



HAL
open science

Analyse multicritère des politiques publiques environnementales dans l'Union Européenne

Ancuta Isbasoiu

► **To cite this version:**

Ancuta Isbasoiu. Analyse multicritère des politiques publiques environnementales dans l'Union Européenne. Economies et finances. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLA019 . tel-02463999

HAL Id: tel-02463999

<https://theses.hal.science/tel-02463999v1>

Submitted on 2 Feb 2020

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

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

Analyse multicritère des politiques publiques environnementales dans l'Union Européenne

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à AgroParisTech
(Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement)

Ecole doctorale n°581 Agriculture Alimentation Biologie Environnement Santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Sciences économiques

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 1 juillet 2019, par

ANCUTA ISBASOIU

Composition du Jury :

Mme Sandrine Mathy Directrice de Recherche, CNRS	Présidente
Mme Valérie Mignon Professeure, Université Paris Nanterre	Rapporteur
M. Valentin Bellassen Chargé de Recherche, INRA (CESAER)	Rapporteur
M. Lionel Ragot Professeur, Université Paris Nanterre	Examineur
Mme Laure Bamière Ingénieure de Recherche, INRA (Économie publique)	Examineur
M. Pierre-Alain Jayet Directeur de Recherche, INRA (Économie publique)	Directeur de thèse

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Pierre-Alain Jayet, mon directeur de thèse, qui m'a guidé tout au long de ces trois années de thèse dans l'UMR Économie Publique. Toujours à l'écoute, avec ses qualités pédagogiques et scientifiques, ses conseils dans le cadre de nos réunions ont été d'une grande aide et très constructifs.

Je remercie énormément à Stéphane De Cara, pour sa collaboration pour les articles, sa disponibilité, ses indications et les nombreuses discussions qui m'ont été d'une aide précieuse pour la réalisation de ma thèse, ainsi que pour l'accueil au sein de son unité.

Je souhaite remercier de tout cœur Valérie Mignon, Valentin Bellanssen, Sandrine Mathy, Lionel Ragot et Laure Bamière pour avoir accepté de faire partie de mon jury et m'avoir fait l'honneur de rapporter, d'examiner et d'évaluer mon travail de thèse.

Je suis très reconnaissante à Alexandre Pery et à l'École Doctorale ABIÉS pour m'avoir acceptée dans le cadre de son programme.

Je remercie également à Frédéric Lantz, Thierry Brunelle et Nina Graveline pour leurs précieux conseils lors des réunions du comité de suivi de thèse.

Je remercie à tous les collègues de l'unité qui forment un collectif extraordinaire, pour les conditions et l'environnement de travail exceptionnels dont j'ai pu bénéficier.

Enfin, je tiens également à remercier ma famille, en particulier mes parents et mon frère pour leur soutien permanent.

Cette thèse est également redevable au DIM ASTREA, au projet européen Food-Secure, ainsi qu'à l'Institut de Convergence CLAND, pour le financement fourni pendant ces années de thèse.

Table des matières

Remerciements	2
Introduction générale	6
1 Revue sur la coordination des politiques publiques dans l'Union Européenne	13
1.1 Les politiques publiques européennes en référence au secteur agricole . . .	13
1.1.1 Politique environnementale de l'UE	15
1.1.2 Politique agricole commune (PAC)	29
1.1.3 Politique de sécurité alimentaire de l'UE - sécurisation du niveau de la production agricole	47
1.1.4 Politique climatique de l'UE	49
1.1.5 Politique énergétique de l'UE - promotion de l'utilisation des énergies renouvelables	55
1.2 L'interdépendance entre le changement climatique et l'agriculture	58
1.2.1 La réalité du changement climatique	58
1.2.2 Impacts de l'agriculture européenne sur le changement climatique	59
1.2.3 Les impacts du changement climatique sur l'agriculture de l'UE .	64
1.3 Mise en œuvre de la coordination des politiques publiques dans l'UE . . .	67
1.3.1 Lien entre la Politique agricole commune et l'environnement . . .	67
1.3.1.1 Influence des instruments de la PAC sur l'environnement	67
1.3.1.2 Impacts des mesures de la politique environnementale sur l'agriculture	75
1.3.2 L'intérêt de la coordination des politiques publiques à des objec- tifs en matière de climat, agriculture et environnement	76
2 Données et modèles	80
2.1 Modélisation de l'agriculture européenne	80
2.1.1 Les données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)	81

2.1.2	Le modèle agro-économique européen AROPAj	84
2.2	Analyse critique du modèle AROPAj par rapport à d'autres modèles utilisés dans le secteur agricole	89
2.2.1	Bref aperçu des autres principaux modèles dans la communauté de modélisation agricole	89
2.2.2	Comparaison entre AROPAj et les modèles économiques agricoles : CAPRI, AGLINK-COSIMO, GLOBIOM et AGMEMOD	91
2.3	Cadre de modélisation	106
2.3.1	Mise à jour du bloc effet de serre dans AROPAj	106
2.3.2	La question de la composition et des prix des engrais	116
2.3.3	Le mode d'implémentation de la Politique Agricole Commune dans AROPAj	119
3	Spatial and temporal variability of marginal abatement costs of agricultural greenhouse gas emissions in the European Union	120
3.1	Introduction	121
3.2	Model and data	125
3.3	Spatial and temporal variability of base emissions	129
3.4	Spatial and temporal variability of marginal abatement costs	134
3.5	Reduced forms of abatement supply curves	138
3.6	Concluding remarks	142
4	Increasing food production and mitigating agricultural greenhouse gas emissions in the European Union : a mathematical programming approach	143
4.1	Introduction	145
4.2	Methodological elements	149
4.2.1	General framework - AROPAj model	149
4.2.2	Implementation of carbon price - a primal approach	151
4.2.3	Implementation of food calorie threshold - a dual approach	152
4.3	Results	152
4.3.1	Carbon pricing impact	152
4.3.2	Food calorie threshold impact	160
4.4	Discussion and conclusion	164

5	Interest in promoting a 2-price system regarding efficient abatement of CH₄ and N₂O emissions sourced by agriculture in the European Union	167
5.1	Introduction	168
5.2	Non CO ₂ GHG at stake	170
5.3	Method - Model and simulations	173
5.3.1	The model	173
5.3.2	Methodological elements	173
5.3.3	Model implementation	175
5.4	Context on GWP and the consideration of two time horizons	176
5.5	Analysis of results	178
5.6	Concluding remarks	180
5.7	Appendix	181
6	Conclusion générale	184

Introduction générale

L'agenda de l'Union Européenne (UE) est guidé par un ensemble de politiques ambitieuses visant à lutter contre le changement climatique, les institutions européennes étant obligées de prendre en compte l'environnement dans toutes les politiques qu'elles promeuvent. Dans le champ des problèmes environnementaux, l'agriculture se trouve au carrefour d'enjeux collectifs importants tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), plus généralement le changement climatique, et plus généralement encore toutes les externalités environnementales, négatives ou positives, associées à ce secteur. Toutes ces préoccupations font l'autorité publique à s'interroger sur leurs impacts. Le changement climatique est un défi à multiples facettes pour les décideurs des politiques publiques, qui rend complexes les politiques visant à réduire les émissions de GES permettant d'atteindre les objectifs climatiques, en respectant toutes les normes européennes en matière d'environnement. Cette thèse vise particulièrement à enrichir l'analyse économique sur ces questions sous un angle quantitatif.

L'élaboration de politiques publiques européennes est très complexe car elle se trouve confrontée à la tradition de chaque État membre de l'Union. Leur création doit tenir compte à la fois des aspects généraux, ainsi qu'imprévus, afin de ne pas conduire à des conclusions erronées. En outre, le processus d'élaboration doit prendre en considération le fait que l'UE est une unité politique en construction et que les politiques publiques européennes se trouvent dans un processus continu d'évolution.

Le processus d'élaboration de ces politiques publiques est divisé en trois étapes fondamentales, à savoir : les propositions de politique, la prise de décision et la mise en œuvre de la politique. Tenant compte des différents types d'activités impliquant différents acteurs, ces différentes étapes s'entrecroisent ce qui les rend souvent plus complexes, leur donnant peu de portée ou les rendant difficilement applicables. Un exemple dans ce sens est représenté par le réseau Natura 2000, dont l'objectif est d'assurer la protection et la survie à long terme des espèces et des habitats les plus menacés de l'Union Européenne à travers la Directive Oiseaux et la Directive Habitats. Étant donné que les sites faisant

partie de ce réseau sont sélectionnés et proposés par les États membres, puis analysés et adoptés par la Commission Européenne, diverses difficultés de nature juridique ou administrative sont survenues dans certains États membres entraînant parfois le retard des propositions.

Les politiques publiques sont nées des politiques locales, politiques régionales, politiques des différents États, politiques des groupes d'États voisins, politiques des organisations mondiales (Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce (GATT), Organisation mondiale du commerce (OMC), etc.). Cependant, le lieu légitime de la décision politique reste l'État et la souveraineté nationale a un rôle important à jouer dans la prise de décisions au niveau européen, afin que les intérêts de chaque État soient respectés. Toutefois, dans les problèmes d'intérêt européen, il convient de garder que la suprématie des États membres individuels ne freine pas la prise de mesures politiques au niveau communautaire. Un autre aspect essentiel est représenté par la nécessité d'assurer une bonne coordination des politiques communautaires. Toutes les politiques qui s'influencent réciproquement devraient être conçues de manière à produire des synergies et des bénéfices connexes.

Le point de départ de cette thèse réside dans le fait que l'agriculture est un secteur fortement affecté par le respect de contraintes environnementales et par les décisions de politique publique de différente nature susceptibles d'affecter fortement l'environnement. Étant donné que l'agriculture représente une activité économique essentielle, de nombreux modèles économiques ont été développés au cours du temps pour analyser le secteur agricole européen. Leur utilisation suscite un réel intérêt pour les analystes économiques et les décideurs.

L'agriculture contribue aux changements globaux par ses impacts sur l'environnement, par son poids économique direct et indirect, par le nombre et la diversité des acteurs économiques du secteur, par tous ces effets externes et la nécessité de les réguler. L'agriculture est également l'objet d'une politique publique spécifique (la Politique Agricole Commune) et la cible de politiques environnementales (Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, Directive 91/676/CEE sur les nitrates, Directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, Plan Climat). En retour, l'agriculture est fortement affectée par ces changements globaux, en particulier par le changement climatique et par les politiques publiques qui font de l'agriculture un secteur particulièrement régulé. La complexité des phénomènes physiques et économiques en cause rend difficile l'analyse économique et l'évaluation des impacts de ces changements.

