissions ou d'autres méthodes de calcul doivent documenter scientifiquement ces choix. La méthode IPCC offre donc un cadre commun pour comptabiliser les émissions et assure une certaine cohérence des chiffres rapportés par les États. Les émissions agricoles comptabilisées dans le modèle AROPAj proviennent de 6 processus identifiés par l'IPCC : les émissions de  $\text{CH}_4$  imputables à la fermentation entérique, les émissions de  $\text{CH}_4$  imputables à la gestion du fumier, les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  imputables à la gestion du fumier, les émissions directes de  $\text{N}_2\text{O}$  des sols cultivés, les émissions indirectes de  $\text{N}_2\text{O}$  résultant de l'azote utilisé, et les émissions de  $\text{CH}_4$  imputables à la riziculture. Les autres émissions non prises en compte sont celles imputables au brûlage dirigé des savanes et à la combustion des résidus de cultures. Ces sources sont en effet mineures pour l'agriculture européenne.

Le calcul des émissions selon la méthode IPCC se fonde sur des relations linéaires à partir de données sur les activités émettrices. Les émissions totales sont donc calculées comme le produit scalaire du vecteur des facteurs d'émissions par le vecteur des données sur les activités émettrices. Dans le modèle, les émissions de chaque ferme-type sont calculées à partir des variables endogènes pertinentes du modèle. Par défaut, les valeurs des facteurs d'émissions sont celles préconisées par l'IPCC, sauf quand il existe des valeurs de facteurs d'émissions spécifiques à chaque État Membre. Au total, vingt et une sources d'émissions sont calculées dans le modèle (tableau 6.1). Les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  sont décomposées en 8 sources, celles de  $\text{CH}_4$  en 13. Le détail des différentes sources permet de mieux comparer les calculs d'AROPAJ aux inventaires nationaux. Toutes les émissions sont converties en équivalent  $\text{CO}_2$  en utilisant les PRG.

Les émissions sont liées à trois types de variables endogènes du modèle (De Cara et al. 2005) : les surfaces cultivées, l'alimentation animale, et les effectifs d'animaux. Les quantités d'engrais utilisées pour chaque culture sont en revanche fixées dans AROPAj (le modèle est ici utilisé dans sa version avec des rendements agricoles exogènes). Les dépenses en engrais sont obtenues à partir des données du RICA et de méthodes économétriques. Un engrais minéral représentatif est utilisé pour chaque culture et chaque pays, les prix selon le contenu azoté de l'engrais sont dérivés des bases de données FAO-STAT et Eurostat. Ces deux informations permettent de calculer la quantité d'azote minéral appliquée à chaque culture et pour chaque ferme-type. Les facteurs d'émissions ainsi que les paramètres de volatilisation et de lessivage sont issus des communications nationales de chaque État-Membre. Il en est de même pour les paramètres associés à la fixation biologique de l'azote, et à l'azote contenu dans les résidus de culture. Les rendements sont ceux du RICA. C'est donc uniquement par le choix de leur assolement que les exploitants du modèle AROPAj peuvent modifier leurs émissions associées aux cultures. Les émissions de méthane issues de la fermentation entérique et de la gestion du fumier dépendent pour chaque animal du contenu énergétique de l'alimentation animale. Dans le modèle, les exploitants ont plusieurs possibilités pour nourrir leurs animaux : ils peuvent utiliser leur propre production de fourrages et de cultures, ou acheter des fourrages ou acheter 4 types de concentrés. Trois contraintes doivent en

## 6.1. Méthode utilisée

Sources	Activité	Variables associées
<b>N<sub>2</sub>O des sols agricoles</b>		
<b>Émissions directes</b>		
Engrais minéraux	Quantité d'engrais N	Surface cultivée
Épandage de fumiers	Excrétion d'N par les animaux	Nombre d'animaux
Fixation biologique d'N	Production de légumineuses	Surface en légumineuses
Résidus de cultures	Réutilisation des résidus	Surface cultivée
<b>Émissions indirectes</b>		
Déposition atmosphérique	Quantité d'N	Surface cultivée et Nombre d'animaux
Lessivage et Ruissellement	Quantité d'N	Surface cultivée et Nombre d'animaux
<b>Gestion du fumier N<sub>2</sub>O</b>		
Pâturage	Excretion d'N sur pâture	Nombre d'animaux
<b>Gestion du fumier CH<sub>4</sub></b>		
Bovins laitiers	Contenu en énergie	Alimentation animale
Bovins non laitiers	Contenu en énergie	Alimentation animale
Ovins	Contenu en énergie	Alimentation animale
Caprins	Contenu en énergie	Alimentation animale
Porcs	Contenu en énergie	Alimentation animale
Volailles	Contenu en énergie	Alimentation animale
<b>Fermentation entérique CH<sub>4</sub></b>		
Troupeaux laitiers	Contenu en énergie	Alimentation animale
Troupeaux non laitiers	Contenu en énergie	Alimentation animale
Ovins	Contenu en énergie	Alimentation animale
Caprins	Contenu en énergie	Alimentation animale
Porcs	Contenu en énergie	Alimentation animale
Volailles	Contenu en énergie	Alimentation animale
<b>Culture du riz (CH<sub>4</sub>)</b>	Surface en riz	Surface en riz

TAB. 6.1 – Sources d'émissions de GES prises en compte dans le modèle

parallèle être respectées : chaque animal doit recevoir une quantité minimale en énergie et en protéines, et chaque animal ne peut ingérer plus d'une certaine quantité de matière (Jarrige 1988). Une dernière catégorie d'émissions ne dépend que du nombre d'animaux. C'est par exemple le cas des émissions de N<sub>2</sub>O associées à la gestion des déjections. Dans le modèle, on a fait l'hypothèse d'un capital animal quasi-fixe, i.e. le nombre d'animaux ne peut varier pour chaque catégorie que de façon limitée ( $\pm 15\%$  dans les simulations présentées ci-après).

Afin d'évaluer la performance du modèle pour le calcul des émissions agricoles européennes, il est nécessaire de comparer les émissions calculées par AROPAj aux émissions issues des inventaires nationaux de chaque État-Membre. Ce travail a été effectué par De Cara et al. (2005). Il montre que le modèle capture environ 85% des émissions agricoles européennes. L'écart observé s'explique en partie par le fait que le modèle se base sur le RICA qui ne représente pas complètement l'agriculture européenne. Les émissions les plus précises concernent celles de N<sub>2</sub>O des sols agricoles (93%) et la fermentation

entérique (84%). Le modèle capture seulement entre 60 et 70% des autres émissions. La performance du modèle varie également d'un pays à l'autre. Si en général, les émissions sont sous estimées (surtout du fait des émissions associées au fumier), pour quelques pays (comme la Grande-Bretagne ou les Pays-Bas), les émissions sont surestimées. Les différences s'expliquent en partie par la représentativité différente du RICA selon les États Membres.

### 6.1.2 Discussion

La méthode de calcul des émissions préconisée par l'IPCC n'est pas la seule méthode disponible. Des estimations d'émissions peuvent par exemple être obtenues à partir de modèles biophysiques comme EPIC (McCarl & Schneider 2001) ou CERES (Durandeu et al. 2007). Ces approches alternatives ont en général le mérite d'être plus précises. Il est en effet légitime de s'interroger sur la capacité de la méthode IPCC à prendre en compte les conditions agricoles locales en utilisant des facteurs d'émissions moyennés sur un large ensemble de situations. Les coefficients IPCC, se voulant "universels" sont forcément empreints d'une grande incertitude. Par exemple, pour les émissions de  $N_2O$  issues des épandages d'azote sur les sols, ne sont pris en compte ni le type de culture, ni les conditions climatiques. Flynn et al. (2005) illustrent pour l'Écosse les développements d'une nouvelle méthodologie qui reprend la structure simple de la méthodologie IPCC mais incorpore des facteurs d'émissions dépendant des cultures et du climat. Leur méthode inclut également un facteur pour prendre en compte l'effet du tassement des sols associé aux animaux en pâture. Ces facteurs sont fondés sur des études au champ récentes en Écosse et ailleurs au Royaume-Uni. Sous les conditions actuelles, la nouvelle méthodologie produit des estimations significativement plus élevées des émissions annuelles de  $N_2O$  telles que calculées par l'IPCC. Un changement de climat pourrait également augmenter les émissions de  $N_2O$  de +14%, si les engrais et les pratiques de gestion des terres restent inchangées.

Néanmoins, obtenir une méthode de comptabilisation des émissions qui assure une certaine cohérence et la possibilité de faire des comparaisons pour un nombre assez large de pays nécessite obligatoirement de représenter de façon stylisée les processus biologiques complexes à l'origine des émissions agricoles.

Par ailleurs, les coefficients IPCC sont utilisés dans la réalité pour calculer les inventaires nationaux. Ils sont la référence pour vérifier que les États ont remplis leur engagement en terme de réduction d'émissions. C'est cette méthode qui permettra de calculer l'effort fait par chaque État dans la lutte contre le changement climatique. A défaut d'avoir un fondement scientifique inébranlable, ils sont une base politique indiscutable. Par ailleurs, la prise en compte de facteurs d'émissions spécifiques à chaque pays permet de capturer une partie de la variabilité spatiale des processus.

### 6.1.3 Calcul des coûts d'abattement

Dans le modèle AROPAj, il est possible d'introduire une taxe sur les émissions de GES d'origine agricole. La taxe ainsi introduite permet d'évaluer les coûts d'abattement

pour chaque exploitant-type du modèle. La taxe affecte le revenu de chaque agent, selon les quantités de gaz émises, exprimées en tonnes d'équivalent-CO<sub>2</sub>. La fonction objectif de chaque ferme-type est diminuée du montant de la taxe payé par chaque agent, selon la quantité de GES qu'il émet, quelque soit la source. Par ailleurs, les simulations présentées ci-dessous considèrent que la politique agricole est celle de l'Agenda 2000. En modifiant ainsi le modèle, pour tout niveau  $t$  de taxe, on obtient, par construction, un niveau d'émissions tel que la perte marginale de revenu pour une tonne abattue supplémentaire est égale à  $t$  €, pour chaque groupe-type. Autrement dit, abattre une tonne supplémentaire coûterait  $t$ ,  $t$  représente donc le coût marginal d'abattement. En faisant varier  $t$  dans un intervalle de 0 à 200 € la tonne de CO<sub>2</sub>, on obtient ainsi la courbe d'offre de réduction des émissions, qui est la courbe des coûts marginaux d'abattement des agents économiques représentés dans le modèle.

Si cette méthode nous permet d'utiliser le modèle AROPAj pour déterminer les coûts marginaux d'abattement du secteur agricole, la mise en œuvre d'une telle taxe est complexe. Taxer directement les émissions de GES afin de tenter de les limiter est économiquement la voie la plus efficace, cependant elle est impossible à mettre en place. En effet, la mesure des émissions du secteur agricole est difficile, en particulier à cause du caractère diffus des sources d'émissions et surtout de leur hétérogénéité. Parallèlement, le coût du contrôle serait également trop élevé. Une solution est d'instaurer une taxe de second rang sur les facteurs marchands et/ou observables responsables des émissions (les quantités d'engrais, les animaux, l'alimentation animale (De Cara et al. 2005))

## 6.2 Résultats

### 6.2.1 Différentes valeurs possibles pour les PRG

Afin de tester la sensibilité des coûts d'abattement aux valeurs prises par les PRG, nous avons choisi trois séries de valeurs pour ces derniers. Si un consensus existe dans la communauté scientifique, les rapports successifs du GIEC (1990, 1995, 2001, et à venir 2007) mentionnent toujours plusieurs valeurs correspondant à différents horizons temporels utilisés dans le calcul du PRG. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 6.2. On peut voir qu'elles ont évolué entre le second et le troisième rapport du GIEC, au fur et à mesure que se sont affinées les connaissances scientifiques sur la chimie de l'atmosphère.

Horizon	20 ans	100 ans	500 ans
CO <sub>2</sub>	1	1	1
CH <sub>4</sub>	62 (56)	23 (21)	7 (6)
N <sub>2</sub> O	275 (280)	296 (310)	156 (170)

TAB. 6.2 – Valeur des PRG selon l'horizon considéré. *Source : Troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001), entre parenthèses les valeurs données dans le deuxième rapport (1995)*

D'un point de vue économique, le choix de l'horizon a des conséquences importantes

sur le prix relatif des gaz. Ainsi choisir un horizon à 100 ans revient à considérer qu'une tonne de méthane (respectivement de  $N_2O$ ) vaut 23 (respectivement 296) tonnes de  $CO_2$ , tandis que pour un horizon à 20 ans, la tonne de méthane (respectivement de  $N_2O$ ) vaut près de 3 fois plus (respectivement à peine moins), soit 62 (respectivement 275) tonnes de  $CO_2$  et pour un horizon à 500 ans, trois fois moins (respectivement deux fois moins), soit 7 (respectivement 156) tonnes de  $CO_2$ . Par ailleurs, le prix relatif du méthane par rapport au  $N_2O$  change également selon l'horizon. Il se calcule comme le rapport des PRG des 2 gaz. Ainsi, une tonne de  $N_2O$  vaut 12.86 tonnes de  $CH_4$  ( $296/23$ ) pour un horizon à 100 ans, 4.44 tonnes de  $CH_4$  pour un horizon à 20 ans et 22.29 tonnes de  $CH_4$  pour un horizon à 500 ans. Selon l'horizon, les sources d'émissions agricoles aux coûts d'abattement les plus faibles ne seront donc pas les mêmes.

Enfin, selon le jeu de valeurs que l'on retient, le secteur agricole ne participe pas de la même façon aux émissions totales. Nous avons effectué quelques calculs pour la France à partir des chiffres fournis par le CITEPA pour l'année 2004 (tableau 6.3). Nous n'avons considéré que les trois principaux gaz à effet de serre :  $CO_2$ ,  $CH_4$  et  $N_2O$  et non les six gaz du panier de Kyoto, et les valeurs de PRG du troisième rapport du GIEC (soit 23 pour le méthane et 296 pour le  $N_2O$  à un horizon de 100 ans). Cela explique que l'agriculture participe à hauteur de 20.1% des émissions en 2004 (au lieu de 17%, chapitre 4). Le choix de l'horizon mais plus largement les valeurs retenues pour les PRG ont une influence sensible sur la participation du secteur aux émissions de GES. Pour la France, le secteur participe à hauteur de 20% environ pour l'horizon de 100 ans, deux fois moins, soit 10% pour un horizon à 500 ans, et en revanche à hauteur de 30% pour un horizon de 20 ans.

Emissions	*1000 t	en kt d'équivalent $CO_2$		
		PRG à 20 ans	PRG à 100 ans	PRG à 500 ans
CH4	2785	172670	64055	19495
dont agriculture	1956	121272	44988	13692
$N_2O$	236	64900	69856	36816
dont agriculture	179	49225	52984	27924
$CO_2$	354409	354409	354409	354409
dont agriculture	0	0	0	0
Total		591979	488320	410720
dont agriculture		28.8%	20.1%	10.1%

TAB. 6.3 – Part des émissions agricoles en France selon l'horizon des PRG. CITEPA, 2004

## 6.2.2 Coûts d'abattement

Les résultats obtenus avec le modèle AROPAj montrent que la valeur des PRG a une grande influence sur les coûts marginaux d'abattement. Une première façon d'appréhender les résultats consiste à "oublier" les PRG et à regarder les coûts marginaux d'abattement exprimés en € par tonne de chaque gaz. La figure 6.1 montre que quelque soit l'horizon temporel retenu dans le calcul des PRG, en tonnes de gaz, on abat tou-

jours plus de méthane que de protoxyde d'azote, pour un même niveau de taxe. Dans le modèle, les coûts d'abattement du méthane sont donc plus faibles (en € par tonne de gaz). Ceci s'explique en partie par le fait que pour réduire leurs émissions de méthane, les agents du modèle ont plus de flexibilité que pour réduire leurs émissions de protoxyde d'azote.

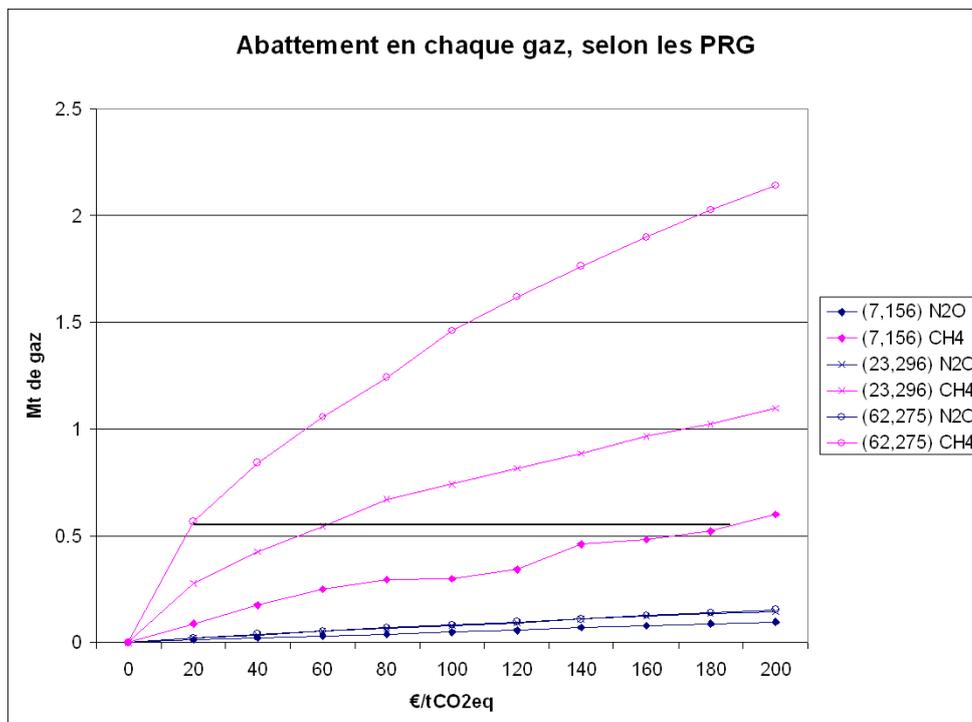


FIG. 6.1 – Coûts marginaux d'abattement, exprimés en € par tonne de gaz, selon différentes valeurs des PRG

La figure 6.1 montre également une certaine indépendance entre les coûts marginaux d'abattement en CH<sub>4</sub> et ceux en N<sub>2</sub>O. En effet, un même niveau de taxe à la tonne de méthane conduit à un même niveau d'abattement en méthane, quelque soit le niveau de la taxe à la tonne de N<sub>2</sub>O. Taxer les 2 gaz de façon indépendante permettrait d'aboutir quasiment au même résultat. Pour calculer la taxe sur le méthane, on multiplie celle sur la tonne de CO<sub>2</sub> par la valeur du PRG du méthane (tableau 6.4). Ainsi, une taxe de 20 € la tonne de CO<sub>2</sub> dans le scénario (62,275) correspond à la même taxe sur le méthane qu'une taxe de 60 € (respectivement environ 180 €) la tonne de CO<sub>2</sub> dans le scénario (23,296) (respectivement le scénario (7,156)). Ce niveau de taxe correspond bien à un même niveau d'abattement en méthane, comme l'illustre la droite horizontale sur la figure 6.1. De la même façon, pour des PRG proches (275 et 296), les courbes d'abattement du N<sub>2</sub>O sont presque confondues. Ceci traduit les interrelations assez faibles entre les émissions agricoles de méthane et celles de protoxyde d'azote, les courbes d'abattement d'un même gaz pouvant s'obtenir par translation à partir de l'une d'elle.

Il s'agit ensuite de confronter les résultats du modèle aux objectifs affichés dans les

PRG	7,156	23,296	62,275
CH <sub>4</sub>	7t	23t	62t
N <sub>2</sub> O	156t	296t	275t

TAB. 6.4 – Taxe (en €) par tonne de gaz, selon les PRG pour une taxe de t € la tonne de CO<sub>2</sub>

accords internationaux. Le protocole de Kyoto stipule ainsi que l'Union Européenne dans son ensemble doit réduire ses émissions totales de 8% par rapport à leur niveau de 1990. La figure 6.2 présente l'abattement en chaque gaz selon le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> et le scénario des valeurs de PRG considéré. Ainsi, selon les valeurs des PRG, le secteur agricole européen pourrait contribuer à la hauteur d'une réduction de 8% de ses émissions pour un coût à la tonne de CO<sub>2</sub> équivalent entre 27 € et 121 € (60 € pour le scénario (23,296)). Si, au regard de la valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> préconisée par le commissariat général au plan (27 €) ou celle observée sur le marché européen de quota (aux alentours de 20 €), ces coûts paraissent élevés, deux éléments sont à rappeler. D'une part, ils constituent plutôt une limite supérieure, du fait du manque de flexibilité offerte aux agents dans le modèle dans la représentation des processus biophysiques (les courbes de réponse des rendements aux intrants azotés ne sont pas ici introduites, voir chapitre 8). D'autre part, si l'objectif global de l'UE est de -8%, il n'est pas obligatoirement efficace de décentraliser cet objectif de façon égalitaire à chaque secteur économique. Ce sont les coûts marginaux d'abattement entre les secteurs qui doivent s'égaliser pour des taux d'abattement différents. Si les coûts d'abattement d'autres secteurs sont plus faibles, il est plus efficace de les faire participer davantage à l'effort de réduction que le secteur agricole. C'est tout l'intérêt de la mise en place d'un marché de permis d'émissions, permettant de décentraliser de façon efficace un objectif global. Ainsi, si le secteur agricole peut participer à l'effort de réduction à un coût plus grand que les autres secteurs, il est plus efficace de lui demander un effort moins important.

Comme indiqué dans la communication de l'Union Européenne à l'UNFCCC en 2003, les émissions agricoles sont en baisse de 7.4% en 2001 par rapport à leur niveau de 1990. Par rapport aux objectifs de Kyoto, le secteur agricole est proche de la cible. Néanmoins, aucune politique environnementale n'est à l'origine de cette diminution des émissions. Il est donc légitime de s'interroger sur la recevabilité de cette baisse des émissions dans le cadre des engagements pris à Kyoto. Depuis 1990, l'Europe est restée dans un scénario de "laissez faire" quant aux émissions agricoles. Les émissions, telles qu'elles sont comptabilisées dans le modèle AROPAj, sont aussi issues d'un scénario de "laissez faire". Par conséquent, le niveau des émissions de 1990 pourrait ne plus être la référence pour la période 2008-2012. Pour cette raison, l'objectif de -8% appliqué au secteur agricole européen peut s'interpréter comme une réduction des émissions par rapport au scénario de "laissez faire", c'est-à-dire, par rapport aux émissions telles qu'elles sont calculées sans taxe sur les émissions.

D'après les résultats du modèle, l'objectif plus ambitieux affiché par la France d'une

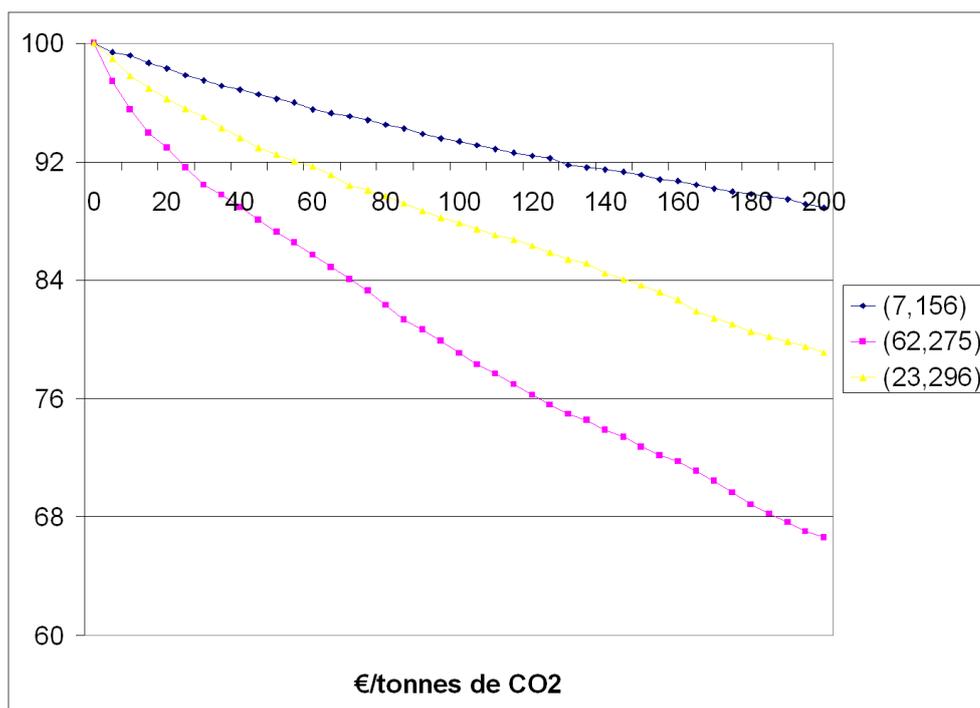


FIG. 6.2 – Coûts marginaux d'abattement, exprimés en base 100, selon les différentes valeurs des PRG

division par 4 des émissions semble plus difficile à atteindre dans le secteur agricole. Néanmoins, cet objectif étant fixé pour l'horizon 2050, des changements structurels sont envisageables à cette échéance. Ils ne sont pas pris en compte dans le calcul des coûts effectués par le modèle.

Enfin, de façon plus classique, la figure 6.3 présente les coûts marginaux d'abattement en € par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>. Pour les scénarios (7,156) et (23,296), l'abattement en protoxyde d'azote est plus élevé que celui en méthane pour un même niveau de prix du CO<sub>2</sub>. C'est-à-dire que les coûts marginaux d'abattement du N<sub>2</sub>O sont plus faibles que ceux du CH<sub>4</sub>. Cette tendance s'inverse pour le scénario (62,275) des PRG calculés sur un horizon de 20 ans, donc quand plus de poids est accordé au méthane.

L'évaluation des coûts d'abattement à l'aide du modèle passe par l'introduction d'une taxe directe sur les émissions. Même si il serait irréaliste de mettre en place un tel outil fiscal, il est intéressant de regarder les conséquences qu'elle aurait sur les marges des exploitants agricoles européens. La figure 6.4 présente en base 100 l'impact d'une telle taxe, sur les émissions d'une part et sur la marge d'autre part. Comme on peut le voir, une hiérarchie est respectée. Pour un niveau de taxe donné, l'abattement sera le plus grand quand la baisse de marge sera également la plus importante. Ainsi, pour une taxe de 20 € la tonne de CO<sub>2</sub>, ce sont les PRG à 20 ans qui permettent un plus grand niveau d'abattement (7%). En contrepartie, la baisse de marge est la plus forte (-13%). A l'opposé, pour ce même niveau de taxe et des PRG calculés sur 500 ans conduisent à un abattement faible (1.5%) et une faible baisse de marge (3%). Poser la question de cette manière renvoie à des problèmes plus vastes concernant la redistribution. Toute

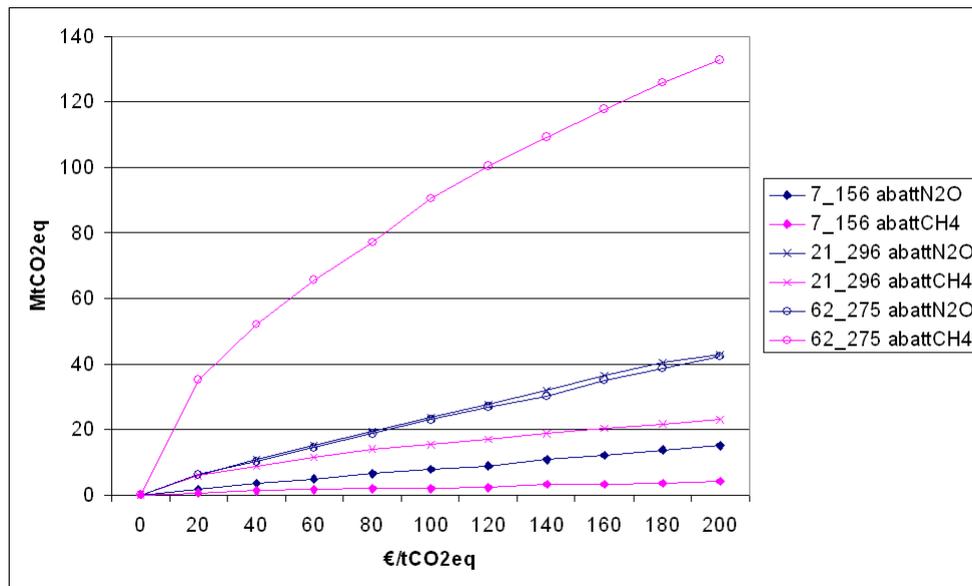


FIG. 6.3 – Coûts marginaux d'abattement, en équivalent CO<sub>2</sub>, selon différentes valeurs des PRG

politique fiscale cherchant à limiter les émissions d'origine agricole devra prendre en considération l'impact sur le revenu agricole.

### 6.2.3 Discussion

Le niveau des coûts présentés peut paraître élevé. Il faut cependant noter que les exploitants représentés par la modélisation disposent de faibles marges de manœuvre. Concernant les terres cultivées, ils peuvent allouer leur terre entre les différentes activités du modèle, mais leur surface agricole utile est constante. Il leur est possible d'orienter leurs productions vers des activités végétales moins émettrices, mais pas de réduire les quantités d'azote épandues sur chacune des cultures mises en œuvre. Ils doivent de plus respecter des contraintes de rotation ainsi que les contraintes de la PAC.