L'objectif de ma thèse consiste à évaluer les impacts des politiques publiques européennes (environnementales, agricoles, climatiques, énergétiques, de sécurisation du niveau de la production agricole) sur l'agriculture et l'environnement, afin de mesurer leurs effets croisés et d'évaluer l'intérêt d'une meilleure coordination de ces politiques. Plus spécifiquement, la partie empirique de la thèse est construite sous la forme de trois articles scientifiques, qui portent sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'agriculture (Chapitres 3 et 5) ou la compatibilité existante entre la production agricole et les impacts sur l'environnement (Chapitre 4).

La partie théorique de ce travail ne se concentre pas sur la théorie de la coordination des politiques publiques, mais plutôt sur leur incidence sur l'agriculture et sur la manière dont les différents modèles économiques créés et développés au fil du temps pour analyser le secteur agricole, sont utilisés dans la littérature et dans la prise des décisions publiques. Ces modèles de simulation économique sont caractérisés par différentes méthodologies de modélisation (modèles d'équilibre partiel ou général, modèles d'offre, etc.) et peuvent être de différents types (macro-économétriques ou basés sur la programmation mathématique). Cette thèse s'appuie sur un modèle de programmation mathématique linéaire qui simule l'offre agricole européenne (AROPAj), présentant de nombreux avantages par rapport aux autres types de modèles, par sa capacité de fournir d'estimations plus précises, de quantifier d'abord les impacts dans différents contextes politiques, tout en bénéficiant de l'inclusion dans le modèle de la quasi-totalité des grandes cultures, les principales productions animales et la couverture de 80 à 85% de la surface agricole utilisée (SAU) selon les pays. La thèse s'inscrit à l'intersection de problématiques importantes recentrée sur la réduction des émissions de GES et le niveau de calories pour l'alimentation humaine.

* * *

Afin de répondre aux objectifs environnementaux et climatiques de l'UE, l'analyse de la coordination entre la PAC et les autres politiques est essentielle, les agriculteurs étant les principaux agents économiques contribuant à leur réalisation. Par exemple, la manière dont les paiements directs sont mis en œuvre a une influence significative sur les décisions et choix des agriculteurs et le schéma de production envisagée, tout en offrant l'assurance qu'une grande partie de la superficie cultivée activement dans l'UE soit gérée de manière à ne pas affecter négativement l'environnement. À cet égard, l'introduction en 2013 et l'implémentation depuis 2015 de la composante verte dans le système de paiements directs de la PAC est extrêmement ambitieuse. Mais il faut tenir compte que toutes ces choses se produisent dans un contexte dans lequel le changement climatique est devenu une priorité, pouvant sérieusement affecter la production agricole européenne et

mondiale à moyen et long terme, sans oublier les coûts élevés auxquels le secteur agricole sera confronté.

Cependant, les émissions non-CO₂ provenant de l'agriculture sont exclues du champ d'application des principaux instruments de politique climatique actuellement en place, malgré leur poids dans les émissions totales au niveau européen, les sources agricoles des émissions de gaz à effet de serre représentant une part substantielle des émissions totales de GES dans l'UE. En 2016, le secteur agricole de l'UE28 a généré environ 431 millions de tonnes de CO₂, ce qui représente environ 10% des émissions totales de gaz à effet de serre de l'UE, faisant de l'agriculture le deuxième secteur émetteur de GES, après l'énergie (European Environment Agency, 2018). Une explication pourrait être le fait que l'inclusion du secteur agricole dans le cadre des politiques de réduction des émissions de GES n'est pas facile à réaliser car les émissions de GES agricoles résultent d'un grand nombre de fermes hétérogènes (des millions d'agriculteurs dans l'UE avec des coûts de réduction et des niveaux d'émissions très hétérogènes), ce qui rend la surveillance coûteuse (De Cara & Jayet, 2018).

Dans la littérature, il existe une contradiction sur ce sujet. Certains auteurs (Ancev, 2011) considèrent que peu de choses peuvent ou doivent être faites en raison de différents facteurs qui peuvent survenir (par exemple, des coûts de transaction, le nombre d'agents, l'incertitude qui caractérise les coûts marginaux d'abattement). D'autres auteurs (Pellerin et al., 2017) affirment que les mesures d'atténuation sont très peu coûteuses dans le secteur agricole et prétendent qu'il est possible d'atteindre beaucoup à des prix bas, soulignant dans le même temps la nécessité d'atténuer les émissions agricoles (Frank et al., 2018a). Et pourtant, l'agriculture est exclue des politiques climatiques. En 2005 par exemple, pour promouvoir la réduction des émissions de manière efficace sur le plan économique, a été lancé le Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE), considéré comme le principal instrument de régulation des émissions. Les émissions agricoles ne sont pas prises en compte dans le marché SEQE, mais aussi dans le cadre des politiques de taxe carbone mises en place dans un nombre croissant de pays européens, principalement en raison de la difficulté d'appliquer des quotas d'émission ou des taxes sur le carbone dans le secteur agricole.

La communauté internationale mobilise les scientifiques pour que soient développés des indicateurs fiables des émissions de GES et étudiées des mesures efficaces pour les réduire. De nombreuses études dans la littérature ont apparu en raison de l'absence d'instruments politiques pour stimuler les réductions d'émissions dans le secteur agricole. La plupart de ces études utilisent des courbes des coûts marginaux d'abattement, cependant la variabilité des coûts et du potentiel de réduction, qui tient compte de l'évolution du

contexte économique, a été peu étudiée jusqu'à présent.

* * *

La première problématique abordée dans cette thèse est la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Tout d'abord, nous évaluons la contribution de l'agriculture à l'atténuation des émissions de GES dans l'UE. L'une des premières questions auxquelles cette thèse vise à répondre est de combien peut-on réduire les émissions de GES agricoles pour un prix donné. Les courbes de coûts marginaux d'abattement sont essentielles pour évaluer le potentiel d'atténuation associé à un coût social donné du carbone, ou le prix des émissions associé à un objectif d'atténuation donné. En tenant compte de la dimension multi-échelle du problème des émissions de GES, du niveau de l'agent économique aux niveaux agrégés et en partant de l'idée que les coûts marginaux de réduction varient selon les sources et les types d'agriculture (De Cara et al., 2005), cette thèse offre une analyse détaillée sur la variation des courbes de coûts marginaux d'abattement dans le temps et dans l'espace. Nous estimons également un ensemble de formes fonctionnelles réduites qui résument au niveau régional les courbes de coûts marginaux d'abattement.

En utilisant le modèle AROPAj, ce travail présente la contribution d'une analyse basée sur différents niveaux d'agrégation spatiale (fermes représentatives, régions, pays, UE), des années très contrastées en termes de prix agricoles, prix des facteurs et rendements agricoles sur une période courte (2007-2012), montrant inter alia que l'agriculture peut offrir une atténuation substantielle et qu'elle doit faire partie intégrante de toute stratégie d'atténuation des émissions anthropiques de GES.

La deuxième problématique abordée dans cette thèse fait référence à deux objectifs de premier rang dans l'agenda des politiques communautaires de la Commission Européenne. La sphère d'analyse de la thèse est donc étendue au problème important d'une production de calories alimentaires compatibles avec la protection de l'environnement (United Nations, 2015). Le périmètre d'analyse de cette problématique restera l'Union Européenne. Nous analysons l'arbitrage entre la production agricole et les émissions de gaz à effet de serre, par l'introduction d'une approche primale (via un prix du carbone) et d'une approche duale (via un objectif calorique). Compte tenu de la diversité des systèmes agricoles dans l'UE, nous enrichissons l'analyse en explorant la distribution spatiale des surfaces cultivées avec différentes cultures, lors de l'inclusion de ces deux approches.

La troisième question examinée dans cette thèse revient à la problématique de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais l'analyse sera orientée d'une autre perspective intéressante et novatrice, consistant à dissocier les prix des deux principaux gaz non-CO₂ émis directement par le secteur agricole (CH₄ et N₂O). Selon European

[Environment Agency \(2018\)](#), les émissions de méthane ont la plus grande proportion (55.1%) dans le cadre des émissions totales provenant de l'agriculture, étant suivies par les émissions d'oxyde d'azote (42.4%) et les émissions de dioxyde de carbone (2.5%). Nous estimons les taux d'abattement des émissions de CH₄ et N₂O à travers de formes fonctionnelles qui présentent l'avantage de nous permettre à tracer facilement les courbes de coûts marginaux, en appliquant simultanément des taxes sur les deux gaz. L'analyse est basée au début sur un horizon de 100 ans, représentant l'horizon de référence pour mesurer l'équivalence entre les gaz, puis nous ouvrons une nouvelle piste d'analyse en utilisant un horizon de 20 ans, étant donnée "l'urgence climatique" et la variation significative du PRG (principalement pour le méthane) entre les deux horizons.

* * *

Cette thèse est organisée en six chapitres.

Dans le chapitre 1 nous mettons en perspective l'état de l'art sur la coordination des politiques publiques dans l'Union Européenne et leurs interactions. Ce premier chapitre est composé de 3 grands sous-chapitres, contenant à la fois une étude sur les politiques publiques, ainsi que la façon avec laquelle les modèles agricoles existantes sont utilisés dans le cadre de ces politiques pour analyser leurs effets sur le secteur agricole européen. Dans le premier sous-chapitre, sont mises en relief les caractéristiques des politiques publiques européennes relatives à l'agriculture, à l'environnement et au changement climatique, en soulignant leurs impacts. Ainsi, les cinq politiques communautaires étudiées sont la politique environnementale, la politique agricole commune, la politique de sécurité alimentaire en ce qui concerne la sécurisation du niveau de production agricole, la politique climatique et la politique énergétique. Le deuxième sous-chapitre nous introduit dans la sphère du changement climatique en tant que défi multiple pour les responsables des politiques publiques, mettant en lumière le lien étroit qui existe entre le changement climatique et l'agriculture, qui s'influencent mutuellement. Dans le troisième sous-chapitre, on traite la mise en œuvre de la coordination des politiques publiques, en se concentrant d'abord sur l'influence des instruments de la PAC sur l'environnement, puis sur les impacts des mesures environnementales sur la PAC, en soulignant ensuite l'intérêt à croiser les politiques relatives au climat, à l'agriculture et à l'environnement.

Le chapitre 2 présente le modèle, les données et les outils de modélisation utilisés. On met un accent particulier sur l'analyse critique du modèle AROPAj par rapport aux autres modèles utilisés dans le secteur agricole. Les aspects techniques concernant la mise à jour des paramètres du GIEC et de l'entier bloc effet de serre dans le modèle, ainsi que la nouvelle approche prise en compte dans le calcul du prix des engrais, seront également

mis en évidence.

Le chapitre 3 est consacré à l'analyse de la réduction des émissions de gaz à effet de serre agricoles dans l'UE. Nous évaluons comment l'agriculture européenne peut contribuer de manière rentable à la réduction des émissions de GES et comment cette contribution varie dans le temps et dans l'espace. Des courbes de coûts marginaux d'abattement sont ainsi analysées à différentes échelles et dans des contextes économiques très contrastées (années 2007-2012) avec des incidences sur les émissions initiales et le coût d'opportunité pour réduire ces émissions. En se basant sur le modèle d'offre agricole AROPAj, nous montrons que pour un prix du carbone donné, le taux d'abattement agrégé au niveau européen varie fortement dans le temps. Nous constatons aussi que les taux d'abattement régionaux atteints à des prix du carbone donnés, sont caractérisés par une forte variabilité spatiale. Les résultats de ce chapitre mettent en relief quelques messages clés : (i) L'agriculture peut offrir une atténuation substantielle des émissions de GES ; (ii) Les coûts et le potentiel d'atténuation des GES varient dans le temps et (iii) Les coûts et le potentiel d'atténuation des GES varient dans l'espace.

L'arbitrage entre la réduction des émissions de GES et l'augmentation de la production agricole pour l'alimentation humaine, représentera le sujet du chapitre 4. Différentes approches méthodologiques, comme l'approche primale par le prix du carbone ou l'approche duale par un seuil de production agricole, sont utilisées. Ce chapitre mettra en évidence qu'on peut réduire les émissions de GES et modifier l'offre de l'agriculture tout en augmentant la quantité en calories alimentaires.

Le chapitre 5 portera sur la différenciation des 2 GES d'origine agricole (N_2O , CH_4) par les « prix », une question essentielle dans la perspective de l'efficacité économique des politiques de réduction des émissions de GES. Nous montrons notamment qu'un système de prix différenciés des 2 gaz (N_2O and CH_4) permet de mieux adapter la politique de régulation climatique en fonction de l'horizon de temps sur lequel on se projette. Une politique climatique efficace devrait différencier les gaz à effet de serre en modulant leurs prix en équivalent CO_2 .

Le chapitre 6 de conclusion générale, contiendra un bilan des principaux résultats de la thèse.

CHAPITRE 1

Revue sur la coordination des politiques publiques dans l'Union Européenne

1.1 Les politiques publiques européennes en référence au secteur agricole

Dans le processus de prise de décision au niveau de l'Union Européenne, toutes les institutions sont impliquées d'une manière ou l'autre, jouant un rôle bien pré-établi. Dans un premier temps, les décisions de politique publique sont prises par les chefs d'États et de gouvernements dans le cadre du Conseil Européen, puis la Commission Européenne fait les propositions pour de nouvelles lois, qui sont ensuite examinées par le Parlement et adoptées conjointement avec le Conseil des Ministres. C'est la Commission Européenne qui vérifie si les décisions ont été respectées par tous les États membres, dans le cas contraire, la Cour Européenne de Justice intervenant pour résoudre les désaccords qui peuvent survenir.

Un facteur essentiel dans les propositions de politiques publiques et de normes par la Commission Européenne est représenté par les *Analyses des Impacts* qui permettent l'évaluation des conséquences économiques, environnementales et sociales qui peuvent découler de ces politiques en mettant en évidence les avantages et les désavantages des différentes décisions politiques.

Les résultats des études d'impact sont ensuite rassemblés dans un rapport qui sera examiné par le Comité d'examen de la réglementation, afin d'être approuvés. Ces rapports, ainsi que les actes adoptés par la Commission, sont soumis pour analyse au Parlement Européen et au Conseil en vue de prendre la décision relative à la proposition législative.

Pour que les politiques puissent être correctement élaborées dans le cadre du processus décisionnel, deux principes doivent être respectés : (i) le principe de subsidiarité, qui consiste à éviter l'intervention de l'UE dans les cas où les politiques peuvent être décidées au niveau national par les États membres, (ii) le principe de proportionnalité, qui suppose que l'UE n'agit pas ou ne s'implique pas plus que nécessaire.

Afin de s'assurer que les lois proposées sont les plus efficaces et les plus appropriées, la Commission Européenne recourt à la consultation des différents acteurs et parties prenantes, existant ainsi une collaboration réciproque afin d'atteindre les objectifs des deux côtés. De cette manière, des groupes d'experts, des autorités locales, des organisations non gouvernementales, des acteurs représentant les intérêts de la société civile ou des entreprises peuvent être consultés pour intervenir. Principalement dans les secteurs de l'environnement et de l'agriculture, la consolidation et l'amélioration de l'interface entre la politique et la science sont nécessaires, ainsi qu'une utilisation plus efficace des institutions, des agences et des organisations qui s'occupent du traitement des connaissances scientifiques pour les politiques publiques.

Dans le même temps, la conception de politiques communautaires dans le domaine agricole diffère de l'élaboration des autres politiques, parce que la hiérarchie des facteurs en cause (la diversité des acteurs, le comportement des gouvernements, la perception de la relation entre les intérêts économiques et les autres intérêts qui doivent être satisfaites, etc.) peut changer dans le temps. Les politiques ayant un impact sur l'agriculture présentent une dimension complexe, avec de nombreuses interférences avec l'environnement, en particulier les émissions atmosphériques et donc le changement climatique, la quantité et la qualité de l'eau, la biodiversité, le niveau de production agricole et implicitement la sécurité alimentaire. L'analyse du secteur agricole nécessite une connaissance approfondie des systèmes agricoles, ce qui a conduit à l'émergence de nombreuses études scientifiques et la création de différents modèles économiques afin d'étudier l'agriculture européenne et la manière dont les politiques communautaires l'influencent.

Dans cette thèse, on s'intéresse à l'Union Européenne et aux politiques européennes. Dans cet esprit, on fait un focus sur la politique environnementale, la Politique Agricole Commune, la politique climatique, la politique énergétique et la politique de sé-

curité alimentaire. Toutes ces politiques interagissent, étant étroitement liées les uns aux autres. Nous commençons par présenter chacune de ces politiques afin de définir un cadre qui nous informe sur leurs caractéristiques et leurs impacts sur l'agriculture et l'environnement, ce qui nous permet d'analyser ultérieurement les problématiques envisagées.

1.1.1 Politique environnementale de l'UE

Bref historique de la politique environnementale communautaire

Le terme "environnement" est difficile à synthétiser dans une définition générale, étant plutôt décrit comme une notion générale, une *notion caméléon* (Prieur, 1991). Il existe une multitude de définitions attachées à la notion d'environnement, mais aucune définition n'a été trouvée jusqu'à présent qui puisse être acceptée à l'unanimité dans les environnements scientifiques internationaux. Dans la [Déclaration de Stockholm \(1972\)](#), la notion d'environnement a été considérée comme "*un ensemble des ressources naturelles du globe, y compris l'air, l'eau, la terre, la flore et la faune*", l'accent étant mis sur les écosystèmes naturels préservés pour les générations actuelles et futures. Une définition juridique de l'environnement a été présentée dans la Convention de Lugano du 21 juin 1993 par le [Council of Europe \(1993\)](#), à savoir : "*L'environnement comprend les ressources naturelles abiotiques et biotiques, telles que l'air, l'eau, le sol, la faune et la flore, et l'interaction entre les mêmes facteurs ; les biens qui composent l'héritage culturel ; et les aspects caractéristiques du paysage.*".

Les premières préoccupations concernant la création d'une politique environnementale pour la Communauté Européenne ont eu lieu en 1972, à la suite de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement, qui s'est tenue à Stockholm la même année. Ce fut le début de la politique environnementale de l'Union Européenne actuelle. En 1972, lors de la réunion du Conseil Européen à Paris, les chefs d'État et de gouvernement des pays membres ont demandé à la Commission d'élaborer un programme environnemental et de veiller à sa mise en œuvre. En 1973, a été créée la Direction générale de la Commission Européenne pour l'environnement (DG Environnement). La même année, a été créé le premier Programme d'action pour l'environnement (PAE) pour la période 1973-1977, programme qui contenait une réflexion stratégique à moyen terme sur la protection de l'eau et de l'air.

La protection de l'environnement a reçu le statut formel de politique de l'Union Européenne avec la signature de l'Acte Unique Européen de 1986. [Kelemen \(2010\)](#) analyse le parcours et les efforts de l'Union Européenne dans la "mondialisation" de la poli-

tique environnementale de l'UE. Dans les années '90, le dynamisme du pouvoir décisionnel et de l'élaboration des politiques de l'UE, ainsi que l'importance croissante des intérêts environnementaux en Europe ont amené l'UE à adopter la législation environnementale la plus ambitieuse du monde et à devenir un leader mondial des politiques environnementales internationales. Ainsi, la politique de l'Union dans le domaine de l'environnement a enregistré un développement fondamental après les années '90, en introduisant la responsabilité financière pour lutter contre les dommages causés à l'environnement. Mais la situation était différente au début des années 1970, lorsque les États-Unis occupaient la place de leader sur la scène internationale. Les raisons pour lesquelles l'Union Européenne a été très impliquée dans la diffusion de ses normes environnementales, sont diverses. Selon [Scheipers & Sicurelli \(2007\)](#), l'Union Européenne s'est concentrée sur des problèmes environnementaux tels que le changement climatique dans la tentative de créer une identité propre et unique par rapport à celle des États-Unis. [Manners \(2002\)](#) considère que la promotion des normes par l'UE, telles que le développement durable, a eu pour but sa légitimité auprès de citoyens européens sceptiques. La politique de l'UE en matière de protection de l'environnement a été concrétisée avec les traités de Maastricht, en 1993 et d'Amsterdam, en 1999, lors de l'établissement des bases juridiques. À cette époque, les politiques environnementales étaient étroitement liées à la gestion des déchets, au contrôle de la pollution, à la réduction de la perte d'habitats naturels et la réduction des impacts des catastrophes naturelles ([Connelly et al., 2012](#)).