C'est sans doute du côté des productions animales que leur flexibilité est la plus grande. Ils ont la possibilité de faire varier leur cheptel dans un intervalle de  $\pm 15\%$ , ce qui peut permettre de réduire les émissions de CH<sub>4</sub>. Parallèlement, ils peuvent choisir l'alimentation animale la moins émettrice (les aliments concentrés sont ainsi réputés pour être moins méthanogènes que les aliments produits sur l'exploitation dans la mesure où ils permettent une transformation "plus efficace" de l'énergie de des protéines incorporées en lait et la viande).

De nombreuses options de réduction ne sont néanmoins pas mises en œuvre dans le modèle, tel que nous l'avons utilisé. C'est le cas par exemple des systèmes de méthanisation des effluents d'élevage évoqués au chapitre 4. C'est ainsi le cas de la séquestration du carbone, dans les sols grâce à un changement de pratique, options mises en œuvre dans les travaux de De Cara & Jayet (2006), ou bien dans la biomasse par la plantation

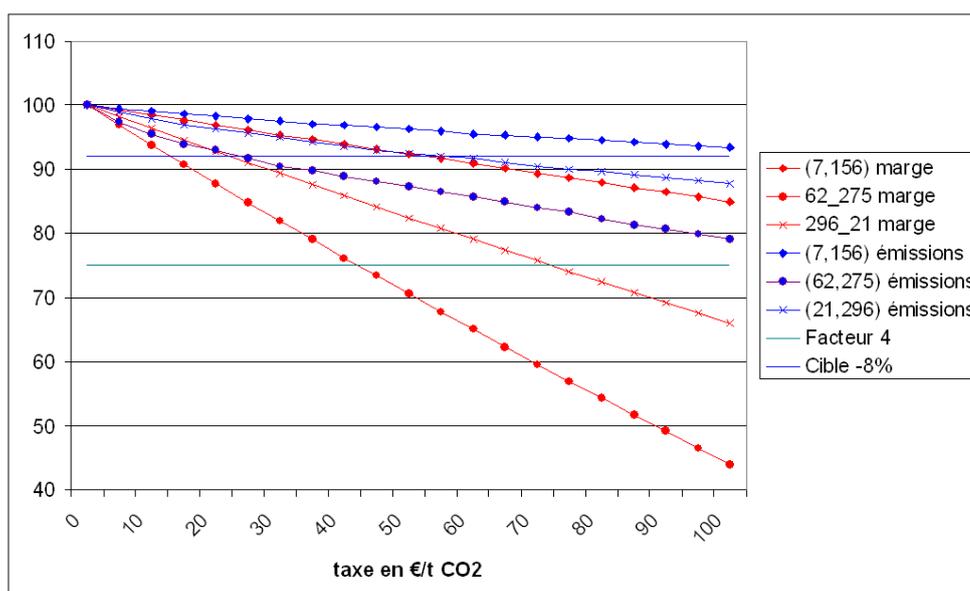


FIG. 6.4 – Effet simultané sur la marge et les émissions d’une taxe.

de forêts. Il faut donc interpréter ces chiffres comme une estimation haute des coûts d’abattement du secteur agricole.

## Conclusion

Cette analyse de sensibilité des coûts marginaux d’abattement du secteur agricole à la valeur des PRG a deux objectifs. Le premier est d’illustrer les possibilités d’évaluation des coûts offertes par le modèle AROPAj présenté précédemment. Modèle économique de l’offre bien adapté à l’évaluation des politiques agricoles, sa richesse permet également de l’utiliser à d’autres fins, comme ici sur des aspects environnementaux.

Le deuxième objectif est de souligner l’influence notable de la valeur des PRG sur les coûts marginaux d’abattement du secteur agricole. L’objectif fixé par le protocole de Kyoto (-8%) pourrait ainsi être atteint par le secteur agricole pour un coût de la tonne de CO<sub>2</sub> équivalent se situant entre 27 € et 121 €, soit entre une et près de 5 fois le prix proposé par le Commissariat Général au Plan. Retenir un horizon plutôt qu’un autre pour le calcul des PRG a donc des conséquences sur les choix d’abattement, en particulier sur l’arbitrage entre les réductions des émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O. Ces conséquences pourraient à plus long terme se répercuter sur les orientations techniques et économiques des exploitations.

La part du secteur agricole dans les émissions totales est également très sensible à l’horizon retenu pour le calcul des PRG. En conséquence, le rôle du secteur agricole pour lutter contre le changement climatique peut prendre plus ou moins d’importance.

Différentes méthodes existent pour calculer les émissions de GES d’origine agricole. Des travaux récents entrepris dans le cadre du programme européen GENEDEC cherchent ainsi à évaluer les émissions en s’appuyant sur AROPAj et un modèle bio-

physique (Durandea et al. 2007). Actuellement, la méthode préconisée par le GIEC domine toutes les autres. D'autres règles pourraient néanmoins émerger. Il leur faut alors être validées et utilisables au moins à l'échelle d'un État. Enfin les conséquences du changement climatique pourraient, si ce n'est remettre en cause la méthode, conduire à réviser la valeur des coefficients retenus actuellement (Flynn et al. 2005).



Troisième partie

**Changement climatique et  
adaptation**



## Chapitre 7

# Changement climatique et adaptations pour le secteur agricole

### Introduction

Si l'agriculture contribue à l'augmentation de l'effet de serre, elle est aussi directement sujette au changement climatique et à ses conséquences. Au cours des siècles passés, le climat a évolué et les végétaux se sont naturellement adaptés aux changements climatiques. Les plantes cultivées, en revanche ont presque toujours été transportées par l'homme. Dans le processus de transfert de matériel d'une région du globe à une autre, un ajustement génétique est souvent nécessaire pour permettre son adaptation (Harlan 1987). La sensibilité à la longueur du jour est particulièrement importante. Chez les céréales, les légumineuses à graines et certaines autres plantes cultivées, il est primordial que les plantes arrivent à maturité pendant la saison sèche, juste à la fin de la saison des pluies. Mûrir pendant la saison des pluies provoque une infestation de maladies et d'insectes telle que l'échec total de la culture est probable.

L'impact principal du changement climatique sur l'agriculture se traduit par une modification des rendements. Cet impact ne devrait pas être uniforme à travers le monde. Des régions pourraient profiter du changement climatique tandis que d'autres pourraient subir de lourdes pertes. Les cultures ne seront pas non plus affectées de la même façon. L'évaluation des conséquences du changement climatique sur l'agriculture passe par plusieurs étapes intermédiaires. Il s'agit d'abord de prendre en compte le nouveau climat, les données le caractérisant doivent être appropriées à l'usage qui en est fait. Les modèles agronomiques qui permettent d'évaluer les conséquences du climat sur les rendements ont souvent besoin de données journalières et localisées assez précisément. Une fois les rendements évalués, ou pour le moins les conséquences du nouveau climat sur les rendements, il est possible d'en mesurer les conséquences à l'aide d'un modèle économique approprié, sur le bien être, les prix, le nombre de personnes risquant de souffrir de la faim, les productions, ou l'allocation des terres. Par ailleurs, face à de nouvelles conditions climatiques, l'adaptation sera à la fois naturelle et indispensable

pour minimiser les pertes ou profiter au mieux des nouvelles opportunités apportées par le changement de climat.

Ce chapitre a pour objectif de préciser exactement les termes qui seront employés par la suite : scénario de changement climatique, adaptation, évaluation économique, à partir d'une large revue de la littérature. Dans un premier temps, nous montrerons ce qui a été fait en terme de mesure des impacts agronomiques : l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> modifie d'une part le climat mais aussi le fonctionnement des plantes directement (effet fertilisant du CO<sub>2</sub>) et indirectement (augmentation de la température et plus généralement modification du climat). Ensuite, nous définirons la notion d'adaptation, et donnerons des exemples appliqués au secteur agricole. Enfin, nous présenterons les différentes approches économiques pour évaluer les conséquences du changement climatique pour l'agriculture.

## 7.1 Changement climatique et impacts agronomiques

### 7.1.1 Les scénarios de changement climatique

Afin de proposer un cadre commun d'étude sur le changement climatique, l'IPCC (2000) propose quatre familles de scénarios de changement climatique. Ces scénarios, s'ils ne prennent pas en compte l'ensemble des possibles (par exemple, il n'y a pas de scénario catastrophe), tentent de décrire le siècle à venir selon différentes hypothèses de développement économique. Quatre grandes régions sont distinguées dans ces scénarios : les pays de l'OCDE, l'Asie, l'Europe de l'Est et l'ex-URSS, et le reste du monde.

	Scénarios			
	A1	A2	B1	B2
Croissance population (milliards)	Faible ~ 7	Élevée ~ 15	Faible ~ 7	Moyenne ~ 10
Croissance du PIB (trillion 1990 US\$)	Très élevée 525-550	Moyenne 243	Elevée 328	Moyenne 235
PIB par tête (US\$)				
Industrialisés	107,300	46,200	72,800	54,400
en développement	66,500	11,000	40,200	18,000
Consommation d'énergie	Très élevée/Elevée	Elevée	Basse	Moyenne
Changement d'usage des terres	Faible-Moyen	Moyen-Elevé	Elevé	Moyen
Cultures	+3%	–	-28%	+22%
Forêts	+2%	–	+30%	+5%
Disponibilité des ressources	Elevé/Moyen	Faible	Faible	Moyen
Changement technologique	Rapide	Lent	Moyen	Moyen
Energie favorisée	Fossile/Mix/ Non-fossile	Diversité régionale	Efficacité et dématérialisation	"Business as usual"

TAB. 7.1 – Scénarios SRES (IPCC, 2000), les chiffres concernent 2100.

La famille de scénarios A1 considère une croissance économique très rapide avec une mondialisation croissante, une augmentation de la richesse globale et une convergence entre les régions. Les différences entre les revenus régionaux par tête se réduisent. Tandis que prédominent les valeurs matérielles et consuméristes, un changement technologique rapide s'opère. La croissance de la population est faible. Cette famille de scénarios se

décompose en trois variantes différents par leurs hypothèses sur les sources d'énergie : A1FI avec du fossile, A1T sans fossile et A1B mélangeant les deux types de sources.

La famille de scénarios A2 suppose un monde très hétérogène. La croissance de la population est plus rapide tandis que la croissance économique est moins rapide que pour le scénario A1. L'idée sous-jacente est un développement autocentré et la préservation des identités locales. La croissance économique est régionale, par conséquent à la fois la croissance du revenu et le changement technologique différent selon les régions.

La famille de scénarios B1 considère la même croissance lente de la population que la famille A1. Le développement prend ici un chemin plus soutenable avec une coopération mondiale en matière de viabilité économique, sociale et environnementale, y compris par le biais d'une plus grande équité, mais sans nouvelles initiatives ayant trait au climat. Des technologies propres et efficaces sont introduites.

Enfin la famille de scénarios B2 suppose une croissance de la population à un taux plus faible que la famille A2. Le développement suit un chemin soutenable, orienté sur le local, dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. Le tableau 7.1 résume les principales hypothèses sous-jacentes aux différentes familles de scénarios. Les tableaux 7.2<sup>1</sup> et 7.3<sup>2</sup> explicitent les conséquences de ces différentes familles de scénarios sur les concentrations en GES et les températures à différentes échéances.

	A1FI	A2	B1	B2
1990s	358	358	358	358
2020s	432	432	421	422
2050s	590	549	492	488
2080s	810	709	527	561

TAB. 7.2 – Concentrations en CO<sub>2</sub> (en ppm) utilisées dans le modèle climatique HadCM3

	A1FI	A2	B1	B2
2020s	0.99	0.93	0.84	0.91
2050s	2.06	1.89	1.45	1.56
2080s	3.97	3.28	2.06	2.35

TAB. 7.3 – Augmentations de température (en °C) attendues par rapport à 1961-1990

Si à première vue ce sont les différences entre les scénarios qui semblent les plus importantes, il est possible de montrer qu'à partir d'un même scénario on peut aboutir à des résultats contrastés au sein d'une région (variabilité selon les modèles climatiques utilisés).

Une des limites des scénarios SRES est la non prise en compte des rétroactions climatiques sur le scénario économique. Il arrive en effet que le scénario économique ne soit pas toujours compatible avec les conséquences qu'il engendre sur le climat.

<sup>1</sup>HadCM3 est un modèle de circulation générale développé au Hadley Center (UK). C'est l'un des modèles utilisés dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001).

<sup>2</sup>Scénarios du troisième rapport d'évaluation du GIEC (2001)

Par exemple, un scénario de croissance peut engendrer un climat très dérégulé ayant un impact fort sur la croissance. Or cet impact ne sera pas pris en compte dans le scénario économique. Arnell et al. (2004) proposent quelques pistes pour les améliorer. Il s'agirait d'abord de désagréger davantage les scénarios, de prendre en compte plus explicitement l'incertitude concernant la croissance de la population et du PIB, et enfin de s'appuyer sur un intervalle plus large de scénarios socio-économiques pour estimer l'intervalle des impacts futurs possibles.

### 7.1.2 Non linéarité et événements extrêmes

Le système climatique terrestre est fortement non linéaire. Les entrées ne sont pas proportionnelles aux sorties, les changements sont souvent épisodiques et brutaux, plutôt que lents et progressifs et les équilibres multiples sont habituels (c'est-à-dire que les mêmes conditions peuvent conduire à plusieurs équilibres possibles). Alors que tout ceci est largement accepté par la Communauté Scientifique, il y a une relativement faible compréhension des différents types de non linéarités, de la façon dont elles se manifestent, dans quelles conditions, et si elles reflètent un système climatique conduit par des forces astronomiques, des rétroactions internes ou une combinaison des deux. Rial et al. (2004) donnent quelques cas de non linéarités climatiques et mettent en lumière les mécanismes clés qui donnent naissance aux comportements non linéaires. Par exemple, deux des sources de méthane présentent des comportements non linéaires. La méthanogénèse dans les zones humides est de plus en plus active quand le réchauffement dépasse le point de congélation. Les hydrates de méthane dans les dépôts sous-marins et sous la toundra deviennent des sources de méthane au dessus de leur température connue de stabilité. De plus, le méthane est un consommateur d'hydroxyde (OH) qui permet de le faire disparaître de l'atmosphère. Toutes choses égales par ailleurs, l'augmentation des émissions de méthane induira une baisse de la concentration d'hydroxyde (OH) et une augmentation de la durée de vie du méthane.

Des modèles de simulations numériques du changement climatique suggèrent également que la fréquence et l'intensité des événements extrêmes pourraient changer. Hormis pour les pluies intenses, les modèles ne concordent pas sur les événements extrêmes. Néanmoins, un petit changement des extrêmes peut avoir un effet disproportionné. Il y a encore peu d'analyses des événements extrêmes de court terme, comme des cyclones tropicaux, des températures extrêmes ou des sécheresses (Salinger et al. 2000). Dans certaines zones, la fréquence de ces événements augmente tandis qu'ailleurs elle est inchangée. De tels changements ont des conséquences importantes pour l'agriculture. Des pluies fortes engendrent érosion et sédimentation d'une part, et engorgement des sols et asphyxie des racines d'autre part. Les sécheresses diminuent à la fois les rendements et la qualité.

Par ailleurs, l'oscillation Nord-Atlantique module le climat européen. Si les travaux sur ce sujet sont nombreux, ils ne sont pas toujours concordants. Salinger et al. (2000) montrent qu'une modification de la température de surface des océans associée à un changement soudain de la circulation océanique (observé il y a 11 500 ans), pourraient

avoir des effets dramatiques sur l'agriculture européenne. Quand l'oscillation est positive (hiver des dernières décennies), des conditions plus sèches que la normale se produisent sur l'Europe du Sud et la Méditerranée et au-dessus de la normale pour les précipitations de l'Islande à la Scandinavie.

Toute évaluation des impacts du changement climatique s'appuyant sur les scénarios SRES doit tenir compte du fait que les événements extrêmes ne sont pas pris en compte.

### 7.1.3 Impacts agronomiques

D'après le dernier rapport de l'IPCC (2007), les rendements agricoles pourraient augmenter légèrement aux latitudes moyennes et élevées pour une hausse des températures locales entre 1 et 3°C et diminuer au-delà dans certaines régions. Aux latitudes plus basses, spécialement dans les régions tropicales, les rendements pourraient diminuer même pour de faibles augmentations de la température (1-2°C). Globalement, la production alimentaire potentielle pourrait augmenter pour une hausse de la température comprise entre 1 et 3°C et diminuer au-delà. Des fréquences plus élevées de survenance de sécheresses et d'inondations sont susceptibles d'avoir des conséquences négatives sur les productions agricoles, en particulier aux latitudes basses, où l'agriculture est de subsistance.

Les conséquences du changement climatique sur les rendements passent par plusieurs mécanismes. Un effet important mais longtemps discuté est l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère induit une augmentation de la photosynthèse, surtout pour les plantes en C3<sup>3</sup>. Par ailleurs, elle induit une augmentation de la résistance stomatique, soit une plus grande efficacité de l'eau, en particulier pour les plantes en C4. Enfin l'allocation en carbone se fait préférentiellement vers les racines, l'activité du sol est stimulé et moins d'azote minéral est disponible pour la plante.

Plusieurs modèles de culture peuvent être utilisés pour simuler les effets d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> sur la productivité. Tubiello & Ewert (2002) explorent la validation des modèles par rapport aux observations concernant la prise en compte de l'effet CO<sub>2</sub>. Depuis 1995, la moitié des études sur les impacts du changement climatique sur les cultures analysent explicitement les effets de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la croissance et le rendement. Cependant, Tubiello & Ewert (2002) insistent sur l'intérêt d'une évaluation continue des modèles par rapport aux données expérimentales, et la prise en compte des facteurs limitant comme les maladies, mauvaises herbes et parasites. Plus récemment, Long et al. (2006) se sont intéressés à l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> à travers une méta-analyse d'études menées dans des conditions expérimentales. Les projections des modèles de culture suggèrent que malgré une augmentation des températures et une diminution de l'humidité des

---

<sup>3</sup>Les plantes présentent différents mécanismes lors de l'étape de fixation du dioxyde de carbone au cours de la photosynthèse. Le type de photosynthèse de la plante est déterminé par le nombre d'atomes de carbone (3 ou 4) de la molécule organique formée en premier lors de la fixation du CO<sub>2</sub>. Le blé, la pomme de terre, la betterave, l'orge sont des plantes en C3 tandis que le maïs et le sorgho sont en C4.

sols qui tendent à réduire les rendements d'ici à 2050, l'effet direct de fertilisation du CO<sub>2</sub> devrait compenser ces pertes. Cependant, les facteurs de la fertilisation au dioxyde de carbone utilisés dans les modèles pour évaluer les rendements futurs ont été obtenus à partir d'études expérimentales en conditions closes menées à la fin des années 1980. La technologie FACE (Free-air concentration enrichment) facilite aujourd'hui les expérimentations à grande échelle pour les principales cultures céréalières sous une atmosphère libre avec une concentration en CO<sub>2</sub> élevée. Dans ces expérimentations, une concentration plus élevée en CO<sub>2</sub> augmentent les rendements mais de moitié moins que dans les études en milieu fermé. L'effet CO<sub>2</sub> serait ainsi responsable d'une hausse de 8 à 15% des rendements pour les espèces sensibles comme le blé, le riz, le soja (plantes en C3), mais il n'y aurait pas de hausse significative du rendement pour des espèces non sensibles comme le maïs ou le sorgho (plantes en C4). Parallèlement, les expérimentations en milieu clos montrent à quel point la plante pourrait profiter d'une atmosphère enrichie en CO<sub>2</sub>. Si des rétroactions négatives apparaissent en milieu ouvert, elles peuvent être limitées en améliorant les plantes. Des efforts de recherche et développement permettraient d'atteindre les gains potentiels de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. L'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> pourrait aussi être limité si la température est supérieure à l'optimum thermique.

La température, et l'augmentation attendue associée au changement climatique auront également des conséquences sur la croissance des plantes et sur les rendements. La température est en effet l'"horloge" du développement de la plante (Godard 2005), les différents stades de développement étant atteints une fois accumulé un certain nombre de "degré-jour". Une augmentation de température pourrait ainsi entraîner une augmentation de la vitesse de développement en phase de croissance, une diminution en phase de repos hivernal pour les cultures d'hiver (vernalisation), des risques d'échaudage au printemps pour les cultures d'hiver (faible remplissage des grains si les températures maximales sont supérieures à 25°C), une diminution de la fertilité des épis et un raccourcissement du cycle cultural des plantes annuelles.

Trnka et al. (2004) évaluent les impacts d'une hausse de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la croissance et le développement de la céréale la plus importante d'Europe Centrale et de l'Ouest, à savoir l'orge de printemps, à l'aide du modèle CERES. Leur analyse se fonde sur des simulations sur plusieurs années avec des séries météorologiques quotidiennes issues d'un générateur de temps stochastique. Les auteurs utilisent quatre scénarios de changement climatique fondés sur des modèles de climat globaux et représentant le cas du doublement de la concentration en CO<sub>2</sub>. Ils trouvent que l'effet indirect sur les rendements de la variation climatique est en général négatif. Son ampleur s'étend de -19% à +5% pour les quatre scénarios. L'ampleur de l'effet direct (effet fertilisant) sur les rendements est de 35 à 55% sous les conditions climatiques actuelles et de 25 à 65% sous un climat altéré. Les rendements augmenteraient au total de 13 à 52%. Leur étude montre que l'effet CO<sub>2</sub> ne se mesure pas que sur le rendement : la longueur des phases de croissance a une légère tendance à la baisse (réduction totale de 9 jours), la production de biomasse augmente (+18-36%), le stress hydrique diminue.

Les prairies seront également affectées par le changement climatique. Soussana et al. (2002) estiment à +20% la hausse des rendements dans le Massif Central dans le cas d'un réchauffement de +2°C.

Les facteurs biotiques (adventices, maladies) sont rarement pris en compte dans les études. Or ils pourraient être également favorisés par le changement climatique. Des progrès sont encore à faire dans cette voie.

## 7.2 Adaptations

### 7.2.1 Définition

L'expérience des décennies passées montre une capacité d'adaptation importante du secteur agricole dans le monde (Burton & Lim 2005), qui pourrait lui permettre d'affronter sereinement les nouvelles conditions climatiques à venir. Il convient néanmoins de tenir compte de l'incertitude des prévisions climatiques et de la probabilité d'impacts régionaux variés. Tandis que la production mondiale pourrait globalement ne pas être affectée, il pourrait en être autrement en ce qui concerne la production des régions des basses latitudes, ayant de plus faibles capacités d'adaptation. L'attention doit porter sur la communauté agricole comme sur les lieux où l'adaptation doit s'enclencher.

L'adaptation en réponse au changement climatique d'origine anthropique cherche à maintenir la viabilité en maximisant les bénéfices et minimisant les pertes (Pittock & Jones 2000). Elle sera nécessaire car le changement climatique est maintenant inévitable malgré les mesures de réduction internationales. En effet, les engagements du protocole de Kyoto ne devraient conduire qu'à une faible réduction des émissions pour le siècle prochain. Les gaz ayant des durées de vie importantes, les émissions totales devraient être réduites de 60 à 80 % pour aboutir à une stabilisation des concentrations de GES dans l'atmosphère. Or, si la France envisage de tels niveaux d'abattement (Facteur 4 d'ici 2050), les émissions des pays en développement vont encore augmenter et probablement dominer le total des émissions à partir du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle. Par ailleurs, il y a un effet retard dans le système climatique principalement à cause de la grande capacité thermique des océans : les océans continueront à se réchauffer longtemps après la stabilisation des concentrations de GES. Les prévisions de changement climatique pour le siècle prochain pourraient conduire à des situations déjà observées dans le passé. Cependant, ces changements vont se produire dans un contexte différent, arrivant au plus haut d'une période interglaciaire en termes de température et de niveau de la mer. Les événements jouent un rôle majeur avec à la fois des niveaux absolus de variables clés et des taux de changement critiques.

L'une des tâches principales de la science de l'adaptation est d'identifier les limites de l'adaptation, c'est à dire d'identifier les niveaux dangereux d'émissions de GES au delà desquels l'adaptation devient impraticable ou trop chère. Cela correspond par ailleurs aux objectifs explicites de la convention de Rio (1992) et du protocole de Kyoto. Le changement climatique dans le futur prévisible ne sera pas un nouvel équilibre stable mais plutôt un processus transitoire. Cela nécessitera non pas une liste d'adaptations

en une impulsion mais un processus d'adaptation continu.

Il y a deux types d'adaptation à considérer : l'adaptation autonome et l'adaptation planifiée. L'adaptation autonome correspond à la réponse des systèmes humains naïfs (non conscient du changement climatique). L'adaptation planifiée se fonde sur la conscience d'un changement climatique à venir et implique l'intervention humaine dans un système pour le protéger ou mettre en évidence ses particularités désirables. Dans ce contexte, l'évaluation des impacts devrait explorer les différentes gestions possible et déterminer le niveau de changement climatique inacceptable car trop coûteux. Cela nécessite cependant une meilleure compréhension des changements environnementaux probables. Les prédictions fermes étant impossibles, une quantification des possibilités et des risques s'impose.

### 7.2.2 Adaptation autonome

Il y a plus de points communs que de différences entre l'adaptation à la variabilité climatique et l'adaptation au changement climatique (Callaway 2004). La société s'adapte probablement déjà au changement climatique même si cette adaptation est difficile voire impossible à détecter. Par exemple, plusieurs années consécutives de gel convaincront les exploitants d'arbres fruitiers de prendre des mesures de protection à bas coût. Si le phénomène persiste, ils feront des investissements plus conséquents ou abandonneront cette activité sans avoir aucune information sur le changement climatique. Ces décisions peuvent être attribuées soit à l'aversion au risque soit à une volonté d'assurance.

En agriculture, l'adaptation autonome consiste par exemple à faire varier la saisonnalité des productions, les dates de semis, les choix de variétés ou d'espèces. Il peut également s'agir d'utiliser de nouvelles variétés (dont des OGM), d'améliorer l'offre d'eau et les systèmes d'irrigation (dont l'efficacité d'usage de l'eau), les pratiques de travail du sol, et d'ajuster les intrants et la gestion des cultures.

D'après le dernier rapport de l'IPCC (2007), des mesures d'adaptation comme une modification des variétés ou des dates de semis permettent de maintenir ou d'améliorer les rendements des céréales pour un réchauffement modéré.

Dans leur étude sur l'orge en Europe Centrale, Trnka et al. (2004) introduisent plusieurs options d'adaptation dont une modification de la date de semis ainsi que plusieurs choix de variétés. Ils montrent que, en conditions de changement climatique (doublement de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>), une date de semis plus précoce (jusqu'à 60 jours) augmente le rendement de 15 à 22%. Cela peut aussi réduire la variabilité du rendement. Par ailleurs, les températures élevées accélèrent en général le développement phénologique de la plante. Cela laisse donc moins de temps pour la formation des grains. L'utilisation d'une variété qui a besoin de plus de "degrés jours" permet de contrecarrer cet effet. En modifiant les paramètres génétiques, on peut simuler l'introduction de nouvelles variétés. En conditions de changement climatique, l'utilisation d'une variété avec une période de végétation plus longue permet d'augmenter le rendement de 1.5% par jour de végétation supplémentaire.

Toutes les stratégies d'adaptation proposées ici peuvent être adoptées par les agriculteurs sans une réelle conscience du changement climatique. Elles ne nécessitent pas l'intervention de l'État sauf peut être pour l'amélioration génétique d'une variété. Néanmoins l'État peut accompagner les agriculteurs pour que l'adoption des nouvelles pratiques soit plus rapide, en favorisant la diffusion de l'information et des connaissances sur les techniques d'adaptation au niveau de l'exploitation.

### 7.2.3 Adaptation planifiée

L'adaptation planifiée consiste d'une part à accompagner l'adaptation autonome (afin de l'accélérer par exemple, mais aussi de la canaliser), et d'autre part à mettre en place des mesures de prévention. Il s'agit de prévoir les difficultés à venir accompagnant le changement climatique et de mettre en place les investissements nécessaires pour en limiter les conséquences. Par exemple, l'État peut développer des agences pour favoriser l'incorporation de l'adaptation dans les politiques nationales de développement économique, ou développer des politiques agricoles dans le contexte des risques locaux (assurance) et mettre en place des infrastructures pour l'irrigation (construction de barrages et de canaux).

L'adaptation planifiée peut aussi jouer en matière de prévisions climatiques de court terme et saisonnière. La vulnérabilité n'est pas seulement une conséquence de la variabilité annuelle du climat en soi mais aussi de sa non prédictibilité. Beaucoup de décisions en agriculture interagissent avec les conditions climatiques et doivent être prises plusieurs mois avant que les impacts du climat ne se matérialisent. L'incertitude climatique nécessite que les décideurs se préparent à la "réalisation" de variables dans un large domaine des possibles, ceci menant souvent à des stratégies de conservation qui réduisent les impacts négatifs les mauvaises années mais souvent à quelques dépendants : productivité moyenne réduite, utilisation inefficace des ressources, dégradation accélérée des ressources naturelles. Les progrès des prévisions climatiques à plusieurs mois suggèrent des opportunités pour améliorer la gestion du risque climatique en agriculture, mais ceci ne pourra se faire qu'à certaines conditions (Hansen 2002). La première condition est que l'information prévisionnelle corresponde à un besoin avéré et ressenti. En second lieu, il n'y aura de bénéfices que si il existe des choix de décisions sensibles à la prévision climatique (le choix de cultiver telle variété en fonction de tel temps). Troisièmement, les bénéfices n'existeront que si la prévision porte sur des composantes de la variabilité climatique donnant prise aux décisions (prévision de la quantité de pluie pendant les mois de croissance par exemple). Quatrièmement, afin que la prévision soit correctement utilisée, il faut une bonne diffusion de l'information. Enfin, une utilisation soutenue de la prévision nécessite une aide institutionnelle et des politiques favorables. Les prévisions climatiques pourraient permettre à la fois de réduire la vulnérabilité aux conditions néfastes et de mieux profiter des bonnes conditions.

Toutes les mesures d'adaptation évoquées plus haut sont à même d'être adoptées à des rythmes différents (tableau 7.4). L'État a ici encore un rôle à jouer, en favorisant la diffusion des mesures d'adaptation autonomes d'une part et en prenant à temps les

grandes décisions d'investissement.

Adaptation	Vitesse d'adoption (années)
Ouverture de nouvelles terres	3-10
Adoption de variété	3-14
Développement de variété	8-15
Adoption d'engrais	10
Système de labour	10-22
Adoption d'une nouvelle culture (soja)	15-30
Équipement d'irrigation	20-25
Infrastructure d'irrigation	50-75
Barrages	75-100

*Source : Reilly & Schimmelpfening (2000)*

TAB. 7.4 – Vitesse d'adaptation

L'adaptation de l'agriculture au climat du 21<sup>ème</sup> siècle suppose que des projets de recherche soient menés de pair avec les météorologues, les agronomes, les pédologues, les hydrologues et les modélisateurs (Perarnaud et al. 2005). Les modèles climatiques de circulation générale constituent l'outil de base pour prédire le changement climatique. Les modèles de culture utilisant en entrée les données des modèles de circulation générale au niveau régional constituent un outil adapté pour permettre l'extrapolation des tendances principales sur les rendements, la consommation d'eau, les engrais, les pesticides, l'environnement et le développement rural. En outre, le changement climatique aura des conséquences sur les maladies et les parasites des cultures, aussi bien que sur les adventices. Il ne suffit pas d'effectuer des recherches sur des nouvelles pratiques agricoles et forestières réduisant les émissions ou favorisant le stockage de carbone, mais aussi de préparer l'adaptation des communautés rurales au changement climatique. Ceci peut être fait à partir d'un ensemble de nouvelles pratiques de management environnemental adaptées au nouvel ordre climatique.

## 7.3 Évaluations économiques des impacts du changement climatique

### 7.3.1 Approches économétriques

Un grand nombre d'études sur l'évaluation des effets du changement climatique s'appuient sur des méthodes économétriques. Par exemple, Liu et al. (2004) mesurent les impacts économiques du changement climatique sur l'agriculture chinoise à l'aide d'un modèle ricardien. A partir de données de sondage au niveau des cantons sur le revenu net, le climat et d'autres données géographiques et économiques concernant 1275 cantons dominés par l'agriculture, ils trouvent que sous la plupart des scénarios de changement climatique, des températures plus élevées accompagnées de précipitations plus fortes auront un effet global positif sur le secteur agricole chinois. Cependant, les impacts varient selon la région. L'application du modèle à cinq scénarios de changement climatique montre que l'Est, le Centre, le Sud, le nord du Nord-Est, et le plateau

devraient bénéficier du changement climatique. En revanche, le Sud-Ouest, le Nord-Ouest et le sud du Nord-Est souffriront du changement climatique. Au Nord, la plupart des scénarios attribue un effet positif au changement climatique. En résumé, la Chine bénéficiera du changement climatique pour la plupart des scénarios.

La plupart des études économétriques sur le changement climatique et ses conséquences pour le secteur agricole utilisent soit une approche à partir de la fonction de production, soit une approche hédonique (Deschenes & Greenstone 2007). L'approche hédonique propose des estimations très variables selon les choix pris sur les variables de contrôle et le traitement des données. Elle ne semble donc pas la plus appropriée dans ce contexte. L'approche par la fonction de production offre une évaluation des effets du climat sur les rendements de cultures particulières dépourvue du biais lié aux déterminants agricoles non contrôlés par les agriculteurs (par exemple, la qualité des sols). Son inconvénient majeur est qu'elle ne prend pas en compte les possibilités de réponse aux changements dont disposent les agriculteurs cherchant à maximiser leur profit. Par exemple, ils peuvent adapter leur consommation d'engrais ou changer de culture et même se tourner vers d'autres activités (golf, complexe hôtelier). Cette approche surestime donc les pertes liées au changement climatique.

### **7.3.2 Évaluation du changement climatique à l'aide de modèles d'équilibre général calculables**

Les modèles d'équilibre général calculables sont également utilisés pour mesurer l'impact du changement climatique sur le secteur agricole. Plus globaux, ils mesurent également les effets sur le secteur agro-alimentaire. Par ailleurs, ils incorporent parfois des changements structurels ou le progrès technique.

Parry et al. (2004) analysent ainsi les conséquences globales des scénarios de changement climatiques SRES (A1FI, A2, B1 et B2) sur les rendements agricoles (blé, maïs, soja et riz), la production et le risque de famine. Les changements attendus dans les rendements sont calculés à partir de modèles de cultures et des données climatiques (observées et associées aux scénarios de changement climatique). Quelques options d'adaptation ont été introduites afin d'améliorer les rendements (date de semis, engrais, irrigation, variétés). Le modèle BLS ("basic linked system", modèle mondial d'échange de denrées) est utilisé pour évaluer les changements sur la production globale de céréales, sur les prix et le nombre de personnes soumises au risque de famine. Il se divise en 35 modèles régionaux/nationaux (Rosenzweig & Parry 1994). Les modèles régionaux sont liés via un module du marché mondial. Les taux de croissance sont déterminés de façon endogène par trois éléments : l'accumulation du capital (investissement, dépréciation), la dynamique du travail (démographie), le progrès technique. Le scénario A1FI (hausse importante de la température) est celui qui est associé à la plus forte décroissance à la fois régionale et globale des rendements (en particulier pour 2080). Le contraste entre les changements de rendement dans les pays développés et dans les pays en développement est le plus important pour le scénario A2. Avec les scénarios B1 et B2, les pays développés et en développement sont moins contrastés du point de vue

des variations de rendement, B2 étant plus favorable que B1 de ce point de vue. Les résultats sur les rendements sont ensuite introduits dans le modèle BLS et montrent que le monde, pour une large partie, est capable de continuer à se nourrir quel que soit le scénario SRES, pour le reste du siècle. Cependant ce résultat suppose que la production des pays développés compense le déclin dans les pays en développement. Tandis que la production globale reste stable, des différences régionales vont probablement croître avec le temps conduisant à une polarisation significative des effets, avec une hausse des prix et du risque de famine parmi les nations les plus pauvres spécialement pour les scénarios avec très grande inégalité (A1FI et A2).

L'intérêt de l'utilisation de modèles globaux est grand : non seulement on mesure l'impact du changement climatique sur la production agricole, mais on mesure également l'impact sur les prix. De même, il est possible de mesurer l'impact sur le nombre de personnes souffrant de malnutrition. En revanche, les impacts plus locaux ne sont pas pris en compte, les rendements sous conditions de changement climatique étant évalués de façon moyenne par région. Les principales sources d'incertitude résident dans le petit nombre de sites (112) pour lesquels les cultures ont été modélisées et dans le manque de modélisation pour des cultures de subsistance comme le manioc ou le millet.

Kane et al. (1992) ont mesuré l'impact du changement climatique sur les prix agricoles et le bien être à l'aide du modèle SWOPSIM<sup>4</sup>. Le scénario climatique qu'ils utilisent suppose un doublement de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Les effets sur les rendements sont estimés à partir d'une revue de la littérature. L'étude montre que les effets sur le bien être des États-Unis sont assez modestes, tandis que le bien être mondial diminue légèrement. Ceci est uniquement dû à la faible part de l'agriculture sur le revenu des pays (3 % pour les pays développés, 19 % pour les pays en développement). Le surplus des producteurs augmente pour toutes les régions à cause de l'augmentation des prix. Ce même effet induit une réduction du surplus du consommateur.

Si les modèles d'équilibre général permettent une évaluation mondiale des conséquences du changement climatique, les hypothèses qui sont faites sur l'évolution des rendements sont souvent grossières. Quand ils utilisent des modèles de cultures pour les évaluer, c'est à des échelles très différentes de celles pour lesquelles ils ont été conçus à l'origine (le pays ou le groupe de pays au lieu de la parcelle). L'idée est donc de coupler les modèles économiques, agronomiques et climatiques de façon plus fine afin de mieux appréhender les disparités régionales, dans la mesure où le développement des modèles climatiques et surtout la désagrégation de leur maille le permet.

#### 7.3.3 Vers une évaluation plus fine des impacts

Kaiser et al. (1993) s'intéressent aux impacts économiques et agronomiques d'un réchauffement climatique progressif au niveau d'une exploitation agricole. Les processus

---

<sup>4</sup>Ce modèle prend en compte 20 biens agricoles, dont 8 cultures, 4 types d'animaux, 4 produits laitiers, 2 farines de protéines et 2 huiles. Il distingue 36 régions dans le monde. Pour chaque région et bien, des fonctions de demande et d'offre prennent en compte les prix régionaux et la substituabilité des biens entre eux. Le modèle est calibré sur l'année 1986.

climatiques, agronomiques et économiques sont modélisés et couplés afin d'évaluer les impacts et les capacités d'adaptation du système agricole. Quatre scénarios de changement climatique sont étudiés. Les résultats des simulations indiquent que les exploitants producteurs de grain dans le Sud du Minnesota peuvent s'adapter à un changement climatique progressif en adoptant des variétés arrivant plus tard à maturation, en changeant leur mélange de céréales et en modifiant le calendrier du travail sur les champs pour tirer parti d'une plus longue saison de croissance due au changement climatique. Les principales limites de cette analyse sont d'abord la non prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, et le fait que le progrès technique est ignoré alors qu'il est susceptible d'atténuer les effets négatifs du changement climatique.

Quatre scénarios climatiques sont étudiés : un scénario (1) de référence, un scénario (2) moyennement chaud (+2,5 °C en 2060) et plus humide (croissance linéaire des précipitations pour atteindre +10% en 2060), un scénario (3) moyennement chaud et plus sec (décroissance linéaire des précipitations pour atteindre -10% en 2060), un scénario (4) deux fois plus chaud (+4,2 °C en 2060) et deux fois plus sec que le scénario 3 (-20% en 2060). La composante agronomique repose sur des modèles "orienté processus". Ils permettent de prédire entre autres la teneur en eau des grains et le temps disponible pour le travail au champs. Le logiciel utilisé est GAPS (General purpose Atmosphere Plant Soil), il permet de modéliser la croissance des cultures dans l'environnement du champ, il concerne cependant seulement les cultures du maïs et du sorgho. Pour le soja, le modèle SOYGROW a fourni les résultats nécessaires. Le sorgho est introduit car il présente une tolérance supérieure à la chaleur et aux sécheresses. Avec le changement climatique, les agriculteurs vont devoir repenser leurs décisions de production. Pour chaque scénario climatique, les décisions futures sont simulées à l'aide d'un programme séquentiel discret et stochastique. Le processus de décision est traité comme un processus à plusieurs étapes. Les décisions prises à un moment dépendent des décisions passées et des résultats d'événements aléatoires passés. Deux étapes sont ici distinguées. La première, avant récolte inclut les opérations de printemps de labour et de semis. La deuxième inclut les opérations d'automne, la récolte et le labour d'automne. Pour chacune des deux étapes, il y a quatre périodes disponibles pour effectuer les opérations de labour, de semis et de récolte, comme le montre le tableau 7.5.

Et	Période	Labour	Semis			Récolte		
			Maïs	Soja	Sorgho	Maïs	Soja	Sorgho
1	7-22 avril	X						
	23 avr-11 mai	X	X	X	X			
	12-31 mai	X	X	X	X			
	1-8 juin	X		X				
2	15-30 sept	X					X	
	1-16 octobre	X				X	X	X
	17-31 octobre	X				X		X
	1-30 novembre	X						

TAB. 7.5 – Périodes pour effectuer les opérations

Le risque est pris en compte dans l'objectif. Il s'agit de maximiser l'espérance du revenu moins un terme de risque ajusté à l'aide d'un coefficient d'aversion au risque. Quatre sources de risque sont prises en compte : le temps de disponibilité du champ, les rendements, les coûts de séchage des grains, et les prix. Au début de l'étape 1, l'agriculteur prend des décisions en ce qui concerne le labour de printemps et le semis face à trois états de la nature en ce qui concerne le temps de disponibilité du champ. Ces états sont équiprobables. Au début de l'étape 2, l'agriculteur prend des décisions en ce qui concerne la récolte et le labour d'automne. Il sait ce qui s'est passé lors de l'étape précédente mais ne connaît que les probabilités des états de la nature qui peuvent se produire lors de cette deuxième étape. Les états de la nature de l'étape 2 sont définis par les heures disponibles au champ, les rendements et les coûts de séchage des grains et les prix des céréales. Il y a dix états de la nature pour l'étape 2 et donc 30 revenus possibles. Le modèle économique se formalise mathématiquement par un problème de contrôle optimal. Il s'agit de maximiser le revenu espéré en prenant en compte un terme de risque sous plusieurs contraintes. Le premier ensemble de contraintes est purement comptable. Le deuxième jeu de contraintes concerne les ressources (temps de travail, terres). Le troisième jeu de contraintes séquence les opérations : le labour doit s'effectuer avant le semis, la récolte s'effectue avant labour, et les surfaces non labourées à l'automne le sont au printemps. Les prix ne sont pas endogènes mais ils sont tout de même affectés par le changement climatique. L'équation de leur évolution est déterminée économétriquement à partir de données passées.

Les auteurs appliquent leur modèle au cas d'une exploitation du Sud du Minnesota. Le sol majoritaire est profond et a de bonnes capacités pour retenir l'eau. L'exploitation est dotée de 600 acres de terres labourables où sont cultivés le maïs, le soja ou le sorgho. La main d'œuvre est constituée de deux travailleurs à plein temps et d'un travailleur à temps partiel. Le scénario 2 n'a pas de conséquences défavorables sur les rendements agricoles du fait de la localisation relativement tempérée. Pour les trois cultures, le modèle prédit l'adoption de variétés à plus haut rendement et à maturation plus tardive dans la mesure où le temps disponible pour le travail au champ augmente avec le changement climatique. Le scénario 3 n'est pas défavorable au soja et au sorgho, tandis que le rendement du maïs décroît avec le temps. Le climat plus sec a deux effets contraires : la saison de croissance est allongée mais la baisse des précipitations crée un stress hydrique. Dans le cas du scénario 4, aucun effet défavorable n'est perçu pour le soja et le sorgho, tandis que le rendement du maïs baisse davantage que lors du scénario précédent. A cette latitude relativement tempérée, le maïs est la culture la plus sensible au climat. Pour les trois scénarios de changement climatique, l'effet sur les prix est identique. Le prix du maïs augmente tandis que le prix du soja reste stable et celui du sorgho baisse. Quand il y a neutralité par rapport au risque, le revenu espéré pour le scénario 1 diminue légèrement de 1980 à 2000 puis augmente du fait de la hausse du prix du maïs (provoquée par une augmentation de la population). Pour les trois scénarios de changement climatique le revenu est plus élevé que dans le cas du scénario 1, la différence augmentant avec le temps. Le mélange optimal de cultures se modifie peu

dans le temps pour les trois scénarios, le maïs représentant 70% de la surface cultivée, le reste étant cultivé en soja. Le sorgho ne devient assez rentable sous aucun des trois scénarios pour remplacer le maïs.

L'approche utilisée par Kaiser et al. (1993) présente l'intérêt de prendre en compte les particularités (orientation technico-économique, environnement pédo-climatique) propres à chaque exploitant. En revanche, elle est difficilement applicable à une large échelle, faute de données disponibles. Easterling et al. (1993) proposent une étude évaluant les conséquences du changement climatique pour les États du Missouri, de l'Iowa, du Nebraska et du Kansas (région MINK aux USA). Ils utilisent le climat des années 30 comme scénario de changement climatique et l'imposent dans un premier temps à l'agriculture de la région pour les conditions économiques et technologiques prévalant en 1984-87, et à nouveau pour un scénario pouvant prévaloir en 2030 (prise en compte du progrès technique). L'utilisation de données climatiques réelles permet d'avoir les données journalières nécessaires aux modèles de croissance, à une échelle spatiale assez fine. A l'aide du modèle EPIC<sup>5</sup>, ajusté pour prendre en compte l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, ils évaluent l'impact de ce climat sur la productivité et l'usage de l'eau de 50 exploitations agricoles représentatives. Une exploitation type décrit une exploitation cohérente fonctionnelle typique de la plupart des exploitations de la région considérée. Chaque exploitation type est définie par une unique combinaison de rotation de cultures, de type de sol et de station météorologique. Quarante-huit exploitations ont ainsi pu être représentées, plus quelques autres ajoutées ensuite pour représenter l'adaptation. Sans adaptation, et sans prendre en compte l'effet CO<sub>2</sub>, l'effet sur les rendements est négatif hormis pour le blé irrigué. Cela s'échelonne d'une baisse de 25% pour le maïs et le soja à une hausse de 9% pour le blé irrigué. Avec l'effet CO<sub>2</sub>, les diminutions de rendements sont réduites pour le maïs non irrigué et le soja. L'adaptation (date de semis, variétés) élimine près de 80% des impacts négatifs du climat pour les conditions technico-économiques de 1984-87. Quand, en plus de l'adaptation et de l'effet CO<sub>2</sub>, on prend en compte le progrès technique<sup>6</sup> en réponse au changement climatique, la production augmente légèrement.

L'approche de Easterling et al. (1993) a l'avantage de mesurer à une plus grande échelle les effets du changement climatique sur différents types d'exploitations. En revanche, utilisant des données climatiques passées, elle ne peut se projeter à la fin du

---

<sup>5</sup>EPIC est un modèle de simulation de l'interaction sol - climat - gestion de l'environnement, composé de sous modèles capables de simuler l'hydrologie, le climat, l'érosion et la sédimentation, le cycle de l'azote, la croissance de la plante, le labour, la température du sol, le management, et une comptabilité simple des charges et des recettes. EPIC fonctionne à un pas de temps journalier. Il convertit les radiations photosynthétiques en biomasse, répartie entre les parties aériennes et non aériennes. L'accumulation journalière de biomasse peut être réduite par des stress environnementaux (température, azote, eau). La phénologie de la plante est une fonction de l'accumulation des "degrés-jour". EPIC est composé de relations empiriques et déterministes. La flexibilité d'EPIC pour modéliser des systèmes agricoles différents ainsi que ses validations empiriques ont conduit les auteurs à retenir ce modèle pour simuler la réponse des cultures au changement climatique.

<sup>6</sup>Amélioration de l'efficacité photosynthétique (+10%), augmentation de l'indice de récolte (+10%), amélioration de la gestion des maladies (+15%), augmentation de l'indice foliaire (maximum obtenu 5% plus tôt), amélioration de l'efficacité de récolte (+10%), meilleure résistance aux sécheresses, irrigation plus efficace; les rendements sont en moyenne 72% plus élevés qu'aujourd'hui.

21ème siècle pour des changements climatiques plus marqués. Adams et al. (1995) étudient l'impact du changement climatique pour l'ensemble de l'agriculture des États-Unis. Leur étude utilise les prévisions des modèles de climat globaux, des données mensuelles à un niveau essentiellement régional permettant par comparaison aux moyennes actuelles de construire des ratios de changement climatique appliqués ensuite aux données actuelles. Trois modèles climatiques sont utilisés (tableau 7.6), simulant tous une concentration de GES égale en équivalent CO<sub>2</sub> à 550 ppm pour 2060, et reflétant l'incertitude sur les conséquences climatiques de l'augmentation des gaz à effet de serre.

Modèle	Résolution	$\Delta T$	$\Delta P$
GISS	$7,83^\circ \times 10^\circ$	4,2°C	11%
GFDL-QFlux	$4,4^\circ \times 7,5^\circ$	4,0°C	8%
UKMO	$5,0^\circ \times 7,5^\circ$	5,2°C	15%

Source : *Easterling et al. (1993)*

TAB. 7.6 – Caractéristiques des modèles climatiques. Variation en température et précipitations.

Les variables climatiques sont utilisées comme entrées dans des modèles biophysiques (CERES et SOYGROW). De même la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> peut avoir un effet, et trois valeurs sont étudiées plus précisément à l'aide de modèles de culture : 0 ppm, 550 ppm et 440 ppm (car le CO<sub>2</sub> n'est pas le seul GES). L'eau est aussi un paramètre essentiel des modèles de cultures. Des prévisions sur la demande en eau sont construites à partir des scénarios climatiques (selon les variations de l'évapotranspiration). Les prévisions sur l'offre en eau sont construites à partir d'un modèle de distribution de la végétation. Les rendements sont modélisés pour 17 sites représentant 17 des 63 régions du modèle et uniquement pour le maïs (irrigué et non), le soja et le blé. Les demandes en eau sont également faites pour ces 17 sites. Pour chaque scénario un pourcentage de variation est calculé. Pour les autres régions, on interpole les données par une moyenne pondérée par la distance géographique qui les sépare des sites voisins. Pour les autres cultures, les résultats sur le maïs, le blé et le soja sont moyennés pour déterminer les rendements des autres cultures.

Les effets sur l'irrigation et sur les rendements sont ensuite introduits dans le modèle économique ASM. Le modèle ASM est un modèle d'équilibre spatial représentant les productions et consommations de 30 biens primaires (cultures et animaux). La transformation des biens agricoles en 12 biens secondaires est également incluse. Le modèle maximise la surface sous la courbe de demande moins celle sous la courbe d'offre, ce qui est une mesure du bien être des agriculteurs et des consommateurs.

Scénario climatique	Variation de bien être			
	consommateurs	producteurs	total	% chgt
GISS	-2,54	12,74	10,21	0,91
GFDL-QFLux	-2,65	7,22	4,57	0,41
UKMO	-59,11	41,52	-17,58	-1,57

TAB. 7.7 – Variation de bien être selon le scénario climatique

Le tableau 7.7 présente les résultats obtenus dans le cas où on prend en compte l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> à hauteur de 550 ppm, en conservant les niveaux d'échanges actuels. L'effet global (quelque soit le niveau de concentration en CO<sub>2</sub> considéré) représente entre -6% et +1% du revenu agricole américain, il n'y a donc pas de réelle menace pour la sécurité alimentaire.

Les effets de la concentration élevée en CO<sub>2</sub> sont un déterminant important des conséquences économiques potentielles du changement climatique sur le bien être. Sans cet effet, le bilan est négatif quelque soit le scénario climatique. La prise en compte des changements dans la production mondiale et les modifications associées des échanges ont en général un effet positif sur l'agriculture américaine.

L'intérêt d'une étude nationale est qu'elle permet de détecter des stratégies d'adaptation telles que des changements de production entre les régions ou des changements des exportations agricoles. Néanmoins, une des limites de cette étude concerne les hypothèses faites pour calculer l'impact du changement climatique sur les rendements. D'une part, les données climatiques ne sont pas adaptées à l'utilisation qui en est faite dans les modèles de culture (échelle, pas de temps), d'autre part seules trois cultures sont modélisées.

Plus récemment, Rosenzweig et al. (2002) se sont intéressés à l'effet de fortes précipitations sur la production de maïs aux USA. Ils se sont pour cela appuyés sur le modèle agronomique CERES-Maïs. La principale conséquence d'un excès de précipitation est un excès d'humidité dans le sol. Peu de modèles de cultures prennent en compte cet aspect. En général, plus d'eau induit plus de rendement. Une fonction de dommage a donc été introduite dans CERES-Maïs. Elle limite la croissance des racines après trois jours consécutifs d'un sol saturé en eau. Les résultats ne sont à prendre qu'à titre d'illustration de l'effet négatif de l'augmentation des précipitations. Le modèle a été calibré sur un site. Les données passées montrent qu'il simule assez bien la plupart des événements pluvieux extrêmes sur les productions. Rosenzweig et al. (2002) montrent que la probabilité de dommages dus à un excès d'eau dans le sol pourrait être 90% plus élevée en 2030 et 150% plus élevée en 2090. En 2030, les pertes de production sur le maïs pourraient être deux fois plus élevées qu'aujourd'hui. Si l'étude reste très limitée (une seule culture), elle s'intéresse aux événements extrêmes et ouvre la voie à d'autres études sur cette question.

## Conclusion

Les évaluations des conséquences du changement climatique pour l'agriculture reposent pour la plupart sur les scénarios d'émissions décrits par l'IPCC (2000). Si ces scénarios permettent de fournir un cadre d'analyse commun à l'ensemble des études, ils ne couvrent pas l'enveloppe des possibles. Les phénomènes extrêmes n'y sont pas non plus décrits. Ces scénarios sont utilisés comme entrées des modèles de cultures. Des techniques ont été développées pour adapter la maille des scénarios climatiques à l'échelle spatiale et temporelle des modèles de culture. Les progrès informatiques per-

mettent également de fournir des données climatiques de plus en plus fines, à la fois d'un point de vue spatial et d'un point de vue temporel. Les modèles agronomiques sont en général validés pour les conditions climatiques actuelles. La calibration de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> a dans un premier temps amené à surestimer ces effets. De nouvelles techniques expérimentales ont depuis corrigé ce problème. Néanmoins, ces modèles ne tiennent pas encore compte d'une éventuelle progression des maladies et des adventices, qui pourraient compromettre fortement les valeurs des rendements simulés.

Que le changement climatique soit d'origine anthropique ou non, le climat change et il sera nécessaire de s'y adapter. L'adaptation est avant tout un comportement assez naturel face à une modification progressive du climat. Les agriculteurs, observant les années passées modifieront leurs choix de cultures, de variétés et de dates de semis, sans information supplémentaire. Cependant, d'autres mesures d'adaptation sont à envisager pour faire face au changement climatique, mesures qui cette fois peuvent nécessiter l'intervention de l'État. Le climat changeant de façon progressive, il faudra que les investissements réalisés soient à même de prendre en compte les évolutions futures. Cela nous amène à encourager les études à la fois sur les risques climatiques mais aussi sur leurs conséquences sur les systèmes économiques.

Les modèles d'équilibre général calculables sont nécessaires pour étudier l'impact global du changement climatique sur les productions et demandes alimentaires mondiales, les prix et le bien être. Ils ne mesurent en revanche pas les impacts locaux, comme des disparités régionales ou les conséquences selon l'orientation technico-économique des exploitants agricoles. Ils se basent de plus sur des estimations de rendements concernant peu de cultures, faisant des hypothèses pour les rendements des cultures non modélisées.

L'objet du chapitre suivant sera de présenter une méthode de prise en compte du changement climatique pour le secteur agricole européen à une échelle plus fine. Le chapitre 9 présentera les résultats obtenus.

## Chapitre 8

# Méthode de prise en compte des impacts du changement climatique et adaptation

### Introduction

Dans la conception originelle du modèle AROPAj (voir 1.3.1), les rendements des différentes cultures de chaque groupe-type sont des données ponctuelles : à chaque culture est associé un rendement et une charge en engrais. Ces données sont en fait des paramètres estimés à partir des observations du RICA. Le remplacement de ces paramètres par des fonctions associant intrants azotés (engrais) et rendement a fait l'objet d'une thèse récente (Godard 2005). Le remplacement d'un "point" par une "courbe" issue d'un modèle biophysique permet de rendre le modèle économique AROPAj plus réaliste et plus réactif, puisque les variations de productions deviennent tributaires à la fois du changement d'assolement, mais également de la productivité des surfaces mises en cultures. Au cours de l'optimisation (soit lors de l'utilisation du modèle), pour chaque groupe-type et chaque culture un rendement et une dose d'azote optimaux sont calculés par rapport aux prix de l'engrais et de la culture. Afin de procéder à cette endogénéisation des rendements, il a été nécessaire d'utiliser un modèle agronomique de croissance des plantes (STICS) et un vaste ensemble de données afin d'alimenter les entrées de ce dernier. Les courbes étant construites, il est ensuite possible de prendre en compte l'effet du changement climatique sur les rendements, ou plus exactement sur la réponse à l'azote des rendements. Nous allons exposer ici la méthode mise en œuvre pour prendre en compte les conséquences du changement climatique dans le modèle économique AROPAj. Deux éléments justifient ce chapitre. En premier lieu, il convient de développer une méthode opérationnelle de génération automatique des fonctions de réponse, couvrant différents territoires et différentes cultures. Puis, il s'agit d'étendre la méthode à un contexte de changement de climat.

Après avoir expliqué comment les deux modèles (STICS et AROPAj) sont utilisés (section 8.1), nous exposerons plus pratiquement les travaux effectués (section 8.2), pour ensuite préciser les scénarios de l'étude ainsi qu'une méthode de prise en compte

de l'adaptation (section 8.3).

## 8.1 Utilisation des modèles agronomique et économique

### 8.1.1 STICS et la prise en compte du changement climatique

Le récent travail de thèse de Godard (2005) utilise le modèle STICS pour mettre en place une méthode de construction des courbes de réponse des rendements à l'azote pour chaque groupe-type et chaque culture du modèle AROPAj. Cette méthode étant validée, il devient légitime de conserver le modèle STICS pour prendre en compte l'impact du changement climatique sur les courbes de réponse des rendements.