Objectifs et principes sur lesquels est basée la politique environnementale

Depuis 2012, la base juridique de la protection de l'environnement pour la politique de l'UE est représentée par les articles 191 et 192 du Traité sur le fonctionnement de l'Union Européenne. Ces articles définissent les objectifs de la politique de l'Union dans le domaine de l'environnement, ainsi que les procédures législatives, permettant aux pays membres d'adopter des normes plus strictes que les normes communautaires. Les objectifs tel que présentées dans l'article 191 ([Official Journal of the European Union, 2012](#)) sont :

- *la préservation, la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement,*
- *la protection de la santé des personnes,*
- *l'utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles,*
- *la promotion, sur le plan international, de mesures destinées à faire face aux problèmes régionaux ou planétaires de l'environnement, et en particulier la lutte contre le changement climatique.*

L'Union Européenne prend en compte plusieurs éléments dans la conception de la politique environnementale, parmi lesquels, les conditions de l'environnement qui ca-

ractérisent les diverses régions de l'Union, le développement équilibré de ces régions, le développement économique et social de l'UE en entier, la disponibilité des données scientifiques et techniques.

La politique environnementale de l'UE repose sur un certain nombre de principes qui la définissent :

- **Le principe d'intégration** suppose¹ que la définition et la mise en œuvre des actions et politiques de l'Union doit intégrer les exigences visant la protection de l'environnement.
- **Le principe "pollueur-payeur"** a été adopté pour la première fois en 1972 par l'OCDE, apparaissant ensuite dans l'Acte Unique Européen signé en 1986 ([Journal officiel des Communautés européennes, 1987](#); [OECD, 2018](#)). Ce principe exige que la personne qui a causé la pollution de l'environnement assume les coûts de réparation des dommages causés, coûts fixés par les autorités publiques. La directive 2004/35/CE ([Journal officiel de l'Union européenne, 2004](#)) sur la responsabilité environnementale vise à la fois la prévention et le traitement des dommages environnementaux.
- **Le principe de proximité** a comme objectif d'accroître la responsabilité des collectivités locales concernant la production de déchets.
- **Le principe de haut niveau de protection** est prévu dans le paragraphe 2 de l'article 191 du Traité sur le fonctionnement de l'Union Européenne ([Official Journal of the European Union, 2012](#)) : "*La politique de l'Union dans le domaine de l'environnement vise un niveau de protection élevé, en tenant compte de la diversité des situations dans les différentes régions de l'Union...*"
- **Le principe de précaution** consiste à prendre des mesures préventives si une activité est susceptible de menacer la santé humaine ou l'environnement.
- **Le principe de l'action préventive** suppose la prise des mesures préventives pour éviter d'autres recours (article 6 de la [Déclaration de Stockholm \(1972\)](#)).

Outils d'intervention de l'UE dans le cadre de la politique environnementale

Au fil du temps, l'UE a développé sept programmes d'action pour l'environnement afin de maximiser les avantages que la politique de l'environnement peut apporter à l'économie européenne. Bien que des progrès significatifs aient été accomplis par l'intégration des aspects environnementaux dans les autres politiques de l'Union (e.g. liaison

1. Conformément à l'article 11 dans [Official Journal of the European Union \(2012\)](#).

des paiements directs de l'utilisation des terres dans de bonnes conditions agricoles et environnementales, introduction de la composante verte dans le système des paiements directs à la suite de la réforme de la PAC, intégration de la lutte contre le changement climatique dans la politique énergétique), le domaine de l'environnement continue de susciter des inquiétudes au niveau de l'Union (e.g. niveau insécurisé de la qualité de l'eau, de la pollution atmosphérique, utilisation inefficace des ressources, gestion inefficace des déchets).

Si les sept programmes d'action pour l'environnement sont analysés de plus près, on trouve de nombreux éléments de continuité plutôt que de changement radical au cours des années, ce qui est également observé par les chercheurs dans le domaine (Hey, 2005). Le Tableau 1.1 met en scène une brève description des programmes d'action pour l'environnement. Nous décrivons ci-dessous plus en détail le septième programme d'action.

Le dernier programme d'action pour l'environnement (PAE7) vise à atteindre les objectifs de la politique fixés jusqu'en 2020, en contribuant à la vision européenne à long terme d'ici 2050 en ce qui concerne la direction dans laquelle la politique environnementale de l'UE devrait être orientée dans un avenir lointain. [Official Journal of the European Union \(2013a\)](#) identifie trois objectifs prioritaires interdépendants du PAE7 :

- *protéger, préserver et améliorer tout ce qui comprend le capital naturel de l'UE ;*
- *réduire les émissions de gaz à effet de serre pour faire de l'UE une économie verte et compétitive ;*
- *augmenter le bien-être humain lié à l'environnement et réduire la menace pour la santé humaine.*

Le capital naturel de l'Union Européenne assure sa prospérité économique, raison pour laquelle il existe un ensemble considérable d'actes législatifs visant à le protéger. PAE 7² exhorte les États membres de l'UE à accélérer l'implémentation des stratégies actuelles (Directive-cadre sur l'eau, Directive sur les nitrates) et à trouver des solutions dans les cas d'absence de législation précise. Faire de l'UE une économie verte et compétitive à faibles émissions de carbone signifie promouvoir une économie efficace à travers l'utilisation des ressources, compétitive par innovation et efficacité, et capable de découpler la croissance économique de la consommation d'énergie et de ressources.

Une autre priorité de PAE 7 consiste à améliorer l'intégration des questions environnementales dans les autres politiques européennes et d'assurer la cohérence entre elles. Une évaluation de cette intégration des préoccupations environnementales dans les autres politiques a montré que la réalisation des objectifs du dernier programme d'action pour

2. voir <http://ec.europa.eu/environment/action-programme/>

TABLE 1.1. Courte description des Programmes d'action pour l'environnement (PAE).
 Source : <http://www.hiz.hr/icttrain/en/trainings/01/01.html>

	Année d'adoption	Période	Objectifs PAE pour la politique environnementale
PAE 1	1973	1973-1977	<p><i>Principes généraux énoncés</i> : le pollueur-payeur et la prévention de la pollution de l'eau et de l'air.</p> <ul style="list-style-type: none"> - la promotion du concept de développement durable. <p><i>Objectifs du PAE 1</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prévention, réduction, limitation des dommages environnementaux et de la pollution. - La conservation et à la préservation de l'équilibre écologique. - Utilisation rationnelle et conservation des ressources naturelles.
PAE 2	1978	1978-1982	<ul style="list-style-type: none"> - PAE 2 poursuit les objectifs du PAE 1. - Adaptation des objectifs mis en œuvre dans PAE 1 aux périodes de crise économique (1975-1978) et (1981-1983).
PAE 3	1982	1982-1986	<ul style="list-style-type: none"> - Équilibrage de ses objectifs avec ceux du marché intérieur. - Changement de la perspective selon laquelle la politique environnementale est vue (des normes sur les émissions de polluants et des valeurs limites d'émissions de gaz à effet de serre sont proposées).
PAE 4	1987	1987-1992	<ul style="list-style-type: none"> - Poursuivre la coordination des objectifs environnementaux avec celles du marché intérieur. - La protection de l'environnement considérée comme une activité intégrée du processus de production. - Préparation du terrain pour la stratégie-cadre de développement durable.
PAE 5	1992	1992-2000	<ul style="list-style-type: none"> - La transition de l'approche basée sur des commandes et contrôle à l'introduction d'instruments économiques et fiscaux. - Transformation du développement durable en stratégie de politique environnementale.
PAE 6	2001	2002-2012	<p>PAE 6 identifie quatre domaines prioritaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le changement climatique ; - Protection de la nature et de la biodiversité ; - La santé en relation avec l'environnement ; - La conservation des ressources naturelles et gestion des déchets.
PAE 7	2013	2013-2020	<p><i>Objectifs du PAE 7</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Protéger, conserver et renforcer le capital naturel ; - Développer une économie de gaz à effet de serre efficace, verte, compétitive et à faibles émissions de carbone ; - Protéger les citoyens des pressions et des risques pour la santé et le bien-être de l'environnement ; - Appliquer la législation de l'Union dans le domaine de la protection de l'environnement ; - Mieux comprendre l'environnement et améliorer la base de connaissances qui soutient sa politique ; - Garantir des investissements pour soutenir les politiques en matière d'environnement et de changement climatique ; - Intégrer les considérations environnementales dans les autres politiques et assurer leur cohérence ; - Le développement durable des villes de l'Union Européenne ; - Une approche plus efficace des problèmes environnementaux et climatiques internationaux.

l'environnement nécessitait une intégration plus efficace, fondée sur des approches plus cohérentes au niveau des politiques. À cet égard, dans les propositions de réforme de la PAC ou de la politique de cohésion, par exemple, la Commission Européenne est toujours soucieuse de soutenir l'intégration et la durabilité de l'environnement. Dans le même temps, il est pris en compte que les efforts déployés dans le domaine de l'environnement génèrent également des avantages connexes pour les autres politiques. La directive relative à l'évaluation environnementale stratégique³ et la directive concernant l'évaluation des incidences sur l'environnement⁴ peuvent jouer un rôle important.

Ce programme d'action à long terme veille pour assurer la réalisation des engagements suivants : (i) l'équité dans l'implémentation et l'application des règles européennes dans le domaine de l'environnement ; (ii) veiller à ce que les autres politiques de l'UE respectent les objectifs fixés en matière de climat et de l'environnement ; (iii) l'accès aux dernières connaissances scientifiques pour accéder à des preuves solides et pour combler les lacunes stratégiques d'importance majeure ([European Commission, 2014c](#)).

Les instruments d'application de la politique environnementale

La politique environnementale se reflète non seulement dans les objectifs et les priorités, mais également dans le nombre de ses instruments d'implémentation. Ces instruments sont divisés en trois types : législatifs, techniques et économique-financiers, auxquels s'ajoutent des outils d'aide liés aux stratégies de protection de l'environnement.

- *Les instruments législatifs* sont représentés par plus de 200 actes normatifs (directives, règlements et décisions), créant le cadre juridique de la politique de protection de l'environnement.
- *Les instruments techniques* garantissent le respect des normes de qualité et l'utilisation des meilleures technologies environnementales. Cette catégorie comprend :
 - Les normes et limites d'émission (visent à limiter le niveau de pollution de l'environnement et à identifier les principaux pollueurs).
 - Les meilleures technologies disponibles définies par la directive 96/61/CE ([Journal officiel des Communautés européennes, 1996](#)) qui se réfère à la prévention et le contrôle intégré contre la pollution de l'environnement.
 - L'éco-étiquetage a pour rôle de différencier les produits écologiques, qui ont un faible impact sur l'environnement, par rapport au reste.