Développé depuis 1996 à l'unité de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon, STICS (Brisson et al. 2002, Brisson et al. 2003) est un modèle qui simule le fonctionnement des cultures, à pas de temps journalier. À partir des variables d'entrées relatives au sol, au climat et à l'itinéraire technique, il estime des variables relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle on a défini un milieu physique et un itinéraire technique homogènes. Traditionnellement, cet objet est la parcelle de l'agronome ou de l'agriculteur, cela peut aussi en être un sous-ensemble (cas de l'agriculture de précision), ou bien, dans notre cas, l'ensemble de la sole d'une culture d'une exploitation agricole type régionale. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. Le caractère générique du modèle STICS est important pour nous : nous cherchons à modéliser le rendement, en réponse à l'apport azoté, de plusieurs cultures et dans des conditions pédoclimatiques différentes, mais en ayant une approche méthodologique similaire pour toutes. L'originalité de cet outil réside plus dans son adaptabilité à de nombreuses cultures (blé, maïs, orges, tournesol, pois, colza, betterave, soja, sorgho, lin, prairies, tomate, fraisier, carotte, laitue, ...) et sa robustesse : il est capable de simuler des conditions pédoclimatiques variées sans générer de biais importants.

L'utilisation des modèles agronomiques est valable s'ils simulent correctement les mécanismes suivants (Perarnaud et al. 2005) : écophysiologie des parties aériennes des plantes, fonctions du sol en interaction avec les parties souterraines de la plante, gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture, quand cela concerne la contribution de l'eau, des engrais ou du climat. Le modèle STICS a été développé pour intégrer l'effet des pratiques culturales sur la culture et son milieu, ce qui correspond à l'application de la modélisation de la fertilisation azotée visée par la méthodologie mise en place par Godard. De surcroît, lors de l'utilisation, quelques précautions sont à prendre. Il faut s'assurer que les paramètres d'entrée (sol, climat, ...) sont adaptés aux conditions locales ou régionales (Perarnaud et al. 2005). Cela a été une des préoccupations majeures de la méthodologie mise en place par Godard (2005). Dans notre cas, STICS peut s'adapter et est assez robuste pour fonctionner dans les situations pédoclimatiques diverses correspondant à celles que l'on trouve au sein de l'Union Européenne à quinze (Brisson et al. 2003). Enfin, afin de pouvoir traiter des

questions liées au changement climatique, le modèle de culture se doit de prendre en compte ce phénomène, non seulement via l'augmentation des températures moyennes, mais aussi par l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Si, dans une étude sur l'orge en Europe Centrale, Trnka et al. (2004) montrent que le modèle CERES surestime les rendements en orge de 5% et simule bien les adaptations sur la date de semis et sur la longueur de la période de croissance (expériences en champ comparées aux simulations), rien n'a été publié à ce sujet pour STICS. Néanmoins, il a été conçu pour prendre en compte les pratiques culturales, on peut donc s'attendre à une bonne sensibilité à la date de semis. Concernant la prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, le formalisme utilisé dans le modèle STICS est adapté de Stockle et al. (1992). Il s'appuie sur deux paramètres : la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, fixée dans notre cas à 640 ppm quand on prend en compte le changement climatique et un coefficient mesurant la capacité de la culture à profiter du CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère. Si Stockle et al. (1992) proposent pour ce dernier paramètre des valeurs égales à 1.39 pour le blé et 1.1 pour le maïs, Ruget et al. (1996), à partir d'expérimentations en conditions contrôlées, estiment ce paramètre à 1.09 pour le maïs, tandis que le modèle CERES propose une valeur égale à 1.2 pour le blé. Toutes ces valeurs étant relativement proches, nous avons retenu une valeur de 1.2 pour l'ensemble des cultures. L'effet CO<sub>2</sub> sera donc légèrement surestimé pour le maïs (plante en C4) mais correct pour les autres cultures (en C3).

### 8.1.2 Coupler STICS et AROPAj

Parmi les paramètres estimés à partir des informations du RICA pour l'année 2002, le rendement et les charges totales en engrais sont associés à chaque culture  $j$  de chaque groupe-type  $k$ <sup>1</sup>. Dans sa version initiale, le modèle AROPAj détermine la surface allouée à une culture en tenant compte de ce rendement de référence  $R_j^0$  et de ces coûts en engrais. Par conséquent, il ne peut pas prendre en compte une variation du prix de l'engrais ou de la culture en déterminant le niveau optimal de fertilisation (et le rendement associé) qui maximiserait la marge brute de l'unité de surface pour l'activité végétale considérée. Les effets d'une modification des prix garantis, par exemple, sont donc incomplètement pris en compte dans la version initiale du modèle AROPAj. Il convient donc de relâcher cette hypothèse de rendement fixe. Pour ce faire, il est nécessaire d'estimer des fonctions de réponse des rendements à l'azote  $R_j(N_j)$ , supposées concaves. Ceci peut être fait à l'aide du modèle STICS. Une fois cette fonction estimée, il est possible de calculer la quantité d'azote  $N_j$  et le rendement associé  $R_j$  qui maximise la marge brute à l'hectare  $\pi_j$  pour une culture  $j$ , connaissant le prix de vente  $p_j$  de la culture et le prix de l'azote  $w_j$ . Le programme de maximisation s'écrit ainsi :

$$\max_{N_j} \pi_j = p_j R_j(N_j) - w_j N_j \quad (8.1)$$

$$s.t. \quad N_j \geq 0 \quad (8.2)$$

---

<sup>1</sup>Par la suite, nous omettrons l'indice  $k$  du groupe.

La condition du premier ordre associée à ce programme est donc :

$$\frac{dR_j(N_j)}{dN_j} = \frac{w_j}{p_j} \quad (8.3)$$

Nous faisons l'hypothèse que les données de l'année 2002 correspondent à l'optimum et vérifient donc la condition 8.3. Par ailleurs, nous faisons également une hypothèse sur la forme fonctionnelle de la fonction  $R_j(N_j)$ . Les économistes et les agronomes sont d'accord sur le choix d'une courbe respectant l'hypothèse des rendements marginaux décroissants, c'est-à-dire une forme monotone croissante et concave. Godard (2005) a donc retenu une forme exponentielle :  $R(N) = B + (B - A) \exp -\tau N$ , avec  $A$  le rendement minimum de la culture,  $B$  le rendement maximum de la culture et  $\tau$  le taux d'accroissement.

Une fois ces hypothèses faites, il nous faut spécifier l'ensemble des entrées de STICS. Sans entrer dans les détails qui sont l'objet de la section 8.2, STICS génère un certain nombre de courbes pour chaque culture de chaque groupe-type, correspondant à des combinaisons d'entrées différentes. Une sélection est ensuite faite parmi ces courbes : la "bonne courbe" doit atteindre le rendement de référence  $R_0$  d'une part, et en ce point la tangente doit être égale (ou proche) du rapport des prix (cela correspond à la condition du premier ordre 8.3). La prise en compte du changement climatique est ensuite simple. Parmi les entrées de STICS se trouvent des informations journalières sur le climat. En optant pour un scénario de changement climatique, STICS recalcule une courbe de rendement prenant en compte le climat futur.

Dans la réalité, la courbe issue de STICS ne vérifie pas parfaitement la condition 8.3. Par conséquent, quand on l'introduit dans le modèle AROPAj, un rendement différent de  $R_0$  est calculé. La figure 8.1 montre la répartition des rendements endogènes (ou recalculés) par rapport aux rendements initiaux du modèle. Si la méthode d'endogénéisation était parfaite, nous observerions sur la figure un pic centré en 0 d'une hauteur de 100% : 100% des rendements endogènes auraient un écart nul avec leur rendement exogène (c'est-à-dire observé) correspondant. Comme on le voit, ce n'est pas le cas. Néanmoins, on observe bien un pic centré sur 0%. Pour pallier cette difficulté, il est possible d'ajuster la courbe pour l'année 2002 de sorte à retrouver exactement le rendement exogène (c'est-à-dire observé)  $R_0$ . Cependant, la méthode d'ajustement ne peut s'appliquer en cas de climat futur. Afin de rendre les résultats comparables entre un scénario avec un climat actuel et un scénario de changement climatique, nous n'avons pas ajusté les courbes. L'endogénéisation des rendements conduit donc à un décalage entre l'année 2002 simulé par AROPAj et les données initiales.

Cette méthode est valable pour les cultures partiellement vendues, ou dont on dispose du prix de vente. En effet, quand une culture est totalement auto-consommée sur l'exploitation, ce n'est pas le prix de vente qu'il faut prendre en compte, mais le coût d'opportunité de la culture. L'information est calculée par le modèle AROPAj : il s'agit de la variable duale associée à la contrainte de positivité de la quantité disponible à la vente. Ce coût est strictement supérieur au prix de vente. En ne le prenant pas en compte, on peut s'attendre à une sous-estimation de la marge à l'hectare pour cette

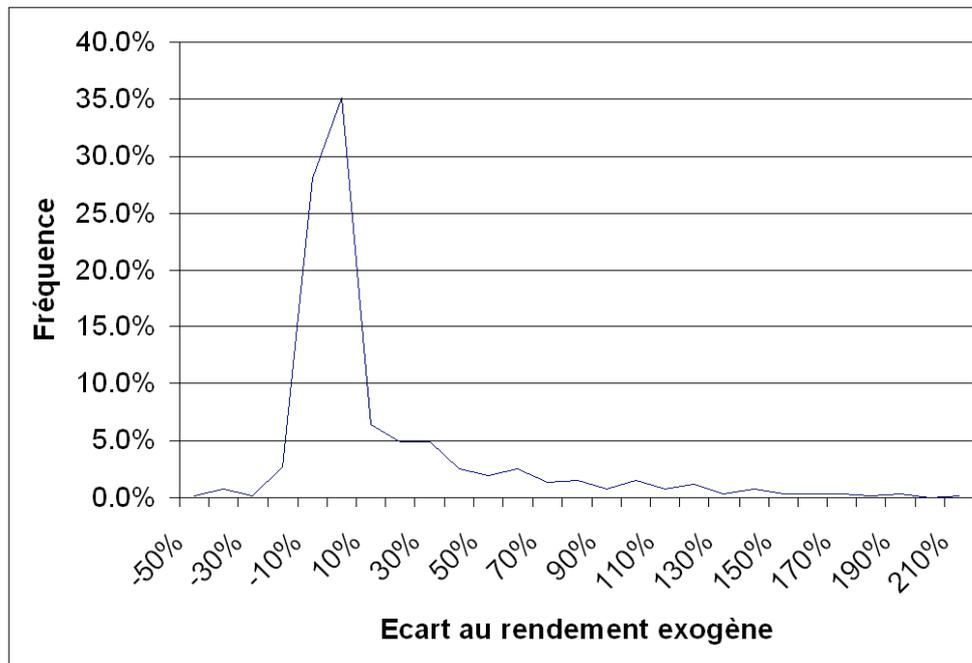


FIG. 8.1 – Répartition des rendements endogènes recalculés par rapport aux rendements exogènes préexistants. France, climat 2002, 584 rendements.

culture. Il serait possible de remédier à ce problème en mettant en place une procédure itérative. Dans une première étape, on extrairait du modèle les valeurs initiales des variables duales, ces prix étant utilisés à la place des prix de vente dans la méthode de sélection de la courbe. On répéterait ensuite l'opération jusqu'à l'obtention d'une solution approchée et stable (s'il y a convergence). Nous n'avons cependant pas utilisé cette solution, assez coûteuse en temps de calcul. Pour les cultures "de vente", nous avons utilisé le prix de marché. Pour les fourrages en revanche nous ne disposons pas du prix de marché, les rendements n'ont donc pas été endogénéisés. En revanche, nous avons cherché à calculer un effet changement climatique, pour chaque groupe-type, qui se résume en un coefficient multiplicatif du rendement initial. La méthode de calcul de ce coefficient changement climatique sera exposé dans la section 8.2.

## 8.2 De la théorie à la pratique

### 8.2.1 Base de données et application

La construction des fonctions de rendement n'est possible, avec STICS et les données disponibles, que si sont remplies un certain nombre de conditions. La courbe issue de STICS doit d'abord rencontrer le rendement initialement présent dans AROPAj. Ensuite, la tangente à la courbe pour ce rendement doit être relativement proche du rapport des prix de la culture et de l'azote. Il est donc nécessaire de balayer l'ensemble des courbes possibles afin de sélectionner la meilleure courbe, c'est-à-dire celle se rapprochant le plus des informations issues du modèle AROPAj (rendement initial

et rapport des prix).

Afin d'utiliser le modèle STICS, il nous faut disposer d'un ensemble d'entrées que nous ne connaissons pas précisément. Il a été décidé de construire trente ou soixante courbes possibles, correspondant à trente ou soixante combinaisons d'entrées du modèle STICS différentes (tableau 8.1) et mettant en jeu le type de sol (parmi 5 types possibles), la date de semis et la variété (parmi 3 couples de valeurs possibles), le précédent (parmi 2) et enfin l'irrigation (1 ou 2 valeurs, selon que l'on détermine ou non l'état irrigué de la culture). Les autres paramètres à renseigner concernent le climat et le type d'engrais, ces choix ont été prédéfinis et sont disponibles dans la base de données.

Entrées du modèle STICS	Modalités	Mode de définition par culture et par groupe-type
Climat	1	Attribué selon la classe d'altitude du groupe-type
Sol	5	5 premières surfaces régionales de sols
Date de semis	3 ou 1	Selon la culture,
Variété	1 ou 3	soit 3 dates de semis et 1 variété, soit 1 date de semis et 3 variétés
Précédent	2	Blé ou pois (légumineuse)
Engrais de synthèse	type fixé doses variables	Fractionnement en fonction de la dose totale apportée selon la culture, dates d'apports fonction des stades
Irrigation	1 ou 2	Sec ou irrigué, détermination selon des priorités et la surface irriguée du groupe-type ; sec et irrigué pour les cultures pivot
Engrais organiques	1	Quantités et types évalués à partir des effectifs des différentes catégories animales du groupe-type
Nombre de courbes générées	30 ou 60	

*Source : Godard (2005)*

TAB. 8.1 – Modalités des entrées de STICS, sources des 30 ou 60 combinaisons.

Le modèle STICS ne fournit pas directement des courbes de rendement mais un rendement pour une dose d'azote. Afin d'obtenir suffisamment de points pour tracer la courbe, on effectue un balayage par pas de 20 sur une plage de 0 à 600 unités de  $N \cdot ha^{-1}$  (les valeurs sont élevées pour déterminer si le modèle simule ou non un plateau). On génère ainsi une famille de trente ou soixante jeux de points. Sur chacun de ces jeux de données, une courbe de réponse de la forme  $r = B - (B - A) \exp -tN$  a été ajustée.

La mise en place d'une base de données a été nécessaire, tout comme celle d'une application permettant de générer les jeux de points et les courbes de façon semi-automatique : c'est le projet ArTix.

Le projet ArTix se compose d'une base de données et d'une application logicielle. Il s'agit pour le projet ArTix de fournir les outils d'automatisation permettant d'organiser et d'enchaîner un très grand nombre de simulations STICS (soit  $(5 \times 2 \times 3 \times 30 \times 2) =$

900 (1800) runs) et cela pour une dizaine de grandes cultures et pour tous les groupes-types de l'Union Européenne (UE15, 1074 groupes-types).

Les données RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) utilisées par AROPAj à partir desquelles sont définies les exploitations-types sont essentiellement de nature comptable. Les informations indispensables à STICS (conditions de sol, climat, itinéraire technique) doivent donc provenir de sources alternatives. Avec ses deux aspects, base de données et application logicielle, ArTix fournit donc un stockage organisé de toute l'information permettant la gestion et la mise en forme de l'ensemble des données, ainsi qu'un ensemble de traitements automatiques indispensables au couplage. De type relationnel, la base de données a été mise en place via le système de gestion de base de données relationnelle PostgreSQL. Elle s'organise autour de deux entités principales issues du modèle AROPAj, l'exploitation type et l'activité végétale, et elle regroupe l'ensemble des données nécessaires à la génération automatique des fichiers d'entrées de STICS pour chaque combinaison de ces deux entités. Elle regroupe donc à la fois des données physiques (variables climatiques, données sur les sols), des données relatives aux itinéraires techniques des cultures (variétés, type d'engrais, fractionnement, irrigation, ...) et des données économiques ou comptables (prix de vente des cultures, rendements de référence, ...). Cette base rassemble des données de sources diverses. Par exemple, elle regroupe celles issues de l'estimation et/ou du calibrage du modèle AROPAj (surfaces des cultures, effectifs animaux, ...). La confidentialité des données individuelles du RICA est respectée dans la mesure où les informations ne sont disponibles qu'à l'échelle du groupe-type, regroupement d'exploitations réelles enquêtées. Elle contient aussi des informations provenant de bases de données fournies par divers partenaires. On peut notamment citer l'unité INFOSOL de l'INRA Orléans pour les données sol, le Joint Research Center (projet MARS) pour les informations climatiques ou encore d'autres organismes comme Eurostat ou la FAO, pour des données sur les prix d'engrais par exemple. Pour le reste, il s'agit essentiellement de dires d'experts ou d'études réalisées à des échelles nationales ou régionales qui peuvent être complétées par des règles de décision mises en place par Godard (2005).

En plus de la sauvegarde et de l'organisation de données brutes, la base fixe les liens géographiques entre toutes ces données pour adapter les fichiers d'entrées STICS à chaque exploitation type et à chaque culture. Cela constitue donc une "spatialisation" de STICS. Par exemple, pour affecter un fichier climat à chaque groupe-type, on dispose :

- des données climatiques brutes pour chaque cellule de la grille MARS,
- de l'appartenance régionale et altitudinale de chaque cellule MARS,
- de l'appartenance régionale et altitudinale de toutes les exploitations,

puis on lie et on moyenne ces éléments pour fixer le climat moyen de chaque groupe-type. De même, les données sol sont liées aux exploitations-types par l'intermédiaire de l'appartenance régionale et altitudinale puis sont triées par surface (seuls les 5 principaux sols sont ensuite utilisés pour les simulations). Pour la définition des itinéraires techniques, la spatialisation est moins évidente à réaliser car ces données sont principalement issues de dires d'experts ou de bases de données nationales et difficiles à obtenir

pour toute l'Europe et donc à répartir pour chaque groupe-type. Néanmoins, certains aspects sont directement issus de règles de décision applicables à toute l'Europe, comme par exemple le fractionnement de l'apport d'azote par culture. Enfin, cette base permet aussi de sauvegarder un grand nombre de sorties STICS (rendements, dates des différents stades d'évolution de la culture, ...) pour chaque simulation réalisée et permet ainsi d'analyser a posteriori la pertinence des conditions d'entrée imposées.

Quant à l'application ArTix, son architecture s'appuie sur un modèle Client/Serveur accédant à une base de données relationnelle. Elle est prévue pour s'intégrer dans un réseau de données ou pour une utilisation en local. Les composantes de l'application font appel au langage de développement Java et au SQL, langage de manipulation de bases de données. Ces choix techniques répondent à un souci de portabilité sur différents environnements informatiques.

La couverture fonctionnelle d'ArTix comprend :

- La connexion/déconnexion aux bases de données (base ArTix et autres sources de données préalablement définies).
- La collecte des informations :
  - Un menu d'importation générique permet de charger directement un ensemble de données à partir d'un fichier formaté suivant la structure de la table concernée. Des menus spécifiques permettent la lecture de données économiques (RICA, AROPAj) présentées sous forme de fichiers au "format texte" et possédant une structure fixe. Certains fichiers associés au modèle STICS (entrée/sortie) peuvent être lus directement pour renseigner les tables correspondantes de la base.
  - L'utilisateur peut se connecter à une base externe afin de choisir une table dont le contenu est à charger dans la table d'ArTix choisie (données météorologiques, sols).
  - Des fenêtres de mise à jour sont disponibles pour des saisies individuelles (données géographiques, engrais, données techniques, ...).
- La génération automatique de fichiers STICS régionaux : sols, climatiques par altitude, techniques, et d'initialisation des simulations au format attendu par le modèle STICS.
- Les enchaînements de simulations STICS :
  - Avec degrés de liberté : permet le choix du pays ou de la région ou de l'exploitation type, des cultures (le choix de la culture suffit à lancer la simulation de toutes ses variétés prédéfinies), du précédent cultural, de l'intervalle et du pas pour les quantités d'azote (sous forme organique et/ou minérale). Automatiquement, les fichiers nécessaires à STICS sont générés dans le répertoire adéquat pour chaque exploitation type, chaque sol, chaque variété et chaque quantité d'azote puis le modèle STICS est exécuté. À la fin de chaque simulation, les fichiers de sortie sont lus et les informations utiles au projet sont enregistrées dans la base. Les fichiers intermédiaires sont ensuite supprimés sauf pour les cas présentant des erreurs de simulation afin d'identifier le problème.

- Sans degré de liberté : du même type que le menu précédent mais permettant de faire les enchaînements de simulations STICS pour les “bonnes entrées”.
- La consultation des données de la base ArTix et l’exportation de données sous forme de fichiers facilement manipulables pour d’autres utilisations (outils statistiques ou autres logiciels). Les fichiers STICS (sol, technique, climat et initialisation de simulation) peuvent aussi être générés.

L’orientation conviviale de l’interface homme/machine que propose ArTix peut parfois restreindre les ambitions d’automatisation des traitements pour toutes les groupes-types européens. Avec la mise en place d’une version utilisable en environnement Unix de l’application permettant de se dispenser de cette interface, de nettes améliorations ont été apportées sur la rapidité et la flexibilité des traitements proposés.

### 8.2.2 Ajustement et sélection des courbes

Dans un premier temps, l’application permet donc de construire les jeux de points. La procédure de régression non linéaire NLIN du logiciel SAS version 8.031 est ensuite utilisée pour estimer les paramètres de chacune de ces courbes. Dès lors, une fois les 30 à 60 courbes construites, il convient d’en sélectionner une.

Pour sélectionner la “meilleure courbe”, nous nous sommes appuyés sur la méthode construite par Godard. La détermination de la courbe qui représente le mieux la réponse du rendement de chaque culture à l’azote, repose sur les informations disponibles et les propriétés économiques attendues. Tout d’abord, les estimations des paramètres du modèle AROPAj fournissent une valeur du rendement de chaque culture pour chaque groupe-type. Avec l’hypothèse de rationalité économique de l’agriculteur, ce rendement qui a été “réalisé” (observé) en 2002 est supposé optimal économiquement et la courbe de réponse à l’azote doit permettre d’atteindre ce rendement (appelé rendement de référence  $R_0$ ). Ceci constitue le premier critère de sélection de la courbe parmi la gamme des possibles. Ensuite, toujours en considérant cette hypothèse de rationalité économique, le deuxième critère de sélection consiste à choisir la courbe dont la tangente en  $R_0$  se rapproche le plus du rapport du prix de l’azote sur celui de la culture. A la fin de cette étape, nous avons à la fois déterminé, “la meilleure courbe” du point de vue des critères économiques, et les entrées du modèle STICS qui ont permis de l’obtenir.

Sans remettre en cause la validité de cette méthode, certains points faibles ont été mis en avant :

- Le modèle STICS est utilisé en dehors de sa zone de calibrage, en particulier pour des doses d’azote très élevées (supérieures à  $400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Pour ces doses, il arrive parfois que le rendement simulé par STICS continue d’augmenter au lieu d’atteindre un plateau. Une des conséquences directes est que la procédure d’ajustement des courbes aboutit presque à une fonction linéaire sur la plage d’azote considérée (valeur très faible du paramètre  $\tau$ ).
- Pendant la phase d’ajustement des courbes, la valeur B ( $B = \lim_{N \rightarrow +\infty} R(N)$ ) n’est pas limitée. On a ainsi constaté que cela pouvait donner lieu à de “mauvais” résultats d’ajustement.

- Lors de l'étape de "sélection" peuvent être choisies des courbes pour lesquelles la dose d'azote correspondant au rendement optimal ( $N_0$ ) est supérieure à  $400 \text{ kgN.ha}^{-1}$  ce qui ne correspond pas à une réalité agronomique.

La graphique 8.2 illustre ces types de problèmes.

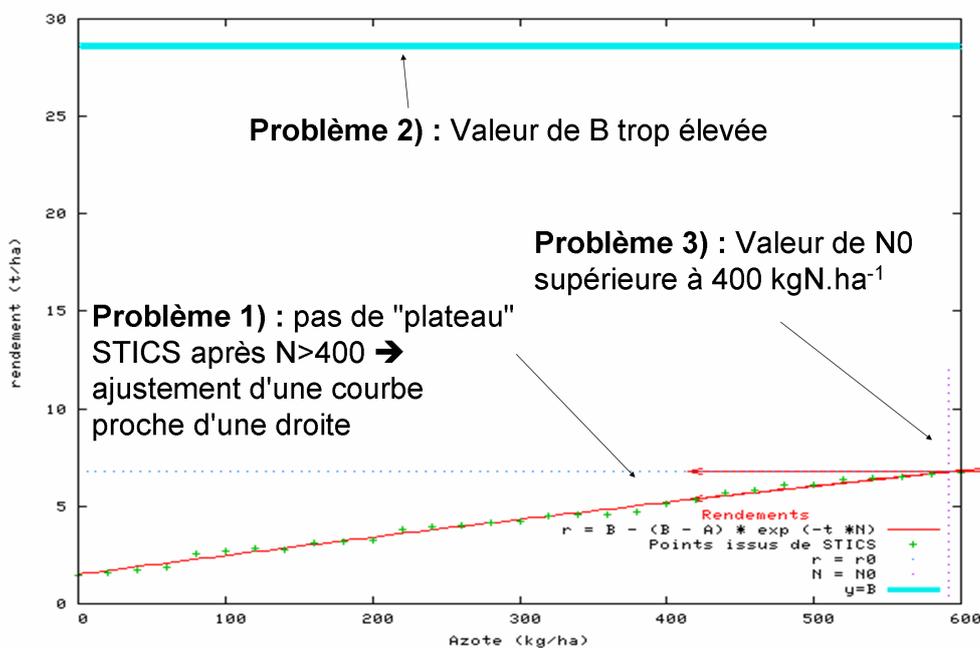


FIG. 8.2 – Problèmes rencontrés lors de l'ajustement des courbes

Plusieurs options pour l'amélioration de l'algorithme de sélection ont donc été envisagées. 1) Lors de l'étape de l'extraction des données de la base Artix nous cherchons à baisser les points au-delà de  $400 \text{ kgN.ha}^{-1}$ . Ainsi les rendements correspondants à des doses d'azote supérieures à  $400 \text{ kg.ha}^{-1}$  sont limités par le rendement au point  $N=400$  ( $R(400)$ ) augmenté d'une certaine valeur dépendante de l'éloignement (la contrainte imposée à l'extraction pour  $N > 400$  sera de la forme :  $R(N) \leq R(400) + 0.001 * R(400)(N - 400)/200$ ). 2) Dans la procédure de régression non-linéaire nous cherchons à ajouter une limite sur la valeur de B au-delà du rendement maximal atteint par la courbe. 3) Nous supprimons de l'étape de sélection toutes les courbes dont la valeur  $N_0$  est supérieure à  $400 \text{ kgN.ha}^{-1}$ . La sélection se fait ainsi en deux étapes : une présélection selon un critère agronomique empirique, puis une sélection selon le critère de distance (entre le rapport des prix et la valeur de la dérivée de la courbe).

Le tableau 8.2 compare les résultats obtenus à partir de deux méthodes de sélection : la méthode initiale et cette même méthode améliorée selon les options 1 et 3 ci-dessus. Il est apparu que l'option 2 n'améliorait pas significativement les résultats. De plus, elle nécessite d'encadrer B pour chaque culture, ce qui peut dépendre de conditions particulières (variétés, localisation géographique). Les résultats concernent les courbes de réponse à l'azote des groupes-types du modèle AROPAj pour la France et pour les cultures : blé tendre, blé dur, colza, orge, tournesol, pomme de terre, maïs. Huit cents cas environ ont été traités (groupes x cultures), 200 environ n'aboutissent à aucun

résultat : la raison principale est qu'il n'y a pas d'intersection entre la droite  $R=R_0$  et les courbes issues de STICS.

	Méthode de base	Méthode de base + améliorations 1 et 3
Pas de courbe sélectionnée	192	203
Nombre de courbes avec B trop grand	15	2
Courbes avec $N_0 > 400$	31	0

TAB. 8.2 – Comparaison des deux méthodes de sélection des courbes

La nouvelle méthode limite aussi la valeur de B (rendement maximal) à des valeurs presque toujours réalistes (2 cas sont légèrement problématiques sur 800). Nous pouvons constater que le nombre de courbes pour lesquelles les résultats étaient problématiques avec la méthode initiale et qui ont été améliorés n'est pas très grand (environ 30-40 courbes sur les 800 cas traités). L'intérêt de la nouvelle méthode réside dans l'usage qui est fait des courbes dans le modèle économique AROPAj. La limitation sur la quantité d'azote garantit des niveaux de charges en engrais acceptables pour des rendements agronomiques atteignables.

L'utilisation de cette méthode permet de calculer 584 courbes de rendements pour les 197 groupes-types français du modèle AROPAj. Les cultures concernées sont le blé tendre, le blé dur, l'orge, le maïs, le colza, le tournesol et la pomme de terre. Une fois ces courbes sélectionnées<sup>2</sup>, et donc les entrées de STICS associées, il est possible de simuler, toujours à l'aide de STICS et de l'application ArTix, les mêmes courbes mais avec d'autres données climatiques. C'est ce qui a été fait en utilisant une année particulière<sup>3</sup> parmi les années du scénario B2 fourni par le modèle ARPEGE-Climat de MétéoFrance. La figure 8.3 montre l'impact global obtenu sur l'ensemble des rendements français, en distinguant également le nord<sup>4</sup> et le sud<sup>5</sup> de la France.

### 8.2.3 Cas des fourrages

En ce qui concerne les fourrages, nous ne disposons pas d'information sur le prix de vente. Un prix fictif aurait pu être calculé par le modèle AROPAj. La valeur de la duale associée à l'activité prairie donne une bonne évaluation du coût d'opportunité de la prairie. Pour des raisons purement pratiques, nous avons procédé autrement. Par ailleurs, si les rendements des cultures de vente sont présents dans le RICA<sup>6</sup>, ce n'est pas le cas des rendements des fourrages. Dans le modèle, les rendements des fourrages sont donc estimés à partir de dires d'expert puis recalibrés, leur valeur ne correspond

<sup>2</sup>La procédure de construction et de sélection des courbes est très longue, elle a nécessité environ 2 mois de calcul sur le serveur UNIX à notre disposition.

<sup>3</sup>Cette phase, maintenant automatisée demande un temps de calcul important, c'est-à-dire environ 1 à 2 semaines. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes limités à deux années de changement climatique sur les 30 à notre disposition.

<sup>4</sup>Alsace, Bourgogne, Bretagne, Champagne-Ardenne, Centre, Franche-Comté, Ile de France, Basse-Normandie, Haute-Normandie, Lorraine, Nord-Pas-de-Calais, Pays-de-la-Loire, Picardie.

<sup>5</sup>Aquitaine, Auvergne, Corse, Languedoc-Roussillon, Limousin, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Rhône-Alpes.

<sup>6</sup>Plus exactement, le RICA fournit la production et les surfaces, dont on déduit le rendement.

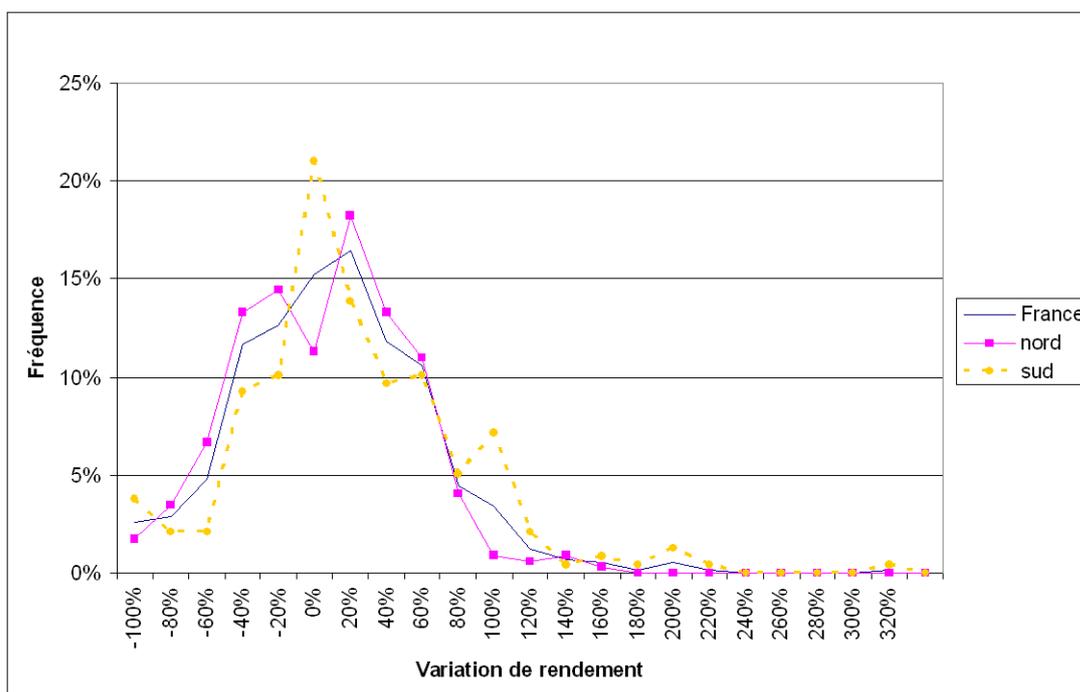


FIG. 8.3 – Déformation des rendements sous l’effet du changement climatique (année 2087, 584 rendements modifiés).

donc pas à une observation. Nous avons donc préféré évaluer pour chaque groupe-type un impact moyen du changement climatique sur les deux principales activités fourragères du modèle : les prairies d’une part et le maïs fourrager d’autre part. À l’aide du modèle STICS, nous avons évalué le rendement potentiel de ces deux activités en climat actuel et en climat futur, pour 15 combinaisons possibles d’entrées (3 variétés  $\times$  5 sols, le précédent étant systématiquement le blé, et l’irrigation n’étant jamais envisagée). Nous nous sommes concentrés sur la notion de rendement potentiel, c’est-à-dire en conditions d’azote non limitantes ( $N=400$  unités d’azote par hectare), et non sur un rendement à 200 unités d’ $N\cdot ha^{-1}$ . En procédant de la sorte, on ne mesure que l’effet “changement climatique”, la croissance végétale n’étant pas soumise à un stress azoté. La comparaison de ces deux séries de 15 rendements potentiels nous a permis de calculer un coefficient d’impact du changement climatique pour chaque groupe-type et chacune des deux activités fourragères. Ce coefficient est ensuite introduit dans AROPAj afin de modifier le rendement de ces activités.

Pour l’année climatique moyenne représentative du scénario B2 que nous avons considéré (année 2087, avec effet fertilisant du  $CO_2$ ), l’impact moyen (calculé sur l’ensemble des rendements) du changement climatique sur le maïs fourrager serait de +27% tandis qu’il serait de +9% pour les prairies. Il s’échelonne entre -28% et +74% pour les prairies et -45% et +83% pour le maïs fourrager. La médiane est à +37% pour le maïs fourrager, et à +5% pour les prairies.

### 8.2.4 Scénarios de changement climatique

Le modèle ARPEGE-Climat de Météo France nous a fourni 30 années climatiques associées au scénario B2. Par hypothèse, elles sont équiprobables et numérotées de 2070 à 2099. Si, pour l'étude d'une région, il a été possible de prendre en compte l'ensemble des années climatiques (Godard 2005), le temps de calcul nécessaire aux simulations nous a contraints, dans un premier temps, à ne retenir qu'une seule année parmi les 30 pour étendre l'étude à la France entière. L'année sélectionnée devait répondre à deux conditions : nous la voulions représentative du scénario B2, c'est-à-dire proche de la moyenne des années, mais il était important que cela reste une année réellement simulée par le modèle climatique. Nous avons tout d'abord calculé une année fictive moyenne, c'est-à-dire que l'ensemble des données des 30 années ont été moyennées pour obtenir une seule année fictive. Cette année climatique fictive était bien entendu inutilisable puisque, entre autres, elle ne comportait pas d'extrêmes (il n'y avait par exemple aucun jour sans pluie). Nous avons donc calculé la distance entre cette année fictive et les autres années selon deux critères, un critère de température et un critère de précipitations. Nous avons d'abord calculé pour chaque année les températures moyennes mensuelles ainsi que les précipitations mensuelles, et mesuré la distance de chaque année par rapport à l'année fictive avec une somme des écarts au carré :

$$D(T, A) = \sum (T_{mens} - \hat{T}_{mens})^2 \quad (8.4)$$

$$D(P, A) = \sum (P_{mens} - \hat{P}_{mens})^2 \quad (8.5)$$

avec  $D(P,A)$  et  $D(T,A)$ , les distances en précipitations (P) et températures (T) respectivement entre l'année A et l'année fictive (marquée par un  $\hat{\cdot}$ ). Ceci nous a conduit à choisir l'année "2087", comme étant la plus proche de l'année fictive moyenne selon les 2 critères de distance.

Par ailleurs, la variabilité inter-annuelle du climat est une donnée essentielle. Une diminution des précipitations de 10% en moyenne sur 10 ans n'a pas le même impact si elle a lieu chaque année -10% (impact moyen) ou si, tout les cinq ans, on observe -50% (impact désastreux). Nous avons donc choisi de sélectionner également une année plus sèche et plus chaude, en particulier au printemps. Cela nous a conduit à retenir l'année "2099".

Année	France		Nord		Sud	
	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)	P (mm)
2002	12.83	811	11.96	826	14.34	784
2087	13.87	725	13.07	728	15.27	718
2099	14.45	637	13.96	650	15.38	614

TAB. 8.3 – Précipitations et températures moyennes des années climatiques utilisées

Le tableau 8.3 présente les températures moyennes annuelles ainsi que les précipitations en France pour l'année de référence et les années sélectionnées pour l'étude du climat futur. Les figures 8.4, 8.5 et 8.6 (pages 166-168) présentent ces mêmes informa-

### 8.3. Scénarios

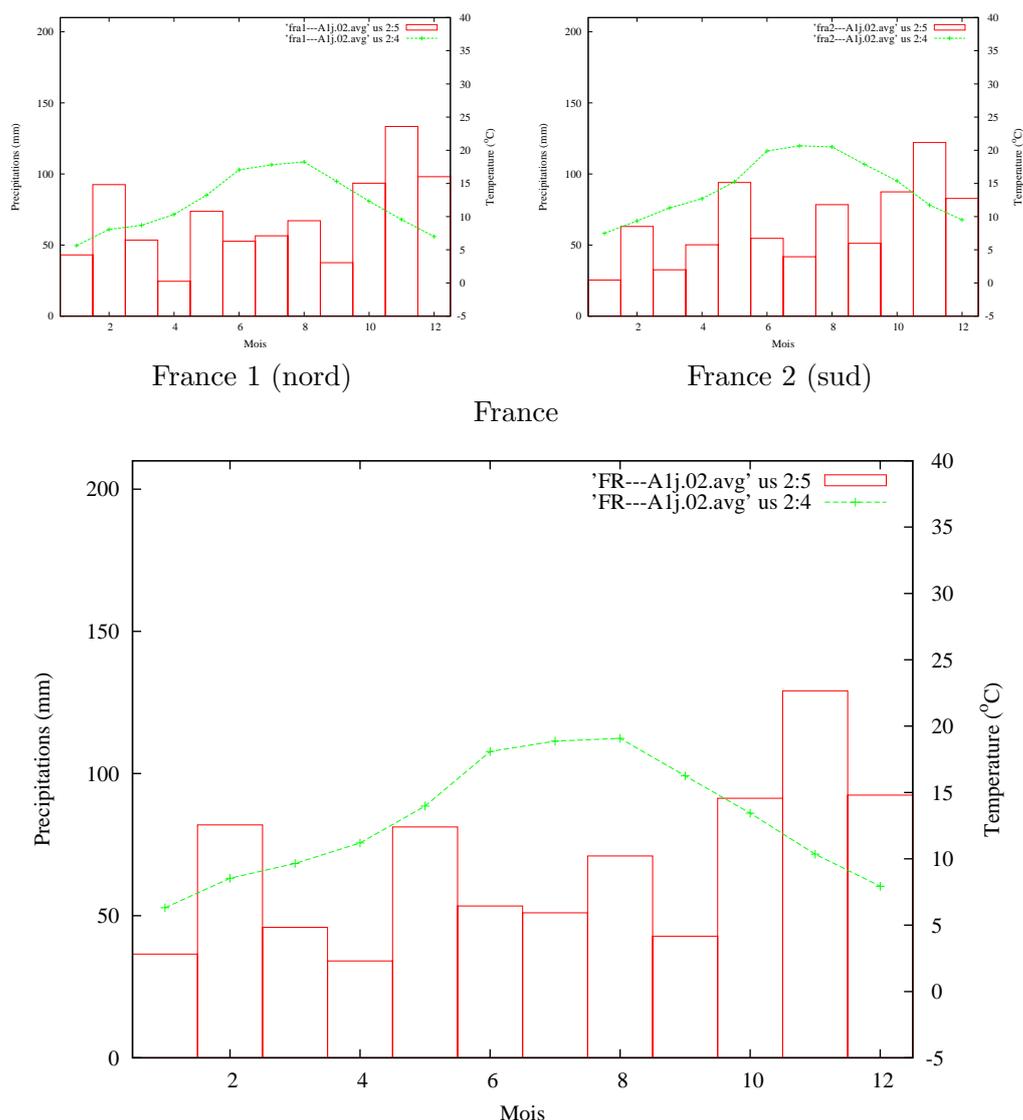


FIG. 8.4 – Caractéristiques de l’année climatique 2002 (précipitations en mm, températures en °C)

tions sur une base mensuelle. A chaque fois sont également distinguées les parties nord et sud de la France.

### 8.3 Scénarios

L’utilisation du modèle AROPAj suppose au préalable de définir des scénarios. Concernant le climat, nous avons choisi de distinguer deux années climatiques : une année qualifiée de moyenne, et une année sèche. Il est également possible de prendre en compte ou non l’effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. La question en suspens est celle de la prise en compte ou non de l’adaptation des exploitants agricoles face au changement climatique. Une partie de l’adaptation se fera de façon autonome, les individus répondant aux changements de leur environnement physique, économique... Une autre partie nécessite

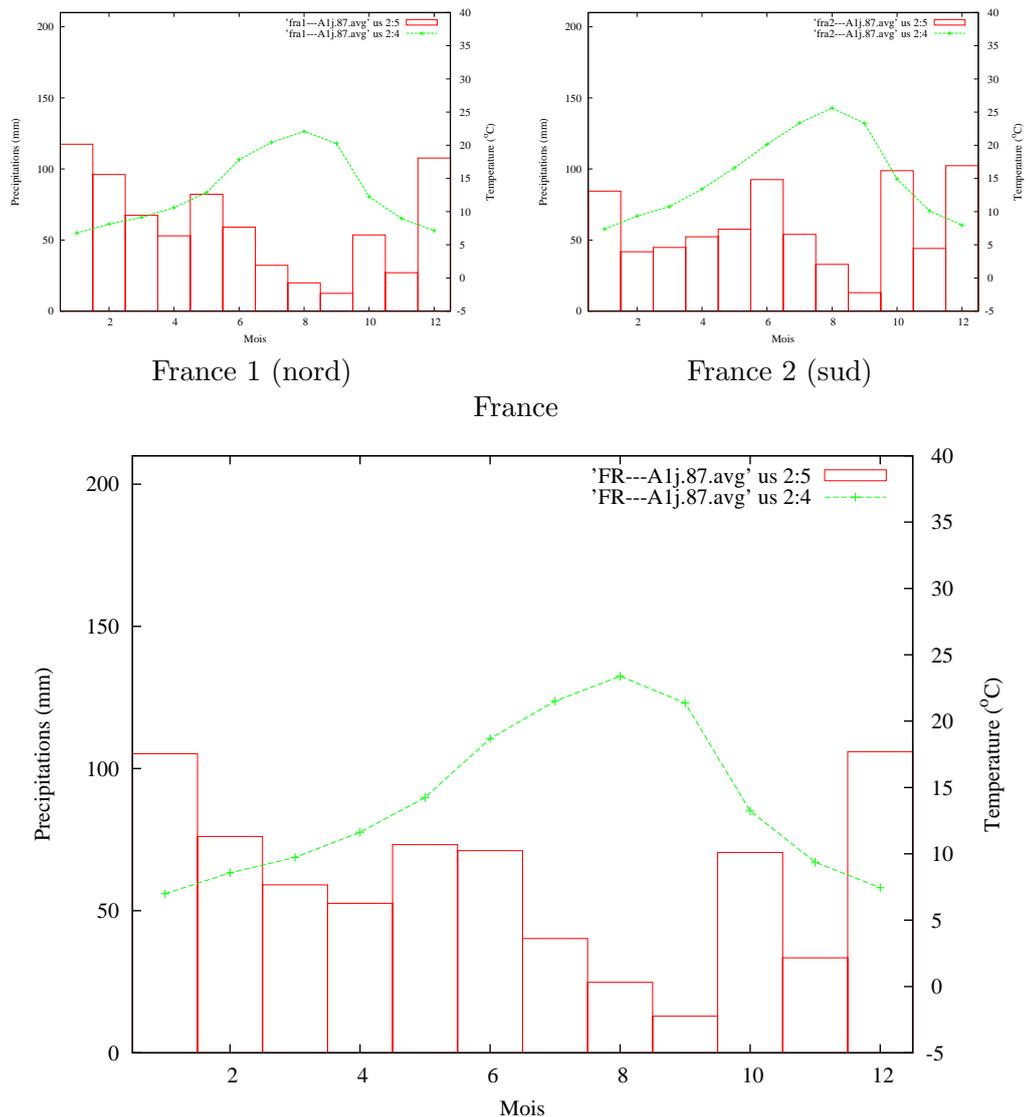


FIG. 8.5 – Caractéristiques de l’année climatique 2087 (précipitations en mm, températures en °C)

une planification (décisions d’infrastructure) (voir tableau 8.4).

Nous allons au cours de cette section préciser et justifier les scénarios que nous allons étudier, ainsi que ce qui pourrait être étudié dans l’avenir à la suite de cette étude.

### 8.3.1 *Ceteris Paribus*

Concernant l’adaptation, le scénario le plus simple à envisager est de ne pas la prendre en compte. Les rendements sont néanmoins endogènes donc la quantité d’engrais est la seule variable d’ajustement (par rapport au nouveau climat) des agriculteurs pour chaque culture, ainsi que leur choix d’allocation des terres.

Une hypothèse sous-jacente du modèle AROPAj est l’anticipation supposée parfaite des signaux économiques. Lorsque l’objectif est de simuler les effets de changements de politiques agricoles, cela suppose que les agriculteurs les anticipent parfaitement.

### 8.3. Scénarios

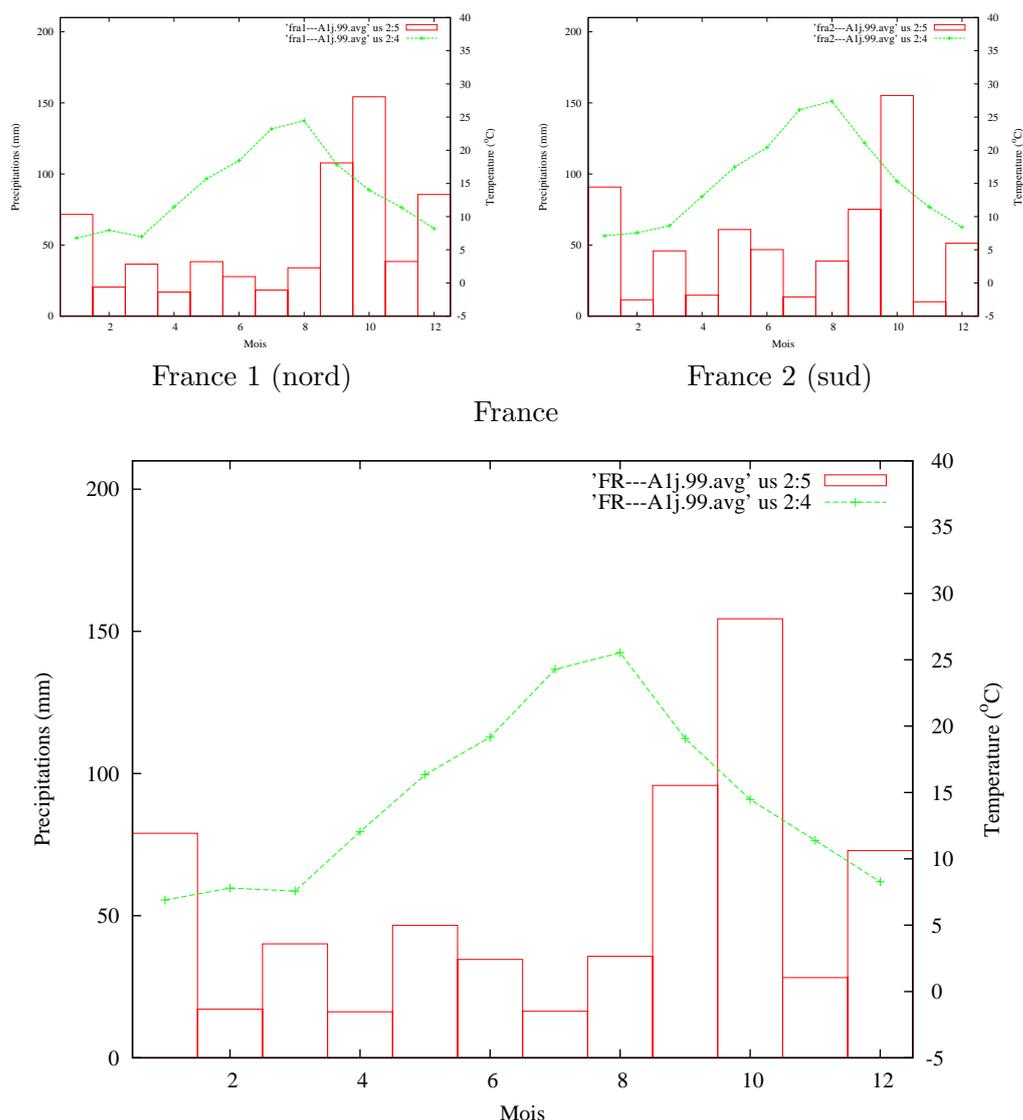


FIG. 8.6 – Caractéristiques de l’année climatique 2099 (précipitations en mm, températures en °C)

Dans le modèle AROPAj, les agriculteurs choisissent la répartition de leurs surfaces en supposant “connus” les rendements finaux des cultures. Leurs choix ne sont donc soumis qu’à des contraintes agronomiques (rotations) et politiques (primes). L’hypothèse d’information parfaite des agriculteurs est forte mais acceptable dans le cas d’une année normale sur le plan climatique (année sans épisode extrême imprévisible). Si l’on s’intéresse en revanche aux conséquences du changement climatique sur l’activité agricole, l’hypothèse d’information parfaite ne permet pas de mesurer une conséquence particulière du changement climatique, celle qui découle des effets de surprise. Ce n’est pas un problème propre à la question du changement climatique, mais plutôt lié à la variabilité climatique. Concernant la tendance globale au réchauffement, on peut supposer que le changement sera suffisamment progressif pour que les exploitants en prennent conscience “en temps réel”. L’hypothèse d’agents clairvoyants est donc encore valable.

Réponse au CC	Autonome	Politique
Court terme	ajustements de court terme (date de semis) répartir les pertes (assurance)	développer une meilleure connaissance des risques climatiques, améliorer les réponses à l'urgence (systèmes d'alertes canicules)
Long terme	investir dans la résilience climatique (irrigation)	investir pour créer des infrastructures importantes (réservoir d'eau...), éviter les impacts (plan d'occupation des sols restreignant l'accès aux plaines inondables)

Source : Stern (2006)

TAB. 8.4 – Exemples d'adaptation en pratique

Un scénario “ceteris paribus” est bien entendu complètement irréal. Cependant, d'ici à la fin du siècle, il est difficile de projeter des tendances concernant l'évolution de l'agriculture européenne. D'autre part, en prenant en compte l'effet du changement climatique, toutes choses égales par ailleurs, il est plus facile d'en interpréter les effets. Stern (2006) note ainsi :

“Other impact studies superimpose climate change in a future world where population and GDP remain constant at today's levels. These studies are perhaps less realistic, but still provide a useful indication of the scale of the impacts and may be easier to interpret.” (partie 2, page 61)

Les simulations présentées sont effectuées “toutes choses égales par ailleurs”. Les agriculteurs n'ont pas de possibilités d'adaptation hormis l'allocation des terres au sein des surfaces dont ils disposent.

### 8.3.2 La question de l'irrigation

Dans le processus d'endogénéisation des rendements, l'irrigation des cultures est calculée à partir d'une information présente dans le RICA : la surface irriguée totale de l'exploitation. Dans le modèle, pour chaque groupe-type, nous disposons donc de cette information. Un ordre de priorité a été établi par Godard (2005) afin d'attribuer les surfaces irriguées aux différentes cultures d'une exploitation. Le maïs sera ainsi préférentiellement irrigué par rapport au blé. Pour chaque culture de chaque groupe-type, trois cas sont susceptibles de se présenter : soit la culture n'est pas irriguée, soit la culture est irriguée, soit c'est indéterminé. Dans ce dernier cas, on teste les deux possibilités avec le modèle STICS et l'étape de sélection de la courbe détermine si la culture est irriguée, ou non irriguée.

Afin de simuler l'effet de l'irrigation, STICS est utilisé de sorte qu'aucun stress hydrique n'est subi par la culture. Les besoins en eau de la culture sont donc totalement satisfaits, dès qu'un stress apparaît, l'irrigation se déclenche. Cela conduit néanmoins à des consommations d'eau très importantes et irréelles. Il est important de garder ce point à l'esprit car, dans un scénario “ceteris paribus”, l'irrigation est maintenue en

Cultures	TFROID	AMPFROID	TSEUIL
blé tendre	6,5	10	11,5
blé dur	6,5	10	11,5
orges	6,5	10	11,5
colza	6,5	20	16,5
betterave fourragère	6,5	10	11,5

TAB. 8.5 – Paramètres du modèle STICS pour l’adaptation des itinéraires techniques.

condition de climat futur. Or, rien ne dit que l’eau sera disponible pour l’irrigation. Les rendements correspondants sont donc en partie surévalués.

Il serait possible en théorie de modifier la façon donc STICS conduit l’irrigation. Un paramètre du modèle (RATIOL) correspond en effet au taux de satisfaction des besoins en eau, mais il est encore difficile à maîtriser sans un investissement important sur le choix des valeurs des paramètres et le fonctionnement du modèle.

### 8.3.3 Adapter les itinéraires techniques

Il a été envisagé de modifier la date de semis. Pour cela, une règle de décision a été établie, déterminant la date de semis en fonction des données climatiques. Harrison et al. (2000) emploient une méthode intéressante pour déterminer la date de semis du blé tendre. Ils l’utilisent pour renseigner les entrées d’un modèle de culture (AFRCW-HEAT2) à l’échelle européenne. La règle est la suivante : le semis a lieu le premier jour à partir du premier septembre où la température moyenne est inférieure à une température seuil (11,5 °C pour le blé tendre). Cette méthode se fonde sur la valeur vernalisante d’un jour, qui doit être supérieure à 3/4 pour que le semis ait lieu.

La valeur vernalisante (JVI) d’un jour est donnée dans le modèle STICS par la relation :

$$JVI = 1 - \left[ \frac{TFROID - TCULT}{AMPFROID} \right]^2 \text{ bornée à } 0$$

avec  $TFROID$  température optimale de vernalisation et  $AMPFROID$  demi-amplitude thermique de l’effet vernalisant, paramètres propres à chaque culture (tableau 8.5).

De cette relation, et du critère de détermination de la date de semis on en déduit la température seuil pour le blé tendre :

$$TSEUIL = TFROID + 0,5 * AMPFROID$$

Cette méthode permet de calculer les dates de semis des cultures d’hiver. D’après le tableau 8.5, on obtient les mêmes dates de semis pour le blé dur, le blé tendre et l’orge, ce qui est inexact dans la réalité. La base de données du projet MARS fournit en effet des dates de semis en Europe pour un certain nombre de cultures. Ces dates sont recalculées à partir de données observées à l’échelle régionale (NUTS1) et de dires d’expert à l’aide d’une méthodologie employant des techniques de systèmes d’information géographiques afin d’obtenir une date par maille de 50\*50km. Ces données sont spatialisées sur la même

grille que les données climatiques et peuvent donc servir de point de comparaison. Nous présentons ici les résultats pour le blé tendre (figures 8.7, 8.8 et 8.9).

Les dates de semis du projet MARS sont des moyennes sur plusieurs sites et concernent parfois des années différentes. Nous avons utilisé les années climatiques 1995, 1996 et 1997 pour calculer selon le critère présenté ci-dessus d'autres dates de semis. La comparaison des deux séries de dates de semis montre que, dans 50% des cas, l'écart est supérieur à 10 jours, et on trouve autant d'écarts positifs que négatifs. Les figures 8.7, 8.8, 8.9 (page 171) montrent l'écart entre les données MARS et la méthode utilisée pour les trois années climatique 1995, 1996 et 1997 (les données MARS sont communes aux trois années, les dates calculées proviennent de 3 années climatiques distinctes). La méthode fonctionne bien pour les classes d'altitude 1 et 2 (0-300m et 300-600m respectivement). Il serait possible de l'affiner en calculant la moyenne tamponnée des températures sur 2 ou 3 jours au lieu d'un seul.