3. Directive 2001/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement.

4. Directive 2011/92/UE du Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2011 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

- Les critères applicables aux inspections environnementales dans les États Membres, visent à assurer la conformité avec la législation environnementale de l’UE et son application uniforme.
- **Les instruments financiers** sont représentés par le programme LIFE + et le Fonds de cohésion. Le programme LIFE a été créé en 1992 et vise à contribuer à la mise en œuvre et au développement de la politique et législation environnementales. Plus précisément, le programme LIFE représente l’instrument de l’UE pour financer des actions en faveur de l’environnement (75% du paquet financier) et du climat (25% du paquet). Pour la période 2014-2020, le budget alloué au programme est de 3.4 milliards d’euros⁵.

Le Fonds de cohésion a été décidé par le Traité de Maastricht, devenant opérationnel en 1994 et ayant l’objectif principal de soutenir les investissements et de cofinancer des projets dans le domaine de la protection de l’environnement, en particulier dans les secteurs de l’énergie et du développement durable qui apportent des bénéfices pour l’environnement. Pour l’exercice financier 2014-2020, approximatif 63.4 milliards d’euros ont été alloués par l’UE (European Parliament, 2019d).

Stratégies de politique environnementale

Les stratégies de mise en œuvre de la politique environnementale renforcent le principe de subsidiarité et cherche à remplacer l’approche verticale traditionnelle de type commande et contrôle en promouvant un modèle alternatif pour atteindre les objectifs environnementaux de l’UE. Le principe de subsidiarité suppose la délégation de responsabilités aux États membres alors que l’UE ne définit que le cadre général, c’est-à-dire les objectifs à prendre en compte. Ce principe est devenu partie de la base juridique de l’Union Européenne, étant considéré comme un principe directeur de la division des pouvoirs dans l’UE.

Les stratégies de politique environnementale sont :

- **Le développement durable**

La Commission Mondiale sur l’Environnement et le Développement de l’ONU (1987)⁶ a défini le développement durable comme suit : "*Le développement durable est celui qui cherche à répondre aux besoins du présent, sans compromettre les possibilités des générations futures de satisfaire ses propres besoins*". Il a été adopté en 2001 en tant que stratégie à long terme, dans les domaines économiques, sociaux et de protection de l’environnement.

5. <https://ec.europa.eu/easme/en/life>

6. La Commission Mondiale sur l’Environnement et le Développement a été fondée en 1983 par Organisation des Nations Unies, afin d’intégrer l’interdépendance existante entre l’environnement et le développement dans un mécanisme crédible reconnu partout et accepté par la population et les gouvernements.

Grâce au cadre de développement lancé en 2001, 4 priorités de développement durable ont été identifiées (voir Figure 1.1).

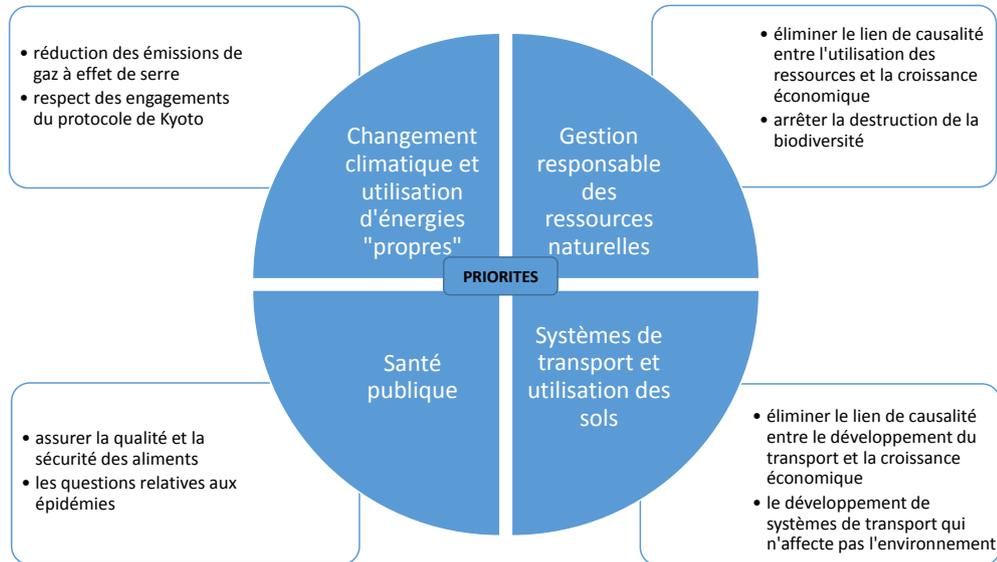


FIGURE 1.1. Priorités et mesures d'action pour la réalisation des objectifs à long terme du développement durable.

– **Le Programme de promotion des ONG actives dans le domaine de la protection de l'environnement**

Ce programme est fondé sur la décision 466/2002/CE ([Official Journal of the European Communities, 2002](#)), en mars 2002, et sert d'instrument financier participant au développement de la politique environnementale de l'UE en accordant des subventions aux ONG actives.

– **La Politique intégrée des produits**

La politique intégrée des produits est basée sur le "Livre vert d'une politique intégrée des produits" visant à promouvoir le développement d'un marché plus respectueux de l'environnement, COM (2001) 0068 ([Commission of the European Communities, 2001](#)). Récemment, en 2011, a été lancée la feuille de route sur l'utilisation rationnelle des ressources, avec les mêmes objectifs que la Politique intégrée des produits.

– **Les accords volontaires de protection de l'environnement et réduction de la pollution**

Les accords volontaires de protection de l'environnement et réduction de la pollution représentent une forme de soutien à la participation active des agents éco-

nomiques à la protection de l'environnement. Les accords environnementaux sont couramment utilisés dans tous les États membres aux niveaux national, régional ou local en tant qu'accords entre la Commission Européenne et les fédérations industrielles européennes.

– **Les taxes et impôts environnementaux dans le marché unique**

Les taxes et impôts environnementaux ont été adoptés en 1997 pour accroître l'efficacité de la politique environnementale, impôts et taxes imposés par les États membres, une stratégie qui est encouragée aussi par la Commission Européenne. Sont utilisés deux catégories de taxes et impôts environnementaux, celles qui s'appliquent aux émissions polluantes et celles qui s'appliquent aux produits. Les revenus obtenus de ces taxes (taxes sur la pollution de l'eau, taxes sur les émissions de bruit dans le domaine de l'aviation, taxes sur les pesticides, etc.) et impôts (impôts sur l'énergie, impôts sur les transports, impôts sur la pollution et ressources, etc.) sont ajoutés aux budgets des États membres et peuvent être utilisés dans des activités de protection de l'environnement.

Les principales directives de la politique environnementale

A. Directive 91/676/CEE du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (Directive nitrates)

L'un des éléments clés de la politique environnementale européenne est représenté par la protection de la qualité de l'eau, raison pour laquelle en décembre 1991, le Conseil des Communautés européennes a mis en œuvre la Directive sur les nitrates (91/676/CEE) ([Official Journal of the European Communities, 1991](#)), qui a pour objectif principal la préservation de la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface en Europe contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. Un rôle important revient à la promotion de bonnes pratiques agricoles, car l'agriculture est responsable de plus de 50% de l'azote déversé dans les eaux de surface ([European Commission, 2010b](#)).

Les nitrates sont des composants naturels du sol qui se produisent avec la minéralisation des substances organiques azotées provenant des animaux et des plantes, tout en faisant partie du cycle naturel de l'azote. Certains des nitrates sont utilisés par les plantes pour synthétiser des protéines et d'autres composés azotés, et l'excédent contamine la nappe phréatique. Naturellement, entre les nitrates dans le sol, l'eau et les plantes, un équilibre est établi, mais l'activité humaine de l'utilisation intensive des engrais dans l'agriculture a rompu cet équilibre, conduisant à un sol avec un plus grand teneur en

nitrate et implicitement à la pollution de l'eau et son eutrophisation due à l'excès de nutriments, ainsi qu'à l'acidification et les conséquences néfastes des émissions de gaz à effet de serre. Les nitrates du sol sont le résultat de la fertilisation par les nitrates et de la fixation de l'azote atmosphérique par de nombreuses plantes, en particulier les légumineuses. Les nitrates des eaux de surface proviennent des rejets d'eaux usées urbaines, du lavage des sols agricoles par l'utilisation des engrais azotés, du stockage non conforme de fumier d'animaux d'élevage dans les exploitations agricoles, des décharges de déchets ménagers, qui ne sont pas conformes aux règles en vigueur.

Étant donné que la pollution de l'eau dans un État Membre affecte les eaux d'autres pays, il a été décidé que des mesures pour la combattre devraient être menées conjointement par tous les États Membres. À la suite de la directive, tous les États Membres doivent protéger la qualité de l'eau en Europe. La directive prévoit que l'utilisation de nitrates dans les engrais organiques (fumiers), mais surtout chimiques, utilisés dans l'agriculture intensive commencée dans les années '60-'70, est la principale source de pollution des eaux européennes. Les États membres ont l'obligation d'identifier les zones vulnérables sur leur territoire, susceptibles de contribuer à la pollution, ainsi que de signaler s'ils sont affectés par la pollution des eaux des autres États membres. La Commission, avec chaque État membre, doit identifier chaque source de pollution et prendre des mesures conformément à la présente directive. Par conséquent, les États membres ont mis en place des programmes d'action pour l'identification de ces zones vulnérables, programmes prenant en compte à la fois les conditions environnementales de la région concernée et les conditions scientifiques et techniques relatives aux quantités d'azote d'origine animale ou provenant d'autres sources. Les États membres ont également l'obligation d'analyser la concentration de nitrates dans les eaux nationales et de surveiller l'état trophique des eaux souterraines, des eaux de surface et des eaux marines le cas échéant, et de communiquer à la Commission ses résultats tous les quatre ans. La Commission est tenue de publier tous les quatre ans un rapport de synthèse sur la qualité de l'eau potable dans l'UE. La directive établit des normes avec les paramètres à surveiller et à tester périodiquement, les paramètres ayant été regroupés en trois grandes catégories, à savoir les paramètres microbiologiques, chimiques et indicateurs. Les principaux problèmes rencontrés dans la mise en œuvre de la directive sur les nitrates sont le manque de ressources financières et les connaissances insuffisantes.