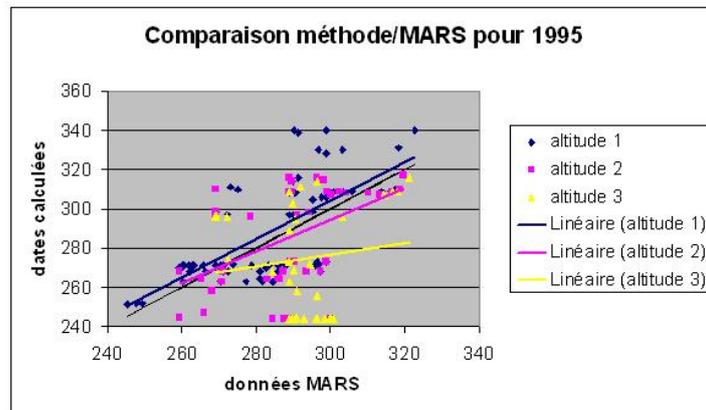


FIG. 8.7 – Blé tendre - 1995

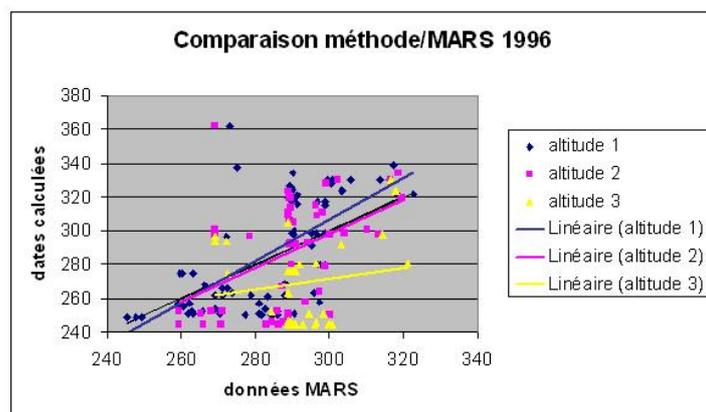


FIG. 8.8 – Blé tendre - 1996

Même si le phénomène de vernalisation n'existe pas pour les cultures de printemps, une règle de décision du même type (fondée sur le dépassement d'un seuil de température) peut être calibrée. L'adaptation des dates de semis serait donc facilement mise en œuvre dans le modèle AROPAj.

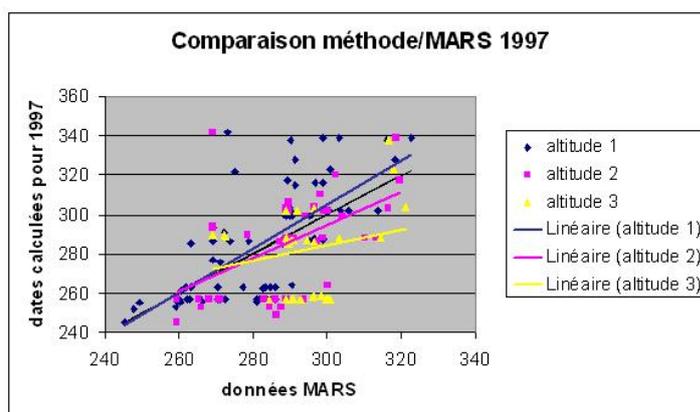


FIG. 8.9 – Blé tendre - 1997

En ce qui concerne les nouvelles cultures, après avoir pris conseil auprès des agronomes, il serait intéressant d'étendre les zones de culture du soja et du maïs au Nord de l'Europe, ainsi que d'introduire le sorgho. L'introduction du soja au nord est justifiée par le réchauffement global induit par le changement climatique. Elle aura d'autre part des conséquences sur le plan économique (modification de l'offre mondiale). Le maïs est une culture comprenant de nombreuses variétés et qui est capable de s'adapter au climat. La précocité de la floraison est le premier facteur d'adaptation climatique. Sur une zone donnée, la floraison du maïs peut se décaler d'environ 100 degrés-jour (soit environ 1 semaine) en 3-4 ans. Ainsi, si on considère un réchauffement de l'ordre de  $0.5^{\circ}\text{C}$  par décennie, sur la période de croissance du maïs (160 jours), on aurait un décalage de 80 degrés-jour sur 10 ans. Le maïs est donc à même de s'adapter au réchauffement. Le sorgho, contrairement au maïs est une culture peu exigeante en eau. Si l'irrigation du maïs n'est pas possible, cette culture pourrait remplacer le maïs pour l'alimentation du bétail (INRA 2006).

Enfin, il serait également possible de "relocaliser" les variétés vers le nord, travail qui n'a pas été mené jusqu'ici.

## Conclusion

Si la méthode de prise en compte du changement climatique semble simple en théorie, elle est très coûteuse en temps de calcul. Elle n'a pu être ainsi appliquée qu'à la France et les résultats seront présentés dans le chapitre suivant. En contrepartie, elle a l'avantage de reposer sur des bases agronomiques solides et d'être générique : elle peut facilement s'étendre à l'Union Européenne (pour les États Membre couverts par le modèle AROPAj), sous réserve des capacités de STICS à simuler les différentes cultures aux confins de l'Europe (en particulier au nord). D'autre part, l'automatisation de la méthodologie mise en place par (Godard 2005) ouvre la voie à de nombreuses autres applications dont les développements sont en cours : il s'agit d'une part de mesurer les conséquences économiques d'un tassement des sols (Baranger et al. 2007), et d'autre part de s'intéresser aux fonctions de réponse non en terme de rendement mais en terme

d'émission de  $N_2O$  (Durandau et al. 2007).

Ce chapitre est fortement marqué par son ancrage au sein de plusieurs disciplines : en particulier l'économie, et l'agronomie, avec un souci commun, celui de la généralité. Une des contraintes fortes pour la mise en place de méthodes est leur possible extension à large échelle et à moindre coût. Le modèle STICS a été choisi du fait de sa généralité : il est en effet capable de calculer la croissance de l'ensemble des grandes cultures modélisées dans AROPAj à partir des mêmes formalismes et pour l'ensemble de l'Union Européenne. Les méthodes que nous avons mises en place pour introduire les courbes de rendements dans le modèle AROPAj ainsi que pour prendre en compte l'effet du changement climatique s'appliquent également à l'échelle européenne.

Par ailleurs, le travail multidisciplinaire nécessite de tenir compte des exigences de chaque discipline. Des hypothèses trop grossières remettent en cause l'ensemble des résultats, des hypothèses trop fines sont inapplicables à l'échelle que nous considérons (en dehors du temps de calcul nécessaire, l'impossibilité d'obtenir des données est la première limite). Ainsi, le couplage d'AROPAJ et de STICS permet d'une part de couvrir l'échelle européenne du modèle AROPAj ainsi que l'ensemble des grandes cultures et une partie des fourrages. D'autre part, un certain niveau de précision est atteint concernant les entrées de STICS, à savoir la nature des sols, les données climatiques ainsi que les variétés et les dates de semis.

Les hypothèses de l'étude étant précisés, le chapitre suivant sera plus particulièrement consacré aux résultats. Les deux années de changement climatique que nous avons utilisées (numérotées 2087 et 2099) seront considérées comme deux scénarios de changement climatique distincts. Pour chacun de ces scénarios, les exploitants agricoles modélisés sont des agents rationnels qui anticipent parfaitement le climat à venir.



## Chapitre 9

# Impacts du changement climatique - Résultats

### Introduction

Plusieurs scénarios ont été testés à l'aide du modèle AROPAj. Ils se distinguent par les différentes hypothèses qu'ils combinent. Il s'agit d'une part d'hypothèses sur la politique agricole, où 3 options sont examinées : la politique de l'Agenda 2000, une stylisation de la réforme de Luxembourg, et un découplage total des aides sans obligation de jachère. Il s'agit d'autre part d'hypothèses sur le climat à venir. Deux cas ont été traités : une année "moyenne" représentant le scénario B2 (2087<sup>1</sup>) et une année sèche et chaude (2099). Enfin, nous avons choisi de considérer ou non l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Les scénarios sont résumés dans le tableau 9.1.

Les agents modélisés dans AROPAj sont rationnels et anticipent les rendements à venir. Les deux années climatiques utilisées sont donc à considérer comme des scénarios de changement climatique établi et non comme des années avec un climat particulier et d'éventuels phénomènes de surprise.

Type	PAC	Climat	effet CO <sub>2</sub>
Référence	Agenda 2000	2002	non
Réforme de la PAC	Luxembourg	2002	non
	Découplage total	2002	non
Changement climatique	Agenda 2000	2087	oui
	Agenda 2000	2087	non
	Agenda 2000	2099	oui
	Agenda 2000	2099	non

TAB. 9.1 – Scénarios étudiés

Les sections 9.1 et 9.2 seront consacrées à l'examen des impacts du changement climatique sur les activités agricoles (marge, allocation des terres, production vendues) ainsi que sur les prix fictifs (coûts d'opportunité) des terres à partir des scénarios de changement climatique (tableau 9.1). Dans la section 9.3, nous tenterons de hiérarchiser

<sup>1</sup>La numérotation des années correspond à la numérotation du modèle ARPEGE-Climat des années climatiques futures possibles.

les impacts du changement climatique d'une part et d'une réforme de la PAC d'autre part. Pour cela, nous comparerons les impacts des scénarios de changement climatique et de réforme de la PAC sur le scénario de référence.

## 9.1 Impacts sur les activités

### 9.1.1 Rendements agricoles

L'impact du changement climatique est introduit dans le modèle AROPAj à travers une modification des rendements des principales cultures. Il est donc essentiel de s'intéresser d'abord à l'impact des climats utilisés sur les rendements par rapport aux rendements de référence, ceux de l'année 2002. La figure 9.1 présente les rendements du blé tendre et du maïs, pour les différents scénarios de changement climatique, par rapport aux rendements de 2002.

Les résultats obtenus pour le blé tendre montrent une certaine hiérarchie des années climatiques considérées. Ainsi, l'année 2087 est plus favorable au blé tendre que l'année 2099. Par rapport à 2002, les rendements en blé sont globalement plus élevés en 2087 et moins élevés en 2099. La prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> augmente les rendements.

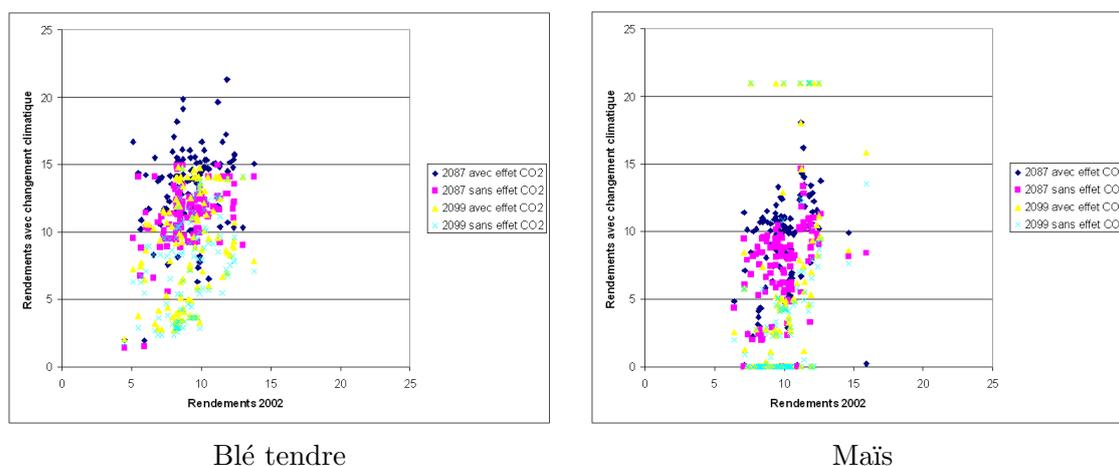


FIG. 9.1 – Rendements agricoles du blé tendre et du maïs avant et après changement climatique

Contrairement au blé, la culture de maïs est parfois irriguée. Dans ce cas, l'eau n'étant plus un facteur limitant, on remarque que le maïs bénéficie d'un climat plus chaud, comme on l'observe avec l'année 2099 où certains des rendements en maïs sont très élevés. S'il n'y a pas d'irrigation en revanche, le climat plus sec est très défavorable à cette culture, et elle n'arrive pas à maturité (aboutissant à des rendements nuls). L'année climatique 2087 est ainsi relativement neutre sur les rendements en maïs, tandis que l'année 2099 donne des résultats très contrastés : des rendements très élevés ou nuls, selon qu'il y a –ou non– irrigation.

### 9.1.2 Marges brutes

Une des conséquences directes d'une modification des rendements agricoles se traduit sur les marges brutes des exploitants agricoles. La question essentielle est de savoir si le changement climatique peut profiter aux exploitants ou au contraire diminuer leurs revenus.

Le tableau 9.2 présente les résultats obtenus à l'aide du modèle AROPAj à l'échelle de la France, pour les différents scénarios de changement climatique étudiés. La figure 9.2 présente ces mêmes résultats à l'échelle régionale.

Scénario	$\Delta$ marge
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	+ 9 %
2087 sans effet CO <sub>2</sub>	- 2 %
2099 avec effet CO <sub>2</sub>	- 1 %
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	- 5 %

TAB. 9.2 – Effet de différents scénarios de changement climatique sur la marge brute agricole française

Comme on peut le remarquer, l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> est prépondérant. Ne pas le prendre en compte conduit systématiquement à une baisse significative de la marge brute agricole (évalué à -450 millions environ pour le scénario 2087 et à -1100 millions pour le scénario 2099). Le prendre en compte conduit à une hausse importante de la marge pour une année de changement climatique "moyenne", et atténue la baisse de marge pour une année de changement climatique sèche et chaude.

La figure 9.2 met en lumière en premier lieu que la plupart des régions pourraient bénéficier du changement climatique pour un scénario moyen (année 2087). Cette tendance générale est totalement modifiée si l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> n'est pas pris en compte ou si on considère un scénario plus sec et plus chaud. On observe d'autre part une disparité nord-sud des impacts du changement climatique. De façon peut être un peu surprenante, ce sont les régions du nord de la France qui semblent le moins supporter les conséquences du changement climatique, et d'autant plus que le climat est sec (année 2099). Ceci tient essentiellement à l'hypothèse que nous avons faite concernant l'irrigation. Elle est maintenue et le modèle agronomique STICS considère qu'aucun stress hydrique ne survient. Les cultures du Sud ayant tendance à être davantage irriguées dans le modèle, elles souffrent moins d'un climat sec. On peut voir également que globalement un climat plus sec induit des pertes plus importantes ou des gains plus faibles. Il en est de même de la non prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Un climat plus chaud et plus sec peut néanmoins être plus profitable, c'est ce qui se produit en Languedoc-Roussillon, où une hausse des rendements en maïs (irrigué) permet de bénéficier des chaleurs plus importantes. Il faut par ailleurs relativiser le résultat concernant cette région qui ne comporte qu'un seul groupe-type pour lequel le rendement en maïs est très faible dans le scénario 2087. Enfin, l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> est loin d'être négligeable, et même globalement plus important que le fait de passer d'une année standard (2087) à une année sèche (2099).

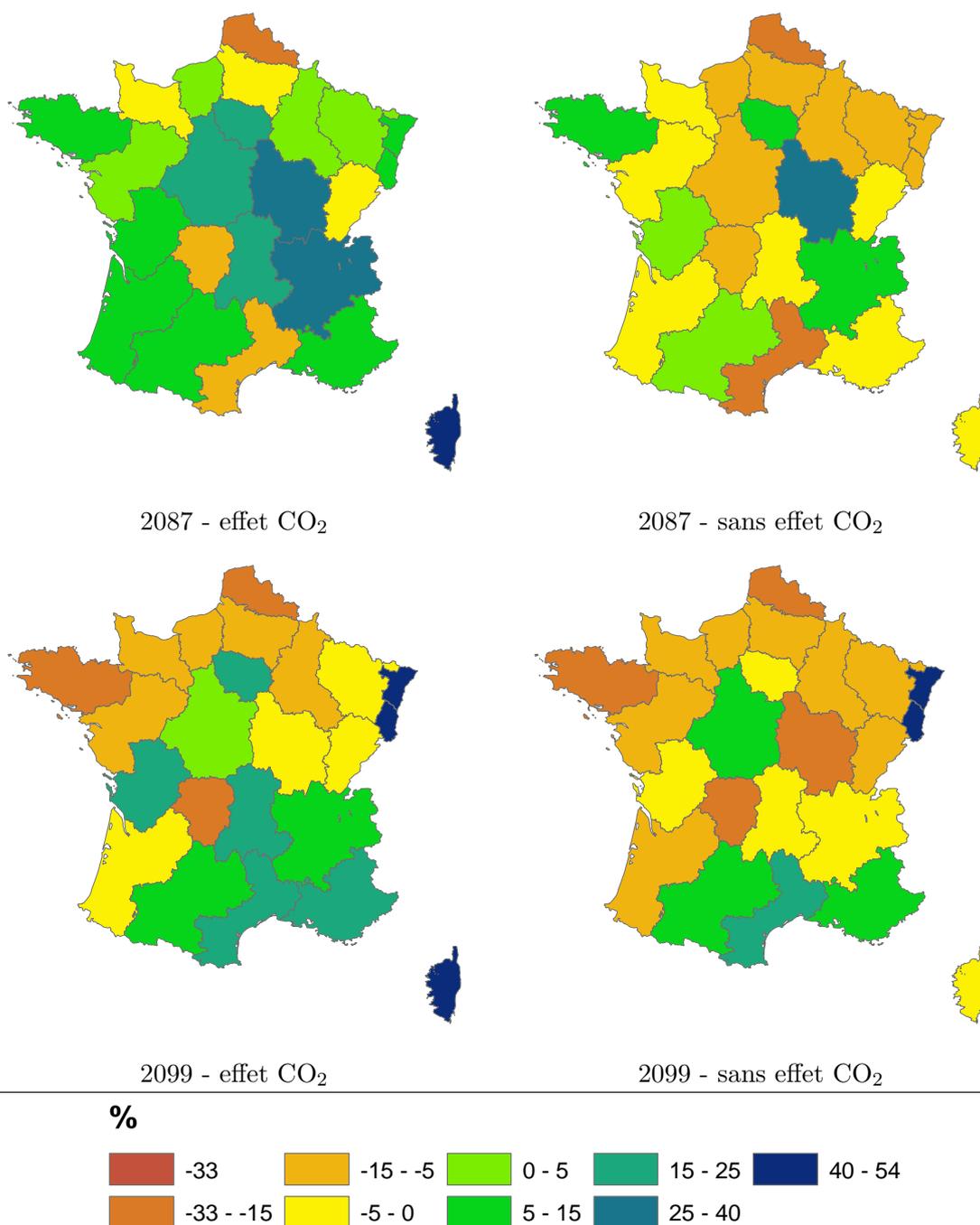


FIG. 9.2 – Variation des marges selon les différents scénarios de changement climatique.

### 9.1.3 Surfaces

Le modèle permet également d'obtenir l'allocation des terres selon les différents scénarios de changement climatique, ainsi que pour le scénario de référence. Les agents du modèle disposent d'une information complète sur les rendements à venir au moment d'allouer leurs surfaces. Le scénario 2099, correspondant à une année plus sèche et plus chaude, ne peut donc être considéré comme un évènement extrême, type sécheresse. Il faut le considérer plutôt comme représentatif d'un climat moyen auxquels les exploitants agricoles sont préparés : ils savent, en allouant leur terre, quel type de climat va survenir, et quels rendements ils peuvent en attendre. L'allocation des terres simulée par le modèle correspond donc à une allocation optimale des terres, étant donnés les rendements qui vont être obtenus.

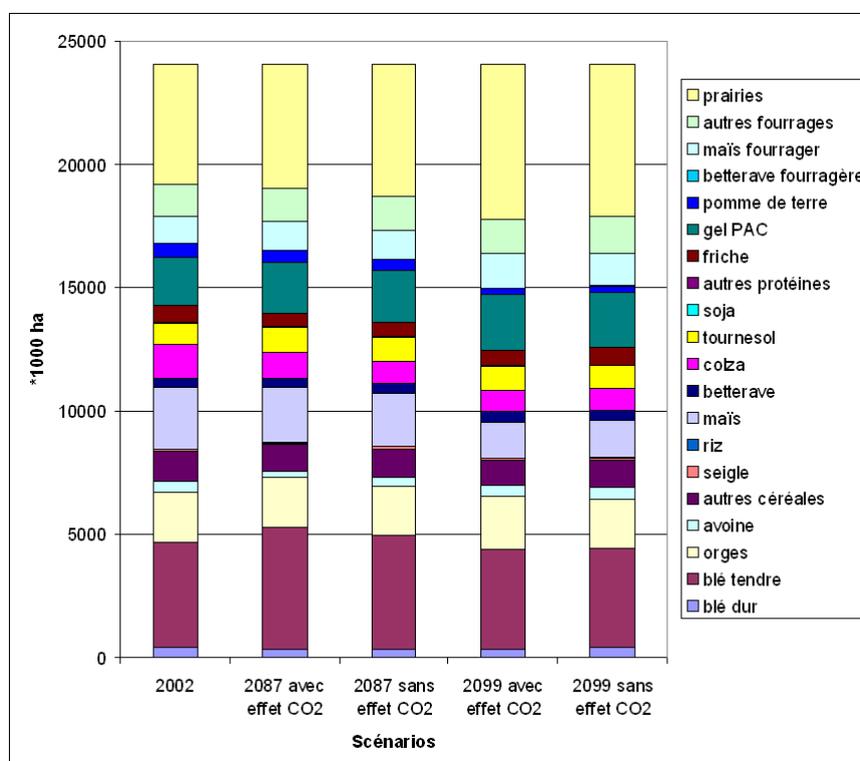


FIG. 9.3 – Impact du changement climatique sur l'allocation des terres

La figure 9.3 montre l'allocation optimale des terres selon les différents scénarios de changement climatique étudiés, ainsi que pour le scénario de référence.

Tandis que la surface en blé tendre augmente pour l'année climatique 2087, elle diminue pour l'année 2099, plus sèche et plus chaude. Les surfaces en maïs, en pomme de terre et en colza diminuent systématiquement, et davantage en 2099 qu'en 2087. La surface en tournesol en revanche augmente avec le changement climatique, dans les mêmes proportions en 2087 et en 2099. La surface en prairie augmente systématiquement, particulièrement en 2099, compensant les diminutions de surfaces en céréales. Les effets globaux sur l'allocation des terres entre les différentes activités végétales sont

la résultante d'effets complexes liés à l'arbitrage entre le "végétal" et l'"animal". Une variation de la surface en prairie peut s'accompagner à la fois d'une variation de l'alimentation animale concentrée (et achetée) ainsi que d'une variation de la consommation de céréales produits sur l'exploitation et d'une modification du nombre d'animaux.

Le maïs et la pomme de terre sont des cultures considérées dans le modèle AROPAj comme non irriguées dans de nombreuses régions. En année sèche, comme 2099, les rendements sont faibles d'où une diminution forte de leurs surfaces. La baisse de la surface en blé en 2099 s'explique également par l'effet sécheresse. Par conséquent, les rendements en prairie pour 2099 n'étant pas pénalisés par l'effet sécheresse (nous considérons que ceux-ci sont identiques à 2087), les surfaces augmentent. Le modèle AROPAj considère deux types de prairies : les prairies temporaires (annuelles) et les prairies permanentes. L'activité prairies permanentes domine largement l'activité prairies temporaires dans le modèle (99,8% de prairies permanentes sur les 4.82 millions d'hectares de prairies dans le modèle pour l'année 2002 en France). Les prairies permanentes (culture implantée pour plusieurs années) sont susceptibles de mieux "supporter" les effets du changement climatique (sécheresse). En effet une culture implantée depuis 3 ou 4 ans a un système racinaire beaucoup plus développé qu'une culture annuelle et peut donc "normalement" mieux supporter un aléa climatique. Cela justifie d'une part notre choix d'avoir considéré les rendements des prairies identiques entre 2087 et 2099, et d'autre part le fait que lors d'une année sèche, l'allocation optimale des terres fait apparaître une augmentation de la surface en prairies.

### 9.1.4 Productions végétales et collecte

La figure 9.4 présente les volumes produits et vendus, selon le scénario considéré. La différence entre production et collecte est consommée sur l'exploitation, pour l'alimentation animale.

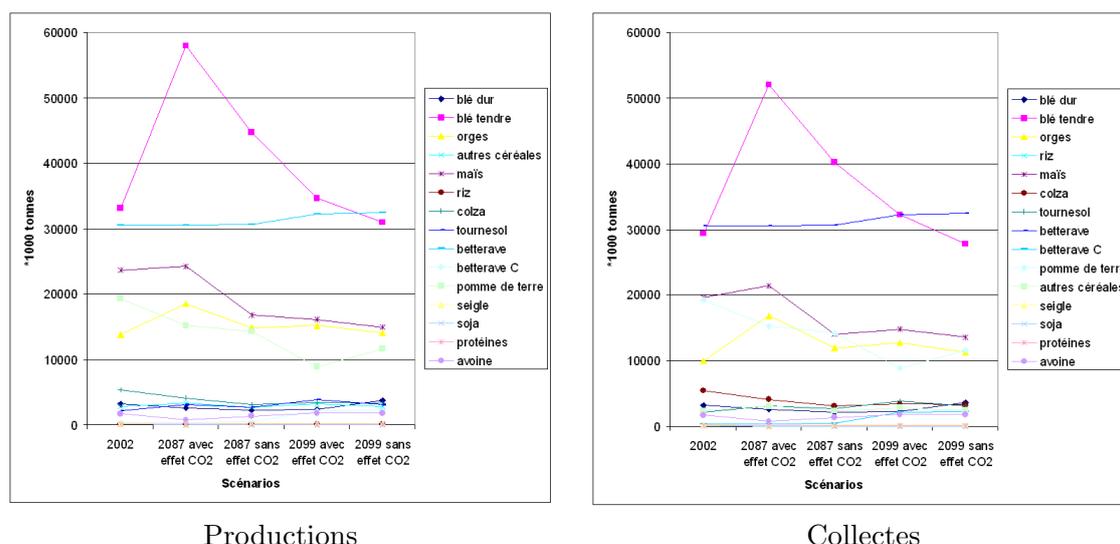


FIG. 9.4 – Productions végétales et collectes selon le scénario de référence ou le scénario de changement climatique étudié.

L'impact de l'intraconsommation étant assez marginal, l'essentiel à retenir est que selon la sécheresse du climat la production de blé tendre pourrait fortement augmenter (réchauffement modéré de l'année 2087) ou rester stable (réchauffement plus important avec baisse des précipitations). La production de maïs resterait stable si le climat se réchauffe modérément, mais diminuerait de façon importante (-25%) si le climat devient plus sec. Il ne faut pas oublier ici que nous avons considéré que les conditions d'irrigation étaient identiques à l'année 2002 et que le modèle STICS considère qu'aucun stress hydrique n'est dans ce cas atteint. Il faut donc plutôt estimer nos résultats comme une évaluation optimiste des impacts du changement climatique, c'est-à-dire dans un sens favorable aux rendements et aux agriculteurs.

### 9.1.5 Productions animales

Le changement climatique apparaît comme un facteur améliorant la rentabilité des activités animales, avec une hausse du produit brut animal, quelque soit le scénario de changement climatique considéré (tableau 9.3). Cette hausse semble essentiellement le fait d'une baisse des dépenses en aliments –dont les prix sont maintenus constants, comme tous les autres prix dans le modèle. Les animaux sont donc davantage alimentés à partir des productions sur la ferme. Les prairies sont en effet plus productives, tout comme le blé tendre pour les deux premiers scénarios de changement climatique (année 2087 avec ou sans effet CO<sub>2</sub>).

Scénario	Effectif (UGB)	Produit brut animal	Dépense alimentaire
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	+ 2.0%	+ 4.0%	- 7.9%
2087 sans effet CO <sub>2</sub>	+ 1.0%	+ 1.2%	- 1.6%
2099 avec effet CO <sub>2</sub>	+ 6.4%	+ 4.9%	- 3.3%
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	+ 2.6%	+ 1.7%	- 1.1%

TAB. 9.3 – Évolution des activités animales par rapport au scénario de référence.

### 9.1.6 Émissions de GES

En 2099, l'augmentation des surfaces en prairies permet d'alimenter les animaux sur l'exploitation. Ce type d'alimentation est cependant plus méthanogène. Les animaux étant davantage alimentés sur l'exploitation, cela implique une hausse des émissions de méthane. Ceci semble d'autant plus marqué que les prairies s'étendent.

La hausse ou la baisse des émissions de N<sub>2</sub>O est liée à la consommation d'intrants azotés. L'évolution des courbes de réponse des rendements à l'azote sous l'effet du changement peut conduire à une hausse des rendements pour une consommation d'engrais supérieure ou inférieure. Il s'avère que l'année 2087 correspond plutôt à une augmentation des quantités d'engrais accompagnant la hausse des rendements tandis que 2099 correspond à une baisse des quantités d'engrais accompagnant la baisse des rendements.

Les résultats concernant les émissions de gaz à effet de serre sont rassemblés dans le tableau 9.4.

Scénarios	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Émissions totales
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	+28.0%	-2.9%	+ 15.20%
2087 sans effet CO <sub>2</sub>	+5.5%	+2.9%	+ 4.40%
2099 avec effet CO <sub>2</sub>	-5.9%	+6.6%	- 0.70%
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	-8.5%	+7.7%	- 1.80%

TAB. 9.4 – Évolution des émissions de GES avec le changement climatique.

## 9.2 Impacts sur les prix de la terre

### 9.2.1 Impact du changement climatique sur le prix des terres en France

Affectant la marge des exploitants, le changement climatique aura nécessairement des répercussions sur le prix des facteurs de production, et donc sur le prix de la terre. Mendelsohn et al. (1994) mesurent l'impact du changement climatique sur les prix des terres aux États-Unis. A l'aide de données climatiques, économiques (dont les prix des terres agricoles) et géophysiques, ils montrent que des températures plus élevées toute l'année sauf en automne réduisent la valeur moyenne des fermes, tandis que plus de précipitation (sauf en automne) l'augmente. Ils estiment l'impact d'un scénario de réchauffement climatique à un niveau plus faible que celui calculé à partir de l'approche "fonction de production". L'approche par les fonctions de production consiste à construire une fonction de production reliant la valeur d'une activité à une variable environnementale (la température, pour fixer les idées). L'impact d'une modification du climat est ainsi calculé directement à l'aide de cette fonction. Cette approche ne permet pas de passer d'une activité à une autre une fois certains seuils de température dépassés. Dans la mesure où l'adaptation des agriculteurs n'est pas ou peu envisagée, les études surévaluent le plus souvent les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Pour corriger ce biais, Mendelsohn et al. adoptent une approche ricardienne, qui vise à construire une fonction globale pour toutes les activités reliant la valeur des activités à des variables climatiques (observations sur le passé). Cela correspond au maximum des courbes précédentes. La valeur de la ferme tend à être proportionnelle à la rente de la terre. Ainsi en observant les relations entre la valeur des fermes et les variables climatiques sur un échantillon, on peut reconstruire la forme de la courbe. D'après leur étude, même sans l'effet fertilisant de CO<sub>2</sub>, le réchauffement climatique pourrait avoir des conséquences économiques positives pour l'agriculture américaine.

Scénario	Prix fictif de la terre (€·ha <sup>-1</sup> )
2002	702
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	772 (+10%)
2087 sans effet CO <sub>2</sub>	675 (-4%)
2099 avec effet CO <sub>2</sub>	673 (-4%)
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	645 (-8%)

TAB. 9.5 – Prix de la terre selon le scénario climatique en France.

Nos résultats sont assez différents puisque nous trouvons que seul le scénario de réchauffement moyen (année climatique 2087) tenant compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> s'accompagne d'une hausse du prix fictif de la terre. Sans effet CO<sub>2</sub>, le changement climatique conduit systématiquement à une baisse de la valeur de la terre. Les disparités régionales sont présentées sur la figure 9.5.

Les cartes montrent d'abord que les effets que nous avons décrits sur la marge se traduisent sur le prix des facteurs, et donc sur le prix de la terre. On retrouve donc ici une partie nord de la France subissant plutôt que profitant du changement climatique, et d'autant plus que l'année est sèche ou que l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> n'est pas pris en compte. Ici encore la non prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> a des conséquences plus fortes sur le prix des terres que le passage d'un scénario de changement climatique standard (2087) à un scénario plus sec (2099).

### 9.2.2 Impact selon l'orientation des exploitations

Un des nombreux intérêts de la typologie du modèle AROPAj est de distinguer les groupes-types selon leur orientation technique et économique. Comme au chapitre 3, nous avons donc distingué parmi les groupes-types français ceux orientés principalement vers les grandes cultures (cultivateurs) et ceux orientés vers les productions animales (éleveurs). Ceci nous permet de sélectionner 46 groupes-types sur les 157 groupes français qui sont soit éleveurs (orientation technico-économique 41 et 43, spécialisés lait ou combinant lait, élevage et viande), soit cultivateurs (orientation technico-économique 1, spécialisés en grandes cultures). Il est alors possible de regarder les effets d'un changement de climat sur le prix des terres selon leur orientation. Comme le montre la figure 9.6, si le prix des terres des éleveurs ne subit quasiment aucune fluctuation sous l'effet d'un scénario de changement climatique, cela est bien différent pour les cultivateurs, les effets pouvant être très positifs ou très négatifs.

## 9.3 Hiérarchisation des impacts

Les conséquences du changement climatique que nous avons tenté d'évaluer sont attendues pour la fin du siècle. L'échéance longue permet de s'y préparer. Les exploitants agricoles européens et français sont par ailleurs habitués, non à des modifications de leur environnement physique, mais à des changements de leur environnement économique, à travers les nombreuses réformes de la PAC qui ont eu lieu depuis les années 1990 (réforme McSharry en 1992, réforme de l'Agenda 2000, réforme de Luxembourg). Il est donc intéressant de comparer les conséquences des réformes politiques aux conséquences attendues du changement climatique.

Nous allons considérer ici deux scénarios de réforme de la PAC (tableau 9.1). Le premier scénario stylise la réforme de Luxembourg, de la même façon qu'aux chapitres 2 et 3. Le second scénario correspond à un découplage total des aides, les exploitants n'étant soumis à aucune obligation de gel de terre. Ces deux scénarios diffèrent néanmoins de ce qui a été présenté aux chapitres 2 et 3 puisque nous considérons ici des

### 9.3. Hiérarchisation des impacts

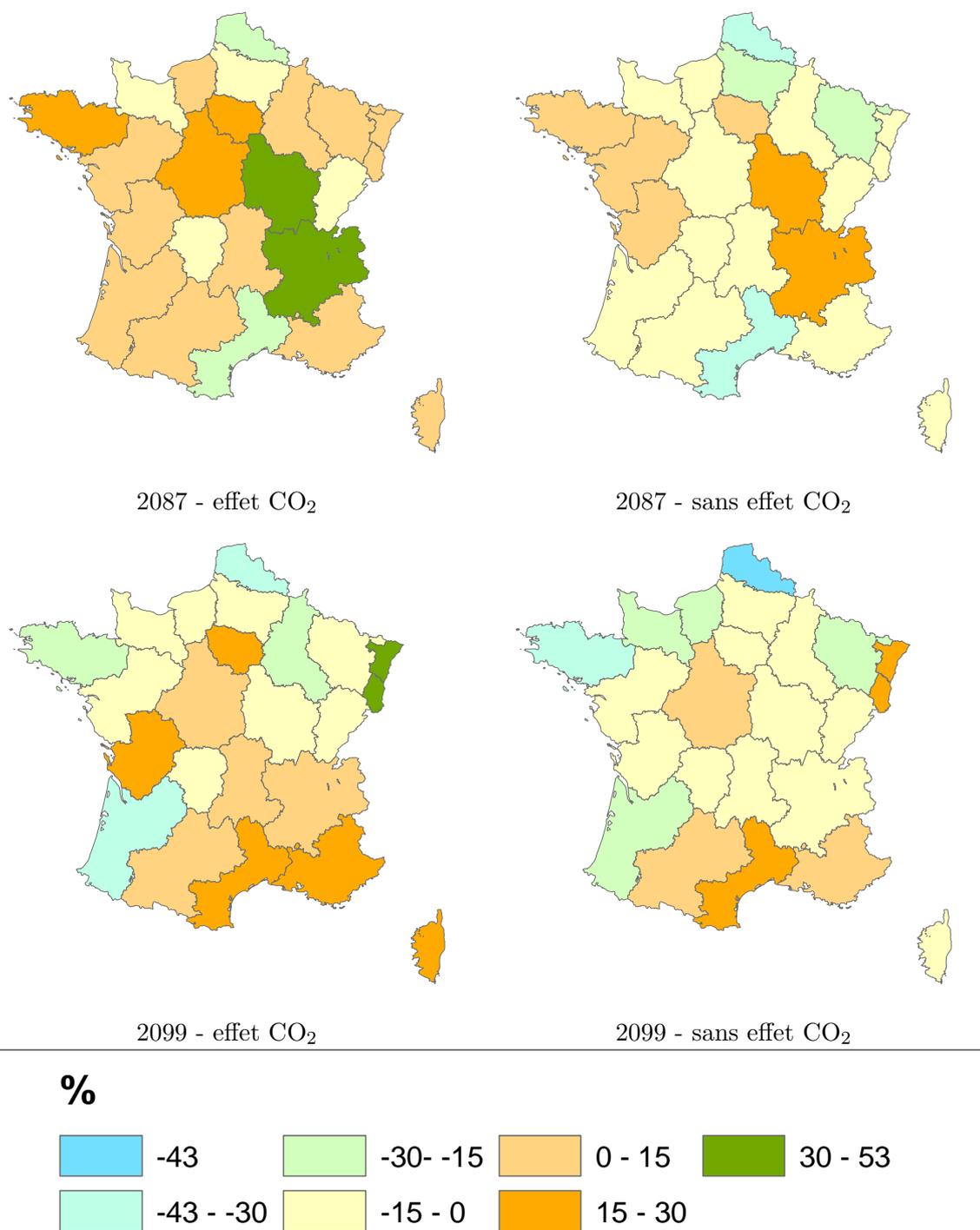


FIG. 9.5 – Variation des valeurs duales de la terre selon les différents scénarios de changement climatique (par rapport au scénario de référence).

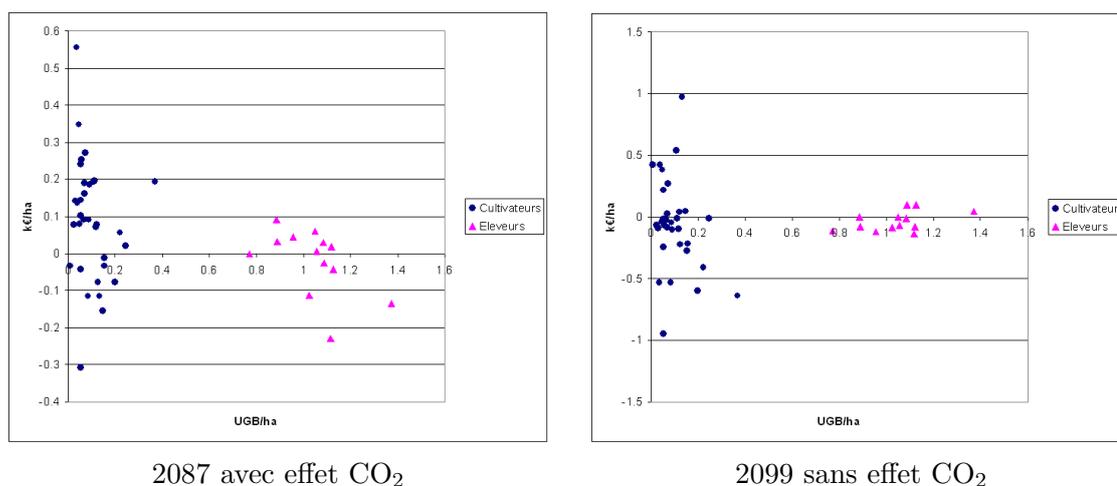


FIG. 9.6 – Impact d'un scénario de changement climatique sur les prix des terres, selon l'orientation des exploitations.

courbes de rendement au lieu de rendements ponctuels des cultures. En regard de ces deux scénarios de réforme, nous examinerons les impacts des deux scénarios climatiques les plus extrêmes : un climat standard (année 2087) avec prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> et un climat sec et chaud (année 2099) sans prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>.

### 9.3.1 Sur les marges

Le tableau 9.6 montre l'impact des différents scénarios sur la marge brute agricole française. Les scénarios de réforme de la PAC sont tous les deux positifs, tandis que les scénarios de changement climatique ont des conséquences plus disparates. Par ailleurs, les effets d'une réforme de la PAC sont de moindre importance par rapport aux effets du changement climatique. L'environnement physique semble donc être le principal élément explicatif des variations des marges agricoles, et tout changement de celui-ci a des conséquences immédiates et majeures. La PAC, ou plus exactement la façon dont les aides sont couplées à la production, en revanche, a moins d'influence. La figure 9.7 illustre également cela à l'échelle régionale.

Scénario	$\Delta$ marge brute
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	+ 9 %
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	- 5 %
Luxembourg	+ 0 %
Découplage total	+ 3 %

TAB. 9.6 – Effet de différents scénarios de changement –climatique et politique– sur la marge brute agricole française, comparée à la marge de référence (Agenda 2000, année 2002, avec ajustement du capital animal).

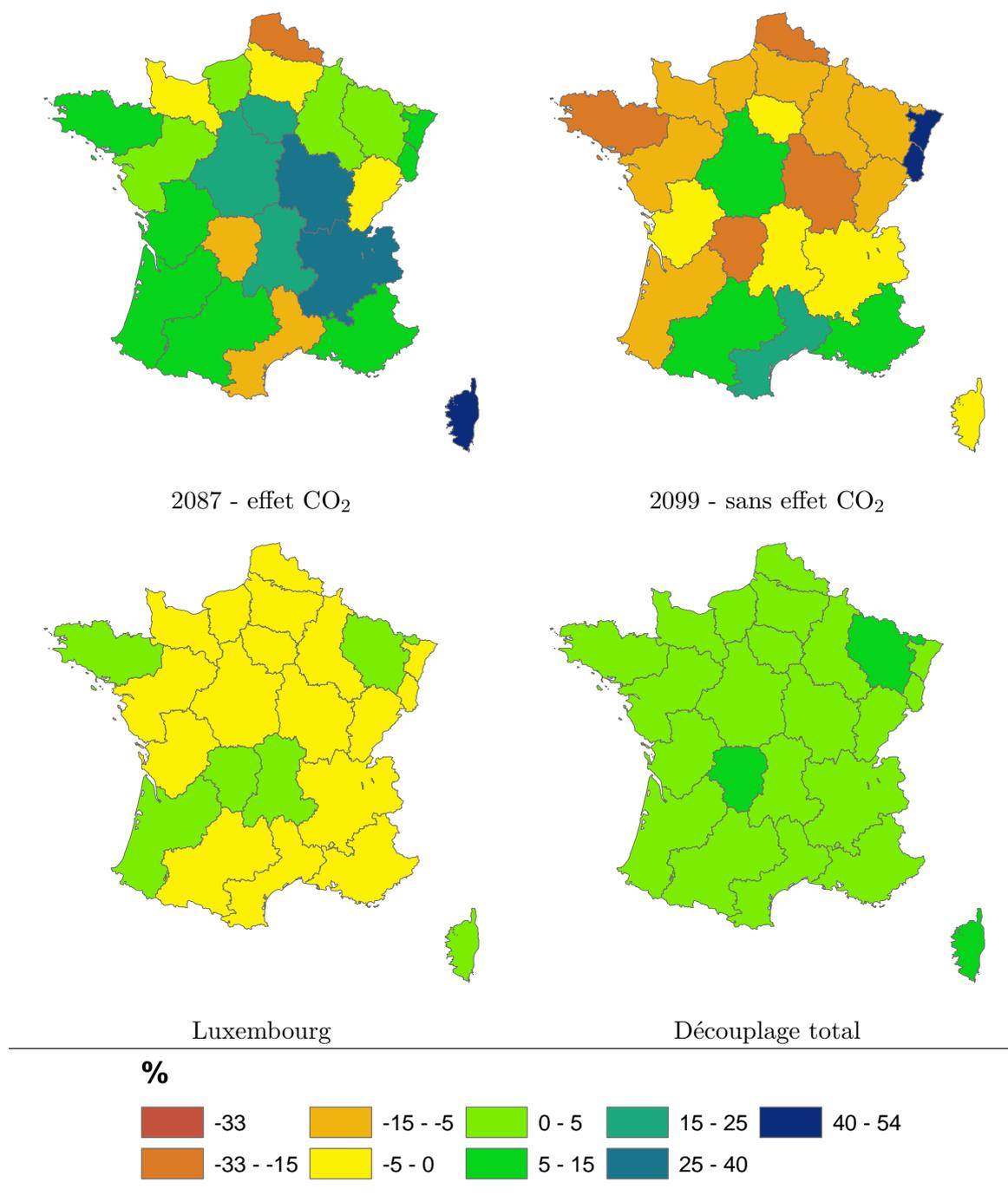


FIG. 9.7 – Variation des marges selon les différents scénarios de changement –climatique et politique.

### 9.3.2 Sur l'allocation des terres

Les résultats diffèrent en ce qui concerne l'allocation des terres. Ici, c'est l'environnement économique qui prime et qui modèle le paysage agricole. Sur la figure 9.8, cela se remarque par la disparition de la jachère dans le cas du scénario de découplage total, ainsi que par l'augmentation de la surface en prairies. Hormis pour le colza et le maïs, les scénarios de changement politique sont plus proches, en terme d'allocation des terres, d'un scénario de changement climatique marqué (2099 sans effet CO<sub>2</sub>).

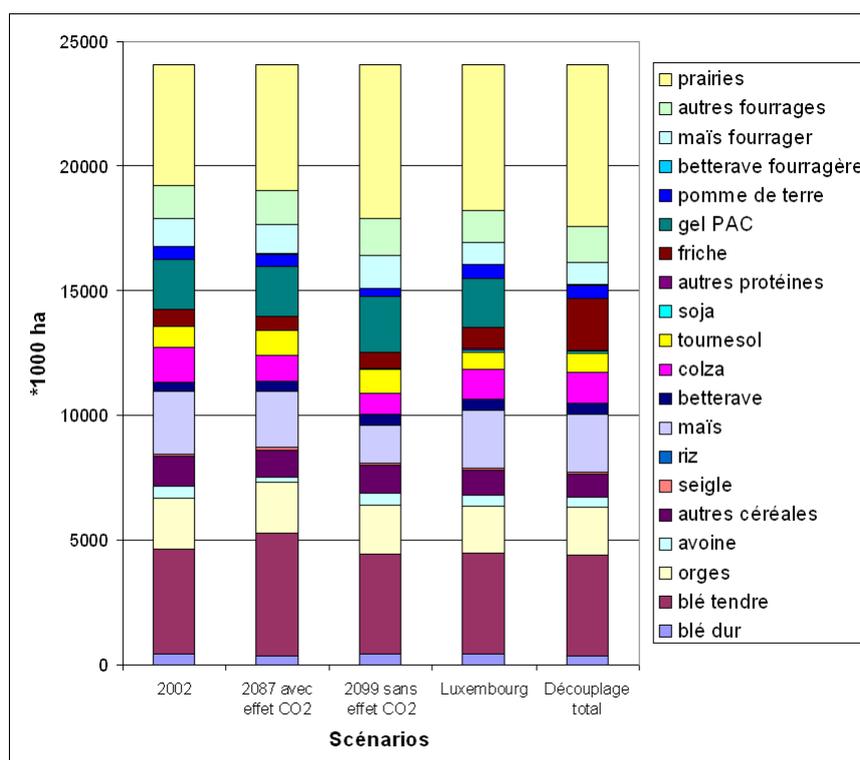


FIG. 9.8 – Allocation des terres selon les différents scénarios de changement –climatique et politique.

Sur les productions et la collecte, la forte modification des rendements associée au changement climatique rend tout son effet (figure 9.9). Les productions de blé tendre et de maïs sont particulièrement touchées par les scénarios de changement climatique, tandis que l'ensemble des productions est plutôt stable face à un changement de politique. Il faut donc s'attendre avec le changement climatique à des conséquences importantes sur les marchés mondiaux, qui nécessiteraient ici l'emploi d'un modèle d'équilibre général ou partiel pour mesurer l'impact à attendre sur les prix des différentes céréales et oléoprotéagineux.

### 9.3.3 Sur le prix des terres

Globalement, l'effet d'un changement de climat peut être positif ou négatif sur le prix des terres tandis que l'effet des réformes de la PAC est toujours positif, ou très

### 9.3. Hiérarchisation des impacts

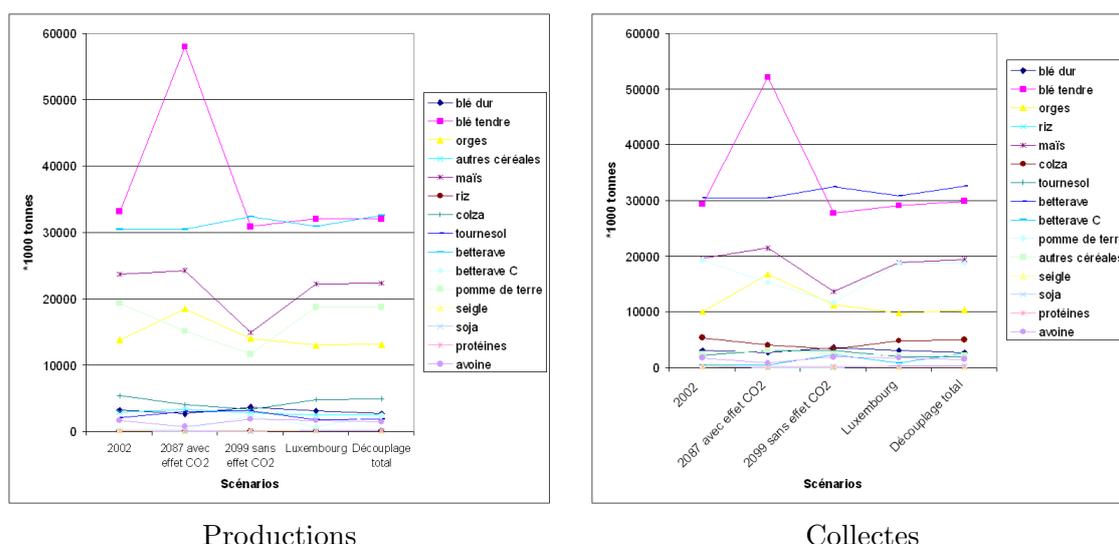


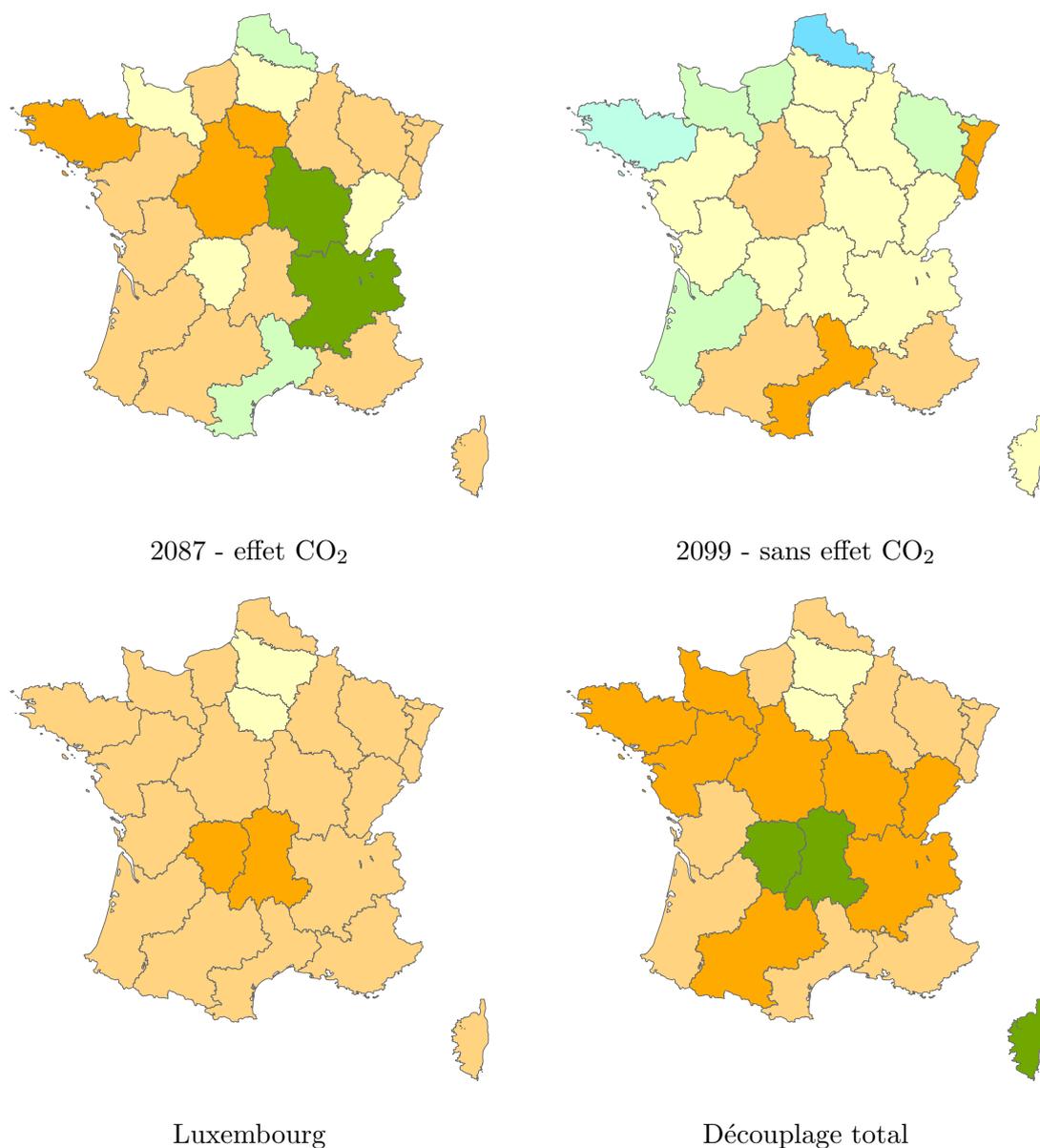
FIG. 9.9 – Productions végétales et collectes selon les différents scénario de changement-climatique et politique.

faiblement négatif (tableau 9.7 et figure 9.10). Ce qui est intéressant à ce niveau est la traduction des impacts des scénarios sur la marge d'une part et le prix des terres d'autre part. Les conséquences d'un changement de climat sur la marge et sur le prix des terres sont du même ordre de grandeur pour un scénario de changement climatique, la hausse ou la baisse de la marge se répercutant également sur l'ensemble des facteurs quasi-fixes de production. Ce n'est pas du tout le cas lors d'une réforme de la PAC. Les aides sont alors totalement capturées dans le prix de la terre. Ce phénomène peut cacher également une captation dans le prix de la main d'œuvre, non prise en compte par le modèle AROPAj. Néanmoins, la concomitance entre la forte concurrence sur le marché de la main d'œuvre et la limitation de la ressource terre nous amène à penser que c'est la terre qui va capturer l'impact dû à la modification de la forme des aides "PAC".

Scénario	Prix fictif de la terre (€·ha <sup>-1</sup> )
2002	702
2087 avec effet CO <sub>2</sub>	772 (+10%)
2099 sans effet CO <sub>2</sub>	645 (-8%)
Luxembourg	756 (+8%)
Découplage total	818 (+17%)

TAB. 9.7 – Prix de la terre selon le scénario –climatique ou politique– en France.

Par ailleurs, l'effet d'une réforme de la PAC cache également une redistribution entre les éleveurs et les cultivateurs, qui se traduit par une plus forte revalorisation des terres des éleveurs (chapitre 3). Un scénario de changement de climat a tendance à avoir un impact faible sur les prix des terres des éleveurs et des impacts très variés sur le prix des terres des cultivateurs.



%

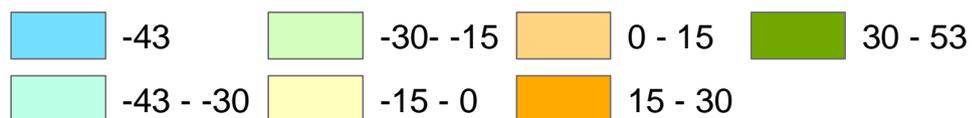


FIG. 9.10 – Variation des valeurs duales de la terre selon les différents scénarios de changement –climatique et politique– (par rapport au scénario de référence).

## Conclusion

Les résultats de l'analyse présentée dans ce chapitre montrent que le changement climatique aura des conséquences importantes sur l'agriculture française. Le modèle économique AROPAj, couplé au modèle agronomique STICS permet de bien mesurer les impacts du changement de climat sur l'agriculture française. Les deux scénarios climatiques utilisés montrent des contrastes importants, révélant l'existence d'un seuil de changement au delà duquel le secteur agricole souffrira des conséquences directes du réchauffement. La prise en compte de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> se révèle en outre un aspect déterminant sur les résultats.

L'utilisation d'un même modèle pour évaluer les conséquences du changement climatique d'une part et les conséquences d'une réforme de la PAC d'autre part permet une hiérarchisation des impacts. Cet exercice présente l'intérêt de mesurer les conséquences du changement climatique à l'aune de conséquences de changements mieux connus. Le secteur agricole européen en a connu plusieurs depuis le début des années 1990. Les conséquences du changement de climat se feront particulièrement ressentir sur les marges, alors que les réformes de la PAC cherchaient à maintenir les revenus des agriculteurs. Le climat va davantage modifier les marges que l'allocation des terres. Selon le scénario retenu néanmoins, les conséquences nettes pourront être positives ou négatives. L'allocation des terres en revanche est plus à même de changer avec une réforme politique. Un changement de climat a en effet globalement le même impact sur l'ensemble des rendements (avec une nuance pour des cultures exigeantes en eau), et ne modifie donc pas l'intérêt relatif d'une culture par rapport aux autres. Les productions pourraient aussi davantage changer avec le climat qu'avec une réforme politique. Enfin, la valeur de la terre, qui était bousculée dans un scénario de réforme de la PAC, avec en particulier une hausse plus forte des prix des terres des éleveurs, suit l'évolution de la marge dans le cas d'un scénario de changement climatique.

L'évaluation qui est faite ici doit être mise en regard du scénario de changement climatique utilisé, le scénario B2 de l'IPCC, considéré comme une version optimiste de la modification du climat à attendre suite aux perturbations engendrées sur le système climatique par les activités humaines. Ainsi, les hausses de marge agricole estimées pourraient devenir des pertes si le réchauffement est plus important, si l'eau devient plus rare ou si les pluies ne surviennent pas aux moments clés des périodes de croissance des plantes. Nous avons en effet considéré ici que l'irrigation était maintenue. Cette hypothèse serait à revoir ; sans trop de difficultés sur le plan informatique, il est possible de supprimer l'irrigation pour toutes les cultures et toutes les régions par exemple. Un tel scénario permettrait d'obtenir une évaluation basse des conséquences à attendre du changement de climat.