Tous les programmes d'action de la directive comprennent la limite annuelle de 170 kgN/ha, l'azote provenant du fumier. Grâce à une surveillance régulière, des règles plus strictes ont été établies pour les décharges et les engrais avec du fumier. Des dérogations peuvent être faites pour dépasser la limite de 170 kgN/ha, à condition que d'autres

mesures soient améliorées, de sorte que la réduction globale des nitrates soit satisfaisante. Des solutions ont été trouvées pour gérer le fumier en le traitant. De la simple séparation du fumier en fractions liquides et solides en filtrant et en traitant biologiquement la fraction liquide et en séchant, en compostant et en incinérant la fraction solide. Il y a des tentatives d'utilisation des régimes avec des fourrages à faible teneur en azote ainsi que l'amélioration de l'efficacité de la transformation des fourrages en nutriments.

La directive sur les nitrates est étroitement liée aux autres politiques européennes, notamment en matière d'agriculture et de changement climatique. Selon [European Commission \(2010b\)](#), si la directive sur les nitrates avait été pleinement mise en œuvre, elle aurait pu entraîner une réduction de 6% des émissions de N₂O jusqu'en 2020 (en prenant 2000 comme année de référence), contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique. D'un autre point de vue, la PAC soutient la directive sur les nitrates par des mesures prises dans le cadre du développement rural ou en tant que soutien direct. Dans le même temps, la réduction de la quantité des nitrates fait partie de la Directive-cadre sur l'eau qui sera présentée ci-dessous. Non seulement les agriculteurs dans le cadre de la PAC doivent tenir compte du respect des bonnes conditions environnementales, mais aussi la politique environnementale doit tenir compte du respect des codes de bonne pratique agricole afin de réduire la pollution par les nitrates, tel que stipulé dans la directive 91/676/CEE. Un exemple dans ce sens est représenté par les règles sur la limitation et l'utilisation des engrais, dont l'application doit dépendre de l'état des sols, les conditions climatiques, les besoins en azote des cultures, le système de rotation des cultures ou la quantité d'azote déjà présente dans le sol lors de la fertilisation.

Selon [Monteny \(2001\)](#), les programmes d'action sont des outils essentiels pour réduire la pollution de l'eau résultant des activités agricoles et un progrès visible peut être constaté dans le comportement des agriculteurs pour se conformer aux conditions de la directive. Néanmoins, l'implémentation des programmes d'action semble lente dans de nombreux États membres, n'atteignant pas un niveau satisfaisant.

[Grinsven et al. \(2016\)](#) soulignent qu'une conséquence de l'implémentation de la directive sur les nitrates a consisté dans une fertilisation plus équilibrée, les excédents d'azote et de phosphore diminuant. Bien que coûteuses pour l'agriculture, les politiques nutritionnelles conduisent à des avantages nets pour la société, un élément essentiel étant représenté par la redistribution des coûts et des bénéfices entre les régions et les groupes d'agriculteurs. Un mécanisme permettant de combiner les mesures d'atténuation régionales avec les politiques nationales faciliterait la réalisation de plusieurs objectifs, ce qui conduirait également à une meilleure intégration entre la PAC et les directives environnementales.

[Velthof et al. \(2014\)](#) analysent les effets de l'introduction de la directive nitrates sur les émissions agricoles de nitrogen dans l'UE-27, en utilisant le modèle Miterra-Europe et en introduisant deux scénarios (un qui prend en compte l'implémentation de la directive nitrates et un autre qui ne tient pas compte de la directive). L'implémentation de la directive a entraîné une réduction du lessivage des nitrates de 16%, des émissions d'oxyde nitreux de 6% et des émissions d'ammoniac de 3% au niveau de l'UE entre 2000 et 2008. Au niveau régional, les différences entre les émissions d'azote sont significatives à travers l'Union Européenne.

B. DIRECTIVE 2000/60/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

Selon la Directive 2000/60/CE ([Official Journal of the European Communities, 2000b](#)), l'eau représente "*un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel, ne devant pas être considérée un bien marchand comme les autres*", compte tenu de son importance. Dès l'année 1988, le Conseil a demandé à la Commission de faire des propositions dans le but de créer une législation communautaire concernant l'amélioration de la qualité écologique des eaux de surface. En 1995, le Conseil a également demandé un programme d'action concernant les eaux souterraines. Dans la même année, l'Agence Européenne de l'environnement, a présenté le «Rapport sur l'environnement dans l'Union Européenne 1995», qui attire l'attention sur la nécessité de protéger les eaux dans la Communauté, tant au point de vue quantitatif que qualitatif. En conséquence, une nouvelle directive-cadre est adoptée, établissant les principes de base d'une politique de l'eau durable dans l'UE.

La Directive-cadre sur l'eau a l'objectif principal d'établir un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, côtières, de transition et souterraines. La directive met en évidence le fait qu'il est essentiel d'intégrer les éléments environnementaux, en l'occurrence la protection et la gestion appropriées de l'eau, dans les autres politiques européennes, principalement dans les domaines de l'agriculture et de l'énergie. Dans le même temps, non seulement les directives relatives à la politique environnementale soulignent ce fait, mais aussi celles dérivant des autres politiques, ce qui nous amène de nouveau à constater que les politiques interagissent. Ainsi, dans le cadre de la PAC, conformément au règlement CE no 73/2009 ([Journal officiel de l'Union européenne, 2009](#)), il est également indiqué qu'un renforcement du cadre communautaire est nécessaire afin de garantir la protection et la gestion de l'eau suite à l'activité agricole de pollution ou ruissellements.

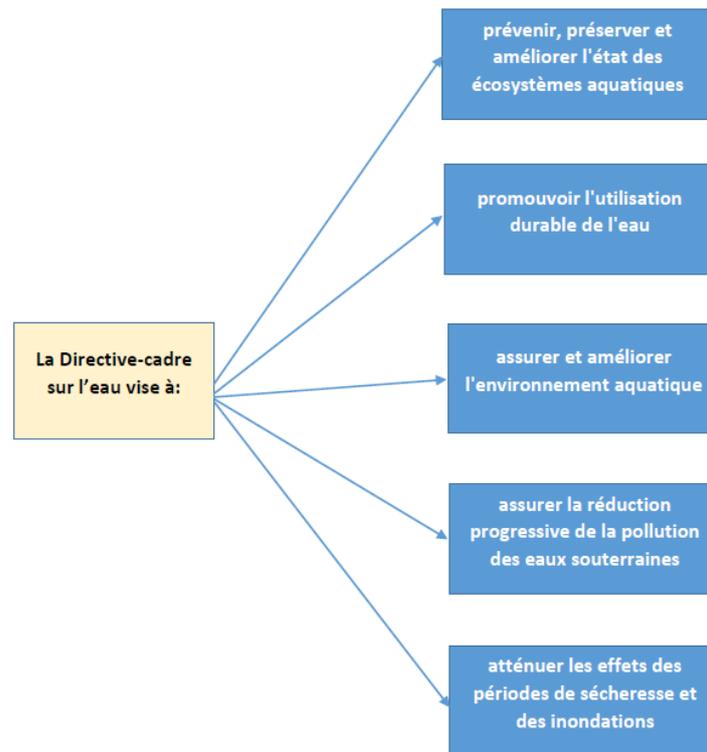


FIGURE 1.2. Les principaux objectifs de la Directive-cadre sur l'eau. *Source* : [Official Journal of the European Communities \(2000b\)](#)

Bien que la directive cadre sur l'eau représente sans aucun doute un progrès de la politique de l'environnement, apportant des améliorations considérables au fil du temps, dans la littérature, son implémentation est parfois critiquée. [Voulvoulis et al. \(2017\)](#) estiment que la directive n'a pas atteint en totalité ses objectifs d'assurer une non-détérioration de l'état des eaux et leur management durable, en essayant d'identifier les raisons pour lesquelles la directive n'a pas pu être exploitée à son plein potentiel. L'auteur considère que la pensée systémique⁷ joue un rôle clé dans l'implémentation de la directive, attirant l'attention qu'une approche plus holistique et durable de la gestion de l'eau est nécessaire. Une meilleure caractérisation des bassins hydrographiques, une meilleure organisation en termes de gestion de l'eau, la transition vers une pensée systémique, pourraient être l'explication des problèmes et des retards dans l'application de la directive.

La directive-cadre sur l'eau semble être perçue différemment dans les États membres de l'Union. [Liefferink et al. \(2011\)](#) analysent la manière avec laquelle trois États membres de l'UE, la France, les Pays-Bas et le Danemark, réagissent à l'implémentation de la

7. La pensée systémique consiste dans une approche intégrée, interdisciplinaire et holistique.

directive-cadre sur l'eau. Le chemin suivi par les trois pays est différent, d'autant plus qu'ils débutent ce processus avec une "mentalité" différente. Alors que la France possédait déjà une riche expérience en matière de management des bassins d'eau avant la création de la directive-cadre sur l'eau, le Danemark a entamé le processus de mise en œuvre de manière ambitieuse et formelle, tandis que les Pays-Bas ont préféré suivre dès le début une vision plus pragmatique.

[Gouldson et al. \(2008\)](#) examinent la manière dans laquelle diverses mesures complémentaires ou alternatives (e.g. des approches basées sur l'information, des réglementations volontaires ou privées) pourraient aider à atteindre les objectifs de la directive-cadre sur l'eau. À partir d'une étude réalisée pour l'Agence de l'environnement de l'Angleterre et le Pays de Galles, les auteurs constatent que ces outils supplémentaires pourraient jouer un rôle important, à condition que certaines conditions soient remplies, reposant sur le niveau de compréhension des parties prenantes, le niveau d'engagement des groupes clés, l'importance de délivrer un message clair.

[Frances et al. \(2017\)](#) analysent la directive-cadre sur l'eau du point de vue du changement climatique, soulignant que la mention implicite du changement climatique et l'inclusion de ses impacts, seraient extrêmement importantes dans le cas d'une révision de la directive, lors de l'évaluation économique de ses mesures. En prenant l'exemple de l'Espagne, malgré le fait que l'implémentation de la politique environnementale par la directive-cadre sur l'eau a conduit à une meilleure coordination entre la gestion des eaux et le changement climatique, il considère qu'il y a encore des lacunes dans la mise en œuvre de la politique, qui sont liées à la coordination au niveau des administrations et la vision de la société civile, en attirant l'attention sur l'importance d'établir une cohérence entre la politique de l'environnement et les autres secteurs. [Frances et al. \(2017\)](#) proposent également diverses recommandations telles que l'utilisation par les autorités responsables de l'eau, des instruments de marché et l'application de politiques de prix, par des coûts environnementaux, des coûts des ressources, afin de mieux valoriser l'utilité de l'eau, face aux défis provenant d'autres secteurs.

Selon [European Court of Auditors \(2014\)](#), la Commission Européenne, l'Agence Européenne pour l'environnement, le Conseil de l'Union Européenne et EU Water Directors⁸ ont souligné l'importance d'intégrer davantage les préoccupations en matière de gestion de l'eau dans les autres domaines politiques, notamment l'agriculture⁹.

8. EU Water Directors représentent les États membres sur toutes les questions liées à la gestion de l'eau.

9. Au niveau européen, la principale source de pollution de l'eau est l'agriculture, qui représente environ 33% de l'eau totale utilisée ([European Court of Auditors, 2014](#)).

1.1.2 Politique agricole commune (PAC)

Les défis auxquels l'agriculture est confrontée, à savoir les crises mondiales économiques et financières, le changement climatique, les coûts élevés des facteurs de production, la sécurité alimentaire, ont contribué à la création et au développement de la Politique Agricole Commune par l'Union Européenne. La Politique Agricole Commune peut être considérée comme l'une des politiques les plus complexes et les plus controversées des politiques proposées et mises en œuvre par l'UE, représentant l'une des pierres angulaires¹⁰ de la stratégie globale de l'UE ([European Commission, 2010a](#)).

La Politique Agricole Commune (PAC) a vu le jour en 1962, lorsque les membres fondateurs de l'Union Européenne (France, Allemagne, Italie, Belgique, Pays-Bas et Luxembourg) étaient sortis de plus d'une décennie de graves pénuries alimentaires après la Seconde Guerre mondiale. La PAC a été considérée comme l'expression d'un partenariat entre l'agriculture et la société, et entre l'Europe et ses agriculteurs. Les objectifs de la PAC étaient conçus depuis le début afin de protéger à la fois les intérêts des producteurs et des consommateurs. Selon l'article 39 ([Official Journal of the European Union, 2012](#)), parmi les principaux objectifs de la PAC, nous énumérons :

- * soutenir les agriculteurs et accroître la productivité agricole ;
- * stabiliser les marchés et garantir la sécurité des approvisionnements ;
- * maintenir les zones rurales et les paysages à travers l'UE ;
- * assurer des prix raisonnables dans les livraisons aux consommateurs ;
- * contribuer à la lutte contre le changement climatique et assurer la gestion durable des ressources naturelles ;
- * maintenir l'économie rurale en vie en favorisant l'emploi dans les secteurs de l'agriculture, de l'agroalimentaire et des secteurs connexes ;
- * assurer un niveau de vie équitable à la population agricole ;

PAC a commencé à fonctionner par des mesures d'unification des prix (céréales, produits laitiers, viande, etc.), étant composée d'un ensemble d'actes législatifs adoptés par l'UE pour construire une politique commune dans le domaine agricole. Les trois principes de base sur lesquels la PAC repose, sont représentés par : (i) la mise en place et le maintien d'un marché unique dans lequel les produits circulent librement en fixant des

10. La PAC est la plus ancienne politique communautaire, ses fondations datant des années '50, dans le contexte de la création, à l'initiative du ministre français des Affaires étrangères à l'époque, Robert Schumann, de l'organisation que nous reconnaissons aujourd'hui comme l'Union Européenne. Une étape importante dans l'histoire de la PAC est représentée par la signature du Traité de Rome en 1957, lors de la création de la Communauté Économique Européenne, quand ont été établies les objectifs et les paramètres de la politique agricole communautaire.

prix communs ; (ii) le respect de la notion de préférence communautaire pour les produits fabriqués dans la Communauté ; et (iii) la solidarité financière, chaque État Membre contribuant au budget commun en fonction de ses possibilités financières.

La législation de l'Union dispose d'une marge de manœuvre considérable dans le choix des instruments et des réformes, qui dépend des priorités des institutions et de l'évolution des marchés. En plus des principaux objectifs prévus dans le Traité sur le Fonctionnement de l'Union Européenne, la PAC présente également des objectifs plus généraux spécifiques à l'ensemble des politiques de l'UE, tels que la protection de l'environnement, la protection des consommateurs, la protection du bien-être des animaux, la protection de la santé publique, et la cohésion économique, sociale et territoriale.

Évolution des principales étapes de la Politique Agricole Commune

Une chronologie des principales étapes de la Politique Agricole Commune est présentée dans la Figure 1.3. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont souligné la résistance de la Politique Agricole Commune au changement, soutenue par un équilibre des forces en faveur à l'intérêt agricole, démontrant ainsi le caractère exceptionnel et complexe de la PAC au fil du temps (Greer (2013), Skogstad (1998), Coleman et al. (1996), Stead (2007), Grant (1997), Garzon (2006), etc.).

Les réformes successives de la PAC ont permis d'adapter les outils utilisés afin de rendre possible la réalisation des objectifs fixés par le Traité sur le Fonctionnement de l'Union Européenne, qui ont été présentés ci-dessus dans ce sous-chapitre. Les principales réformes sont (European Parliament, 2018b) :

- *La réforme de 1992 : la grande inflexion*

Cette réforme, dite Réforme Mac Sharry a visé la réduction des prix garantis et leur compensation par des paiements directs aux producteurs (aides directes aux productions). Des mesures supplémentaires ont été prises avec l'objectif à mieux protéger l'environnement (telle que l'extensification des cultures et la protection des eaux), à augmenter l'utilisation des terres agricoles pour la forêt ou les loisirs et à favoriser l'émergence de jeunes agriculteurs.

Le Commissaire Mac Sharry a fondé sa démarche sur trois enjeux partagés par le Conseil :

- une baisse significative des prix des produits agricoles afin d'accroître leur accessibilité à la fois sur les marchés intérieurs et extérieurs ;
- compenser pleinement les effets de la baisse des prix agricoles avec des montants compensatoires qui ne dépendent pas des quantités produites ;

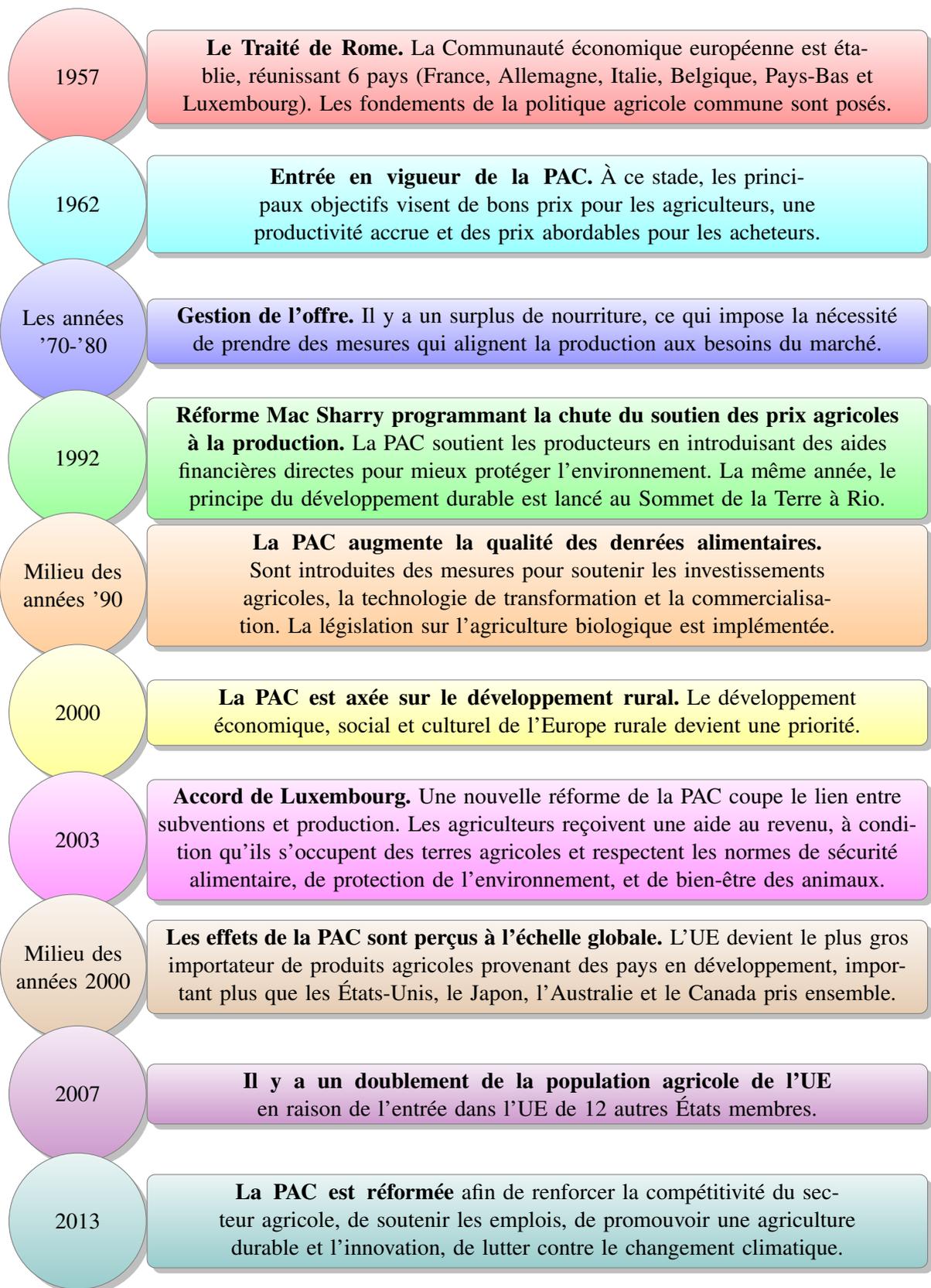


FIGURE 1.3. Bref historique de la Politique Agricole Commune.