Nous n'avons pas non plus tenu compte de possibilités d'adaptation des exploitants agricoles au changement climatique. Néanmoins, les agents économiques représentés dans le modèle AROPAj sont supposés prendre leurs décisions en anticipant le climat à venir, et donc les rendements agricoles, ce qui revient donc à considérer qu'une partie

de l'adaptation autonome s'est faite : le nouveau climat est installé et les exploitants le connaissent. D'autres options d'adaptation seraient par ailleurs à introduire. Ainsi, il serait pertinent de faire en sorte que les exploitants mettent en œuvre de nouvelles activités végétales comme le sorgho (culture servant à l'alimentation animale et moins exigeante en eau que le maïs) ou le soja (culture qui pourrait s'étendre plus au nord sous de nouvelles conditions climatiques plus chaudes). L'introduction de nouvelles cultures modifierait le profil des productions françaises. Néanmoins, cela pose une autre difficulté, qui est de disposer des données économiques relatives à ces activités. N'existant pas actuellement là où nous souhaiterions les introduire, aucune information n'est disponible sur les charges inhérentes à ces activités (charges en engrais autres que l'azote en particulier).

La méthode sur laquelle s'appuie ce travail et les modèles utilisés vont permettre d'étendre à court terme ces résultats à l'échelle européenne.



# Conclusion générale

Tout au long de ce travail nous nous sommes appuyés sur un modèle quantitatif de l'offre agricole européenne, le modèle AROPAj. Il nous a été nécessaire de l'amender en données, ou en modules afin de lui faire mesurer les effets que nous souhaitions évaluer. De ce fait, cette thèse se place dans un cadre d'ingénierie économique. Le modèle AROPAj que nous avons choisi d'utiliser présente plusieurs intérêts par rapport aux problèmes que nous avons étudiés. En ce qui concerne l'évaluation des réformes de la PAC, c'était l'objectif à l'origine de la conception du modèle. La maquette d'AROPAj a en effet été développée en 1988 initialement pour évaluer les réformes de la PAC à venir et la première véritable version du modèle a été développée pour analyser les impacts de la réforme MacSharry. La richesse du modèle tient à la typologie détaillée des exploitants agricoles sur lesquels il repose (les groupes-types). Prenant en compte la diversité des systèmes d'exploitation européens, il est capable de mesurer finement les impacts des réformes sur les exploitants selon leurs orientations technique et économique. A la suite de quelques ajouts, il a été également possible de l'utiliser pour mesurer les coûts d'abattement des exploitants en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Enfin, concernant le changement climatique, la relative homogénéité des groupes-types permet de leur attribuer un environnement physique (sol, climat) et ainsi de prendre en compte les conséquences à venir du changement de climat à l'aide d'un couplage externe avec un modèle agronomique, le modèle STICS.

Comme tout modèle de programmation mathématique, ce modèle souffre d'un manque de validation, dans l'idée de comparer la réalité observée à des rétro-projections. C'est un modèle à caractère prospectif conçu pour analyser les impacts d'un changement d'une partie des paramètres, les "groupes-types" restant structurellement inchangés. Attaché à une structure, celle des exploitations modélisées (les groupes-types), il n'est pas conçu pour reproduire le passé ou se projeter très loin dans le futur afin de faire de la prévision. Sur du plus court terme, cette objection est moins pertinente et il serait donc intéressant d'utiliser les différentes versions du modèle pour étudier dans quelle mesure par exemple la version de 1997 permet de reproduire les résultats de la version de 2002, en 2002. Cette comparaison serait à mener à différentes échelles spatiales, des régions à l'Union Européenne à 15 en passant par les États Membres.

Ce travail nous a permis d'aboutir à plusieurs résultats. Le premier concerne la réforme de la PAC. Comme les études théoriques l'ont déjà montré, le découplage des aides permet d'améliorer l'efficacité économique de la PAC. Nous évaluons à près d'un

milliard d'euros le gain associé à la réforme de Luxembourg. En allant plus loin que la réforme de Luxembourg, c'est-à-dire en s'orientant vers un découplage total des aides sans obligation de jachère, ce gain pourrait être deux fois supérieur. En outre, le lien qui est créé entre l'aide découplée et la terre a un impact significatif sur la valeur de la terre. Cet impact est d'autant plus fort que l'exploitation est orientée vers les activités d'élevage bovin, les primes portant alors sur les têtes étant transférées vers les hectares de terre. Il nous semble néanmoins essentiel de conserver un lien entre terre et droit à paiement puisque cela reste la seule variable de commande du décideur public afin d'atteindre des objectifs environnementaux (en particulier, afin d'assurer le maintien des terres dans de bonnes conditions agricoles et environnementales). Les préoccupations environnementales sont amenées à jouer un rôle prépondérant dans les prochaines réformes de la PAC.

Concernant la question majeure de l'effet de serre, le secteur agricole participe aux émissions et serait à même de contribuer à l'effort de réduction des émissions d'origine anthropique, dans le cadre de la directive quota<sup>2</sup> ou dans le cadre du protocole de Kyoto. Nous avons montré la grande sensibilité du secteur à la valeur des coefficients utilisés pour mesurer les émissions des différents gaz en une unité commune, les tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>. Si les coefficients retenus dans le cadre des négociations internationales, les pouvoirs de réchauffement global, fondés uniquement sur des notions physiques, sont discutables du fait de leur utilisation dans un cadre économique, ils font néanmoins consensus.

Enfin, conséquence de la hausse des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le changement climatique devrait avoir des impacts importants sur le secteur agricole –les résultats présentés sont à prix constants, l'emploi d'un modèle d'équilibre général ou partiel en parallèle de ce travail permettrait de prendre en considération l'effet additionnel d'une modification des prix. Ces impacts pourraient être positifs ou négatifs selon l'ampleur du réchauffement. Ainsi, un réchauffement moyen (+1°C pour la France avec une baisse des précipitations annuelles de 90 mm) pourrait entraîner une hausse des marges agricoles (jusqu'à +9%) associée à une hausse des rendements, tandis qu'un réchauffement plus important (+1.6°C pour la France avec une baisse des précipitations annuelles de 170 mm) s'accompagnerait d'une diminution de la marge agricole française (jusqu'à -5%). Les résultats obtenus sont particulièrement sensibles à la prise en compte ou non de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>. Ne pas le prendre en compte conduit systématiquement à une baisse des marges quelque soit le scénario climatique utilisé. L'utilisation d'un même modèle économique pour évaluer les conséquences du changement climatique d'une part et les conséquences d'une réforme de la PAC d'autre part offre quelques possibilités de comparaisons. Il s'avère ainsi que le climat pourrait avoir des conséquences bien plus importantes qu'une réforme de la PAC sur les revenus des exploitants agricoles français. Si ces conséquences sont négatives, la mise en place de mesures politiques s'avérera sans doute nécessaire afin d'adapter les systèmes d'exploitations actuels aux futures conditions climatiques. Et dans le cas contraire,

---

<sup>2</sup>Directive 2003/87/CE du 13 octobre 2003

l'adaptation devrait permettre d'améliorer encore les gains associés au changement climatique. L'étude que nous avons menée n'a pas considéré cette question. En particulier, l'introduction de nouvelles cultures n'a pas été envisagée, faute de données complémentaires validées. Le modèle économique sur lequel nous nous sommes basés doit permettre d'obtenir des résultats, si les données nécessaires pour paramétrer ces nouvelles activités sont disponibles.

Une autre question n'a pas été traitée ici, celles des événements extrêmes. La structure du modèle utilisé n'est pas actuellement adaptée à la prise en compte de phénomènes de surprise : les agents économiques du modèle optimisent leur marge sous un certain nombre de contraintes, tout en anticipant les rendements associés au changement climatique. L'amélioration des modèles climatiques et des prévisions à moyen terme (3 mois) devrait permettre aux exploitants dans le futur de mettre en place leurs cultures de printemps en sachant si une sécheresse ou une canicule est à craindre. En ce qui concerne les cultures mises en place en hiver, pour une récolte à l'été suivant, l'amélioration des prévisions climatiques ne permettra pas de prendre en compte les phénomènes extrêmes. La prise en compte d'événements extrêmes comme la canicule de 2003 devrait donc s'appuyer sur deux types de rendements : des rendements supposés, à partir desquels les exploitants allouent leurs surfaces, et les rendements réels, qui définissent les niveaux des productions et la marge.

Face à une installation progressive d'un réchauffement climatique, les exploitants agricoles tout comme les décideurs politiques devraient réussir à mettre en place des mesures d'adaptation, chacun à leur niveau. Il semble aujourd'hui que la prise de conscience collective de ce nouvel enjeu ait eu lieu. Les actions pourraient donc voir le jour assez tôt, quand il s'agit en particulier d'investissements de long terme (recherche et développement de nouvelles variétés, investissement dans des infrastructures de stockage d'eau, par exemple). Une action qui pourrait également être urgente concerne la réduction des émissions d'origine anthropique. Le rapport Stern souligne ainsi que, en agissant dès maintenant les coûts seront limités, tandis qu'une action reportée dans le temps serait bien plus coûteuse.

Ce travail de thèse contribue à comparer les différents effets de la PAC d'une part et du changement climatique d'autre part. Il permet également d'évaluer les émissions du secteur qui subit lui-même les effets du climat. L'agriculture européenne et française émet des GES qui contribuent au changement climatique (phénomène plutôt atténué par les réformes de la PAC), lequel modifie positivement ou négativement les émissions (selon le scénario de changement climatique considéré). En prenant en compte à la fois les effets des émissions et du changement d'usage des terres associé au changement climatique et surtout aux réformes de la PAC, il nous serait possible de déterminer si le secteur participera à un effet d'emballement, i.e., renforçant le changement climatique, ou plutôt à un effet tampon, i.e., atténuant le changement climatique.

Enfin, l'étude réalisée sur le changement climatique se base sur des prix constants. Elle montre une forte variation de l'offre agricole française. Un couplage avec un modèle

d'équilibre partiel serait souhaitable pour prendre en compte les modifications des prix de marché et leurs conséquences sur l'offre agricole et les marges des exploitants. De nouvelles problématiques émergent également avec le développement des agro-carburants, et la question de la qualité de l'eau. Ces deux problématiques ont en commun de s'appuyer sur des ressources rares : la terre et l'eau. La rareté de ces deux ressources est également un problème-clé de la question du changement climatique puisque des terres pourraient ne plus être cultivables et l'eau pourrait, indépendamment de sa qualité, venir à manquer.

# Bibliographie

- Adams, R. M., Fleming, R. A., Chang, C.-C., McCarl, B. A. and Rosenzweig, C. (1995), ‘A reassessment of the economic effects of global climate change on US agriculture’, *Climatic Change* **30**, 147–167.
- Antle, J. M., Capalbo, S., Mooney, S., Elliott, E. and Paustian, K. (2003), ‘Spatial heterogeneity, contract design, and the efficiency of carbon sequestration policies for agriculture’, *Journal of Environmental Economics and Management* **46**(2), 231–250.
- Arnell, N. W., Livermore, M. J. L., Kovats, S., Levy, P. E., Nicholls, R., Parry, M. L. and Gaffin, S. R. (2004), ‘Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments : characterising the SRES storylines’, *Global Environmental Change* **14**, 3–20.
- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J., Jayet, P., Soussana, J. and Stengel, P., eds (2002), *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Contribution à la lutte contre l’effet de serre*, Unité Expertise Scientifique Collective, INRA, Paris, France.
- Balkhausen, O. and Banse, M. (2006), ‘The impact of decoupling and modulation in the enlarged union : a sectoral and farm level assessment – effects of decoupling in EU member states : A partial equilibrium analysis’, *Work Package 10, Deliverable 18*.
- Banse, M., Grethe, H. and Nolte, S. (2005), *European Simulation Model (ESIM) in GAMS : User Handbook.*, European Commission, DG AGRI.
- Baranger, E., Jayet, P.-A., Roger-Estrade, J. and Richard, G. (2007), ‘Dégradation physique des sols agricoles liée au tassement : conséquences économiques’, Poster présenté au séminaire STICS à Reims.
- Betts, R. A. (2000), ‘Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo’, *Nature* **408**, 187–190.
- Bontemps, J.-D., Vallet, P., Hervé, J.-C., Rittie, D., Dupouey, J.-L. and Dhôte, J.-F. (2005), ‘Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d’exploitabilité?’, *Revue Forestière Française* **57**(2), 123–142.
- Borges, A. M. (1986), *Applied general equilibrium models : an assessment of their usefulness for policy analysis*, Technical Report 7, OECD Economic Studies.

- Bourdon, M. (1999), Constat de l'incidence de la PAC 1992 sur le prix réel des terres labourables, *in* 'Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France', Vol. 85 - 1, pp. 115–127. Séance du 27 janvier 1999.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaecke, P., Gaudillère, J., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B. and Sinoquet, H. (2003), 'An overview of the crop model STICS', *European Journal of Agronomy* **18**, 309–332.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B. and Justes, E. (2002), 'Stics : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. ii. model validation for wheat and maize', *Agronomie* **22**, 69–92.
- Bureau, J.-C. and Gohin, A. (2005), *Les politiques agricoles sont elles condamnées par la mondialisation ?*, Vol. ISBN 2-87209-804-6, Academia Bruyland, Rainelli P., chapter Les modèles d'analyse économique et leur utilisation pour les négociations commerciales sur l'agriculture, pp. 163–194.
- Burton, I. and Lim, B. (2005), 'Achieving adequate adaptation in agriculture', *Climatic Change* **70**, 191–200.
- Callaway, J. M. (2004), 'Adaptation benefits and costs : are they important in the global policy picture and how can we estimate them?', *Global Environmental Change* **14**, 273–282.
- Cavailhès, J. and Degoud, S. (1995), 'L'évaluation du prix des terres en France. une application aux effets de la réforme de la PAC', *Cahiers d'économie et de sociologie rurales* **36**, 49–77.
- Cavailhès, J. and Wavresky, P. (2003), 'Urban influences on periurban farmland prices', *European Review of Agricultural Economics* **30**(3), 333–357.
- Chavas, J.-P. and Thomas, A. (1999), 'A dynamic analysis of land prices', *American Journal of Agricultural Economics* **81**, 772–784.
- Commission Regulation (EC) N° 795* (2004), JO L 141 of 30 April 2004.
- Council Regulation (EC) N° 1782* (2003), JO L 270 of 21 octobre 2003.
- Courleux, F. (2006), 'Impacts of 2003 CAP reform : what about the decoupling at the extensive margin and the capitalisation in the land rental price?', Presentation at the 93th EAAE Seminar in Prague, Czech Republic.
- Day, R. H. (1963), 'On aggregating linear programming models of production', *Journal of Farm Economics* **45**.
- De Cara, S., Houzé, M. and 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* .
- De Cara, S. and 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, INSEA Report SSP1-CT-2003-503614-Final, European Commission – INSEA, IIASA, Laxenburg, Austria.
- de Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B. and Perrier, A. (2004), ‘Coupling the soil-vegetation-atmosphere-transfer scheme orchidee to the agronomy model stics to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets.’, *Agronomie* **24**, 397–407.
- de Noblet, N., Prentice, C., Joussaume, S., Texier, D., Botta, A. and Haxeltine, A. (1996), ‘Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the last glaciation’, *Geophysical Research Letters* **23**(22), 3191–3194.
- Delucchi, M. A. and Lipman, T. (2003), Co<sub>2</sub> equivalency factors, Appendix to the Report ”A Lifecycle Emissions Model (LEM) : Lifecycle Emissions From Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials” UCD-ITS-RR-03-17D (Appendix D), University of California at Davis, Davis, CA, USA.
- Deschenes, O. and Greenstone, M. (2007), ‘The economic impact of climate change : Evidence from agricultural profits and random fluctuations in weather’, *American Economic Review* **97**(1).
- Durandeaun, S., Gabirelle, B., Godard, C., Jayet, P.-A. and Lebas, C. (2007), ‘Coupling biophysical and micro-economic models to assess nitrous oxide emissions from cropland and the effects of mitigation measures on greenhouse emissions’, *soumis à Climatic Change* .
- Easterling, W. E., Crosson, P. R., Rosenberg, N. J., McKenney, M. S., Katz, L. A. and Lemon, K. M. (1993), ‘Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region’, *Climatic change* **24**, 23–61.
- Eastman, J. L., Coughenour, M. B. and Pielke, R. A. S. (2001a), ‘Does grazing affect regional climate’, *J. Hydrometeor.* **2**, 243–253.
- Eastman, J. L., Coughenour, M. B. and Pielke, R. A. S. (2001b), ‘The effects of co2 and landscape change using a coupled plant and meteorological model’, *Global Change Biol.* **7**, 797–815.
- ECCP (2006), The second European Climate Change Programme final report - Working Group ECCP review - Topic Group Agriculture and Forestry, Technical report, Working Group on agriculture and forestry.
- EcoSecurities, Ltd (2004), Novagerar landfill gas to energy project, Project Design Document 0008, World Bank Carbon Finance Unit, Oxford, UK.
- FAO (2001), Good practice guidelines for agricultural leasing arrangements, *in* ‘FAO Land Tenure Studies 2’, Sustainable Development Department.
- FAO (2002), Land tenure and rural development, *in* ‘FAO Land Tenure Studies 3’, Sustainable Development Department.
- Feng, H., Zhao, J. and Kling, C. L. (2002), ‘The time path and implementation of carbon sequestration’, *American Journal of Agricultural Economics* **84**(1), 134–149.

- Floyd, J. E. (1965), 'The effects of farm price supports on the returns to land and labor in agriculture', *Journal of political economy* .
- Flynn, H. C., Smith, J., Smith, K. A., Wright, J., Smith, P. and Massheder, J. (2005), 'Climate- and crop-responsive emission factors significantly alter estimates of current and future nitrous oxide emissions from fertilizer use', *Global Change Biology* **11**, 1522–1536.
- Freibauer, A. (2003), 'Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture', *European Journal of Agronomy* **19**(2), 135–160.
- Friedlingstein, P., Dufresne, J.-L., Cox, P. M. and Rayner, P. (2003), 'How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?', *Tellus B* **55**, 692–700.
- Fuglestad, J., Berntsen, T., Godal, O., Sausen, R., Shine, K. and Skodvin, T. (2003), 'Metrics of climate change : Assessing radiative forcing and emission indices', *Climatic Change* **58**, 267–331.
- Gervois, S. (2004), Les zones agricoles en Europe : évaluation de leur rôle dans les bilans d'eau et de carbone ; sensibilité de ces bilans aux changements environnementaux sur le dernier siècle., PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- 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, Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Gohin, A. and Chantreuil, F. (1999), 'La programmation mathématique positive dans les modèles d'exploitation agricole', *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* **52**.
- Guesnerie, R. (2004), 'Calcul économique et développement durable', *Revue économique* pp. 363–382.
- Guéret, C., Prins, C. and Sevaux, M. (2000), *Programmation Linéaire*, Vol. ISBN 2-212-09202-4, Eyrolles.
- Hansen, J. W. (2002), 'Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges', *Agricultural Systems* **74**, 309–330.
- Harlan, J. (1987), *Les plantes cultivées et l'homme*, chapter 13. Exemples de dispersion de quelques plantes cultivées, pp. 293–306.
- Harrison, P. A., Porter, J. R. and Downing, T. E. (2000), 'Scaling-up the AFRCW-HEAT2 model to assess phenological development for wheat in Europe', *Agricultural and Forest Meteorology* **101**, 167–186.
- Hayhoe, K., Jain, A., Pitcher, H., MacCracken, C., Gibbs, M., Wuebbles, D., Harvey, R. and Kruger, D. (1999), 'Costs of multigreenhouse gas reduction targets for the USA', *Science* **286**, 905–906.
- Heady, E. D. and Candler, W. C. (1958), *Linear Programming Methods*, Iowa State Pr.
- Heady, E. O. (1983), 'Models for agricultural policy : The CARD example', *European Review of Agricultural Economics* **10**, 1–14.

- Hertel, T. (1997), *Global Trade Analysis : Modelling and Applications*, Cambridge University Press.
- Howit, R. (1995), 'Positive mathematical programming', *American Journal of Agricultural Economics* **77**, 329–342.
- INRA (2006), Sécheresse et agriculture : réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. rapport de l'expertise scientifique collective réalisée par l'inra à la demande du ministère de l'agriculture et de la pêche., Technical report, INRA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001), *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan.
- IPCC (2000), *Special Report on Emissions Scenarios 2000*, Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart, Cambridge, UK.
- IPCC (2001), *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Houghton, J.T. and Ding, Y. and Griggs, D.J. and Noguer, M. and van der Linden, P.J. and Dai, X. and Maskell, K. and Johnson, C.A., Cambridge, UK.
- IPCC (2007), Summary for policymakers, in 'Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability', Cambridge, UK.
- Janick, J. (2001), *Crop Science, progress and prospects*, J. Nösberger, chapter 18, New Crops for the 21st century, pp. 307–327.
- Jarrige, R., ed. (1988), *Alimentation des Bovins, Ovins et Caprins*, INRA.
- Johnson, S. (1986), 'Future challenges for modeling in agricultural economics', *American Journal of Agricultural Economics* **68**(2), 387–394.
- Judez, L., Ibanez, M., de Andres, R. and Urzainqui, E. (2006), Single farm payment, modulation and dual values of land, Technical report, GENEDEC project document.
- Judez, L., Ibanez, M., de Andres, R., Urzainqui, E. and Miguel, J. L. (2005), First results of PROMAPA.G. a comparison of two calibration methods., Technical report, GENEDEC project document.
- Kaiser, H. M., Riha, S. J., Wilks, D. S., Rossiter, D. G. and Sampath, R. (1993), 'A farm level analysis of economic and agronomic impacts of gradual climate warming', *American Journal of Agricultural Economics* **75**, 387–398.
- Kandlikar, M. (1996), 'Indices for comparing greenhouse gas emissions : integrating science and economics', *Energy Economics* **18**, 265–281.
- Kane, S., Reilly, J. and Tobey, J. (1992), 'An empirical study of the economic effects of climate change on world agriculture', *Climatic Change* **21**, 17–35.
- Kuepker, B. and Kleinhanss, W. (2006), 'Comparative assessment of national and alternative decoupling schemes in eu member states', *Prague EAAE Seminar* .

- Küpker, B. (2006), Quantitative assessment of the impacts of agricultural policy on the shadow prices for land and land trade, Technical report, GENEDEC project document.
- Labonne, J. and Jayet, P.-A. (2005), 'Impact of the Common Agricultural Policy via uncoupling', *Economie et Prévision* **167**.
- Lashof, D. A. and Ahuja, D. R. (1990), 'Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming', *Nature* **344**, 529–531.
- Liu, H., Li, X., Fischer, G. and Sun, L. (2004), 'Study on the impacts of climate change on China's agriculture', *Climatic Change* **65**(1-2), 125–148.
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J. and Ort, D. R. (2006), 'Food for thought : lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations', *Science* **312**, 1918–1921.
- Lussier, G. R., Baker, L. and Thomassin, P. J. (2001), 'Implicit prices for resource quality investments in Quebec's agricultural land market', *Canadian Journal of Regional Science* pp. 175–190.
- Manne, A. S. and Richels, R. G. (2001), 'An alternative approach to establishing trade-offs among greenhouse gases', *Nature* **410**, 675 – 677.
- McCarl, B. and Schneider, U. (2001), 'The cost of greenhouse gas mitigation in u.s. agriculture and forestry', *Science* **294**, 2481–2482.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D. and Shaw, D. (1994), 'The impact of global warming on agriculture : a Ricardian analysis', *The American Economic Review* pp. 753–771.
- Michaelowa, A. (2003), 'Limiting global cooling after global warming is over - differentiating between short- and long-lived greenhouse gases', *OPEC Review* **27**(4), 343–351.
- Moslener, U. and Requate, T. (2001), Optimal abatement strategies for various interacting greenhouse gases - is the global warming potential a useful indicator?, Discussion Paper 360, University of Heidelberg, Departement of Economics.
- Mèze, M. (2003), La capitalisation foncière des aides publiques à l'agriculture, Master's thesis, ENSA-Rennes.
- OCDE (2000), 'Decoupling : A conceptual framework', COM/AGR/APM/TD/WP(2000)14/FINAL.
- O'Neil, B. C. (2000), 'The jury is still out on global warming potentials. an editorial comment.', *Climatic Change* **44**(4), 427–443.
- O'Neil, B. C. (2003), 'Economics, natural science, and the costs of global warming potentials. an editorial comment.', *Climatic Change* **58**(3), 251–260.
- Paris, Q. and Raussler, G. C. (1973), 'Sufficient conditions for aggregation of linear programming models', *American Journal of Agricultural Economics* **65**, 659–666.

- Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A. and Fischer, G. (2004), 'Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios', *Global Environmental Change* **14**, 53–67.
- Perarnaud, V., Seguin, B., Malezieux, E., Deque, M. and Loustau, D. (2005), 'Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st century climate change', *Climatic Change* **70**, 319–340.
- Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., Niyogi, D. D. S. and Running, S. W. (2002), 'The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system : relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases.', *Philosophical Transactions of the Royal Society* **360**, 1705–1719.
- Pittock, A. and Jones, R. (2000), 'Adaptation to what and why?', *Environmental Monitoring and Assessment* **61**, 9–35.
- Ragot, L. and Schubert, K. (2006), The optimal carbon sequestration in agricultural soils : Does the dynamics of the physical process matter?, Pre- and Post-Print documents halshs-00115685-v1, HAL, CCSD, Paris, France.
- Reilly, J. M. and Richards, K. H. (1993), 'Climate change damage and the trace gas index issue', *Environmental and Resource Economics* **3**, 41–61.
- Reilly, J., Prinn, R., Harnisch, J., Fitzmaurice, J., Jacoby, H., Kicklighter, D., Melillo, J., Stone, P., Sokolov, A. and Wang, C. (1999), 'Multi-gas assessment of the Kyoto protocol', *Nature* **401**, 549–555.
- Reilly, J. and Schimmelpfening, D. (2000), 'Irreversibility, uncertainty, and learning : portraits of adaptation to long-term climate change', *Climatic Change* **45**, 253–278. version papier uniquement.
- Rial, J. A., Pielke SR., R. A., Beniston, M., Claussen, M., Canadell, J., Cox, P., Held, H., de Noblet-Ducoudré, N., Prinn, R., Reynolds, J. F. and Salas, J. D. (2004), 'Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the earth's climate system', *Climatic Change* **65**, 11–28.
- Ricardo, D. (1817), *on the principles of political economy and taxation*, Elekic Book Company.
- Rosenzweig, C. and Parry, M. L. (1994), 'Potential impact of climate change on world food supply', *Nature* **367**, 133–138.
- Rosenzweig, C., Tubiello, F. N., Goldberg, R., Mills, E. and Bloomfield, J. (2002), 'Increased crop damage in the us from excess precipitation under climate change', *Global Environmental change* **12**, 197–202. extreme events.
- Ruget, F., Bethenod, O. and Combe, L. (1996), 'Repercussions of increased atmospheric co<sub>2</sub> on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels.', *Maydica* **41**, 181–191.

- Salinger, M., Stigter, C. and Das, H. (2000), 'Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change', *Agricultural and Forrest Meteorology* **103**, 167–184.
- Sarofim, M. C., Forest, C. E., Reiner, D. M. and Reilly, J. M. (2005), 'Stabilization and global climate policy', *Global and Planetary Change* . in press.
- Schubert, K. (1993), 'Les modèles d'équilibre général calculable : une revue de la littérature', *Revue d'économie politique* **103(6)**, 777–825.
- Shine, K. P., Fuglestvedt, J. S., Hailemariam, K. and Stuber, N. (2005), 'Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases', *Climatic Change* **68(3)**, 281–302.
- Société des Agriculteurs de France (2006), Les marchés du carbone : Quelle place pour l'agriculture française ?, Rapport, SAF–Caisse des Dépôts–ADEME, Paris, France.
- Soussana, J., Teyssonneyre, F., Picon-Cochard, C., Casella, E., Besle, J., Lherm, M. and Loiseau, P. (2002), 'Impacts des changements climatiques et atmosphériques sur la prairie et sa production.', *Fourrages* **169**, 3–24.
- Stern, N. (2006), *Stern Review on the Economics of Climate Change*, Vol. ISBN number : 0-521-70080-9, Cambridge University Press.
- Stockle, C., Williams, J., Rosenberg, C. and C.A., J. (1992), 'A method for estimating direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield crops.', *Agricultural Systems* **38**.
- Tangerman, S. (2006), 'Decoupling and the future of agricultural policies', Presentation at the 93th EAAE Seminar in Prague, Czech Republic. OECD, Directorate for Food, Agriculture and Fisheries.
- Tirel, J.-C. (1969), 'Modèles de programmation représentatifs du fonctionnement du secteur agricole', *Revue d'économie politique* pp. 231–287.
- Tol, R. S. J., Heintz, R. J. and Lammers, P. E. M. (2003), 'Methane emission reduction : An application of FUND', *Climatic Change* **57(1-2)**, 71–98.
- Trnka, M., Dubrovsky, M. and Zalud, Z. (2004), 'Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic', *Climatic Change* **64**, 227–255.
- Tubiello, F. and Ewert, F. (2002), 'Simulating the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops : approaches and applications for climate change', *European Journal of Agronomy* **18**, 57–74.