- limiter l'utilisation des moyens de production (par exemple, en gelant les terres arables) et l'instauration de mesures agro-environnementales en cofinancement avec les États membres.
- *L'Agenda 2000 : une nouvelle étape de la PAC complétant la réforme de 1992*
 Cette réforme dite Agenda 2000 a eu le but de préparer l'arrivée de dix nouveaux États membres et à rendre la PAC compatible avec les règles de l'Organisation Mondiale du Commerce. Dans le cadre de cette réforme, le budget 2000-2006 a été défini en mettant l'accent sur les éléments suivants :
 - réaligement des prix aux prix mondiaux, partiellement compensés directement aux producteurs ;
 - l'obligation de respecter des conditions environnementales (eco-conditionnalité ou agroenvironnement) pour pouvoir bénéficier de l'aide ;
 - renforcement des mesures structurelles dans le cadre de la nouvelle politique de développement rural apparue. Le Conseil européen de Berlin en mars 1999 a décidé de rajouter à la dimension de la PAC un deuxième pilier consacré au développement rural.
 - stabilisation budgétaire pour la période 2000-2006 ;
 - augmentation des fonds structurels et des fonds de cohésion dans le contexte de l'élargissement de l'UE vers l'Est.
- *La réforme de juin 2003 : vers une PAC basée sur des aides découplées*
 En juin 2003, a été signé l'Accord de Luxembourg, dans le cadre duquel le commissaire européen Franz Fischler a profondément réorganisé la PAC, en introduisant de nouveaux principes et mécanismes :
 - le découplage entre les aides et la production, l'introduction d'un paiement unique à l'exploitation, indépendante de la production ;
 - la conditionnalité de l'aide, en fonction de certains critères environnementaux, de santé publique, bien-être animal, sécurité alimentaire, protection des plantes. Ainsi, les agriculteurs bénéficient du paiement unique à l'exploitation seulement s'ils répondent à ces critères ;
 - la redistribution des paiements attribués aux exploitants sur des bases historiques qui permettent le transfert des crédits entre les deux piliers de la PAC pour augmenter le développement rural (*la "modulation"*) ;
 - la discipline budgétaire prévue pour l'exercice financier 2007-2013.

Cette réforme a la particularité de fournir aux agriculteurs des revenus plus stables, en étant orientée vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement et la sécurité alimentaire.

- *Le «bilan de santé» de 2009*

Le bilan de santé de la PAC, adopté par le Conseil le 20 novembre 2008, a révisé les mesures mises en œuvre à la suite de la réforme de la PAC de 2003. Les principaux objectifs ont été les suivants :

- le découplage total de l'aide à la production ;
- la réorientation d'une partie des fonds du premier pilier pour le deuxième pilier, le développement rural. Plus précisément, le système de modulation a connu des changements importantes dans le cadre du bilan de santé concernant en particulier l'introduction d'un taux de modulation progressive à partir de 2010.
- les règles d'intervention publique qui sont réduites pour ne pas limiter la capacité des agriculteurs de s'aligner sur le marché.

- *Réforme de 2013*

La réforme de 2013 régit la PAC pour la période 2014-2020. Étant donné que l'agriculture est une composante essentielle de l'économie et de la société européenne en constante évolution, la réforme de la nouvelle Politique Agricole Commune pour la période 2014-2020 vise notamment à améliorer la sécurité alimentaire, assurer une meilleure protection de l'environnement, en accordant une attention particulière au développement rural et aux mesures contre le changement climatique. Les deux piliers de la PAC sont renforcés. Le deuxième pilier, le développement rural devient une priorité, étant mieux lié au premier pilier représenté par la politique de soutien des prix et des revenus. Pour atteindre ces objectifs à long terme, la réforme 2014-2020 s'est concentrée sur des objectifs opérationnels conçus pour rendre les outils de la PAC plus efficaces, et pour accroître la compétitivité et la durabilité du secteur agricole ([European Commission, 2013d](#)) (voir la Figure 1.4).

Dans la littérature, des études approfondies ont été menées sur la vitesse et l'ampleur du changement des réformes. Selon [Kennet & Nedergaard \(2009\)](#), la littérature axée sur l'étude des réformes de la PAC peut être divisée en deux catégories, à savoir (i) les études portant sur une seule réforme de la PAC qui ont tendance à avoir une vision analytique sur le contexte immédiat, suite à la nomination de la réforme ; (ii) des études comparatives portant sur deux réformes ou plus, menées dans le but de générer des connaissances théoriques plus générales en matière de réforme. [Cunha & Swinbank \(2011\)](#) ont analysé les réformes MacSharry, Agenda 2000 et Fischler, en soulignant que, si depuis sa création jusqu'en 1992, la PAC était presque immune aux changements, à partir de 1992 une série de réformes majeures ont eu lieu. [Ackrill \(2000a,b\)](#) ont examiné les pressions qui façonnent les réformes de 1999 et explorent les liens entre le budget et la PAC dans le cadre

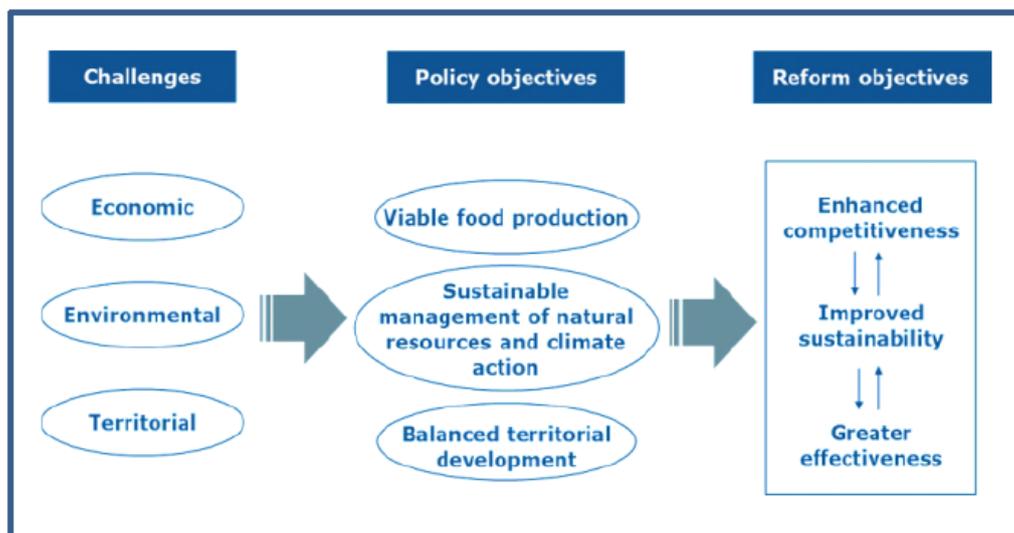


FIGURE 1.4. Réforme PAC 2014-2020 : Défis et objectifs de réforme.

Source : *European Commission - DG Agriculture and Rural Development.*

de cette réforme, montrant les avantages d'appliquer une règle d'équilibre budgétaire au budget de l'UE et soulignant la perception générale disant que la PAC dirige le budget européen. Ackrill et al. (2008) ont mis en évidence que les préoccupations budgétaires de l'UE et les obligations commerciales internationales jouent un rôle important dans la compréhension du fonctionnement de la PAC et de ses réformes, le lien entre ces facteurs de réforme étant complexe.

L'OCDE (2004) a utilisé le modèle AGLINK pour analyser la réforme de la PAC de 2003, prédisant que la réforme conduira à l'amélioration de la performance de la politique agricole européenne. Parmi les principaux impacts de la réforme, l'OCDE s'attendait à :

- une extensification significative (principalement caractérisée par une diminution de la densité de vaches par hectare) ;
- un transfert de terres cultivées vers des pâturages ;
- une réduction des stocks de viande de bœuf et, implicitement, une baisse de la production ;
- une réduction initiale du prix de production céréalière suivie par un retour au niveau de référence dans le cas du blé ;
- modifications non significatifs sur les marchés des produits laitiers dus au fait que AGLINK avait déjà intégré Agenda 2000 dans son niveau de référence et les quotas de production restaient obligatoires.

Daugbjerg (2009) a montré comment les changements de la PAC se font parfois

dans des directions différentes et que chaque événement de réforme ouvre des possibilités de réformes ultérieures. [Burrell \(2009\)](#) a souligné que l'élargissement de l'UE à 27 États hétérogènes, les crises budgétaires et les pressions du commerce international ont influencé les réformes de la PAC, considérant qu'une plus grande décentralisation du processus de décision et du financement est attendue. L'auteur a proposé un modèle de réforme de la PAC allant d'une politique axée sur les revenus de la ferme à une politique basée sur une économie de marché, durable du point de vue écologique et avec une adaptation aux conditions nationales. [Nazzaro & Marotta \(2016\)](#) font référence aux instruments politiques de la nouvelle PAC 2014-2020 pour faire face aux problèmes majeurs auxquels cette politique a été confrontée, tel que la globalisation des marchés, la diversité croissante de l'agriculture et des zones rurales en raison des élargissements de l'UE, la pression croissante exercée sur les ressources naturelles, les attentes des citoyens en matière d'environnement, la répartition inégale des ressources, le changement climatique. [Greer \(2013\)](#) analyse la réforme 2014-2020 de la Politique Agricole Commune et conclut que les résultats de la réforme démontrent que la PAC résiste toujours aux modifications substantielles tant au niveau de ses instruments politiques que de son budget. Il existe toujours une controverse entre les partisans du changement substantiel de la PAC et un groupe d'États membres qui souhaitent maintenir une PAC traditionnelle.

[Henke et al. \(2018\)](#) abordent la réforme 2014-2020 sous un autre angle, en analysant le comportement des États membres face à la nouvelle PAC, dont la mise en œuvre a donné l'opportunité d'utiliser un certain degré de flexibilité. Il identifie trois facteurs (domaines de flexibilité) qui influencent les choix effectués par les États membres en ce qui concerne les dispositions de la réforme 2014-2020 : (i) la vitesse et l'ampleur de la transition à un paiement forfaitaire, (ii) la sélection des bénéficiaires des paiements directs, (iii) le degré de redistribution du soutien entre les bénéficiaires. L'auteur met en évidence le caractère fortement centralisé et relativement simple de l'ancienne PAC traditionnelle qui ne permettait pas aux États membres d'exprimer leurs options en fonction des intérêts nationaux. Avec le temps, surtout après les années '90, il y a eu diverses pressions qui ont fait évoluer la PAC vers d'autres secteurs, l'environnement et l'économie. Dans le même temps, l'auteur met en lumière le fait que la réforme 2014-2020 a apporté un changement majeur dans le sens que chaque État membre peut adapter les mesures de la PAC en fonction de ses besoins et implémenter les instruments (système de paiements directs, dans ce cas) concernant la sélection des bénéficiaires et la redistribution du soutien. À la suite de l'introduction des trois dimensions de flexibilité, l'auteur souligne également que les États membres qui se sont bien adaptés à l'ancienne PAC sont ceux qui se sont bien adaptés à la nouvelle PAC, alors que les états qui ont été incapables de s'adapter à l'approche centralisées dans le passé, essaient maintenant d'utiliser le plus possible ce

degré de flexibilité.

La nouvelle PAC et ses instruments

La nouvelle PAC 2014-2020 maintient les deux piliers, mais renforce les liens entre eux, en introduisant une nouvelle architecture de paiements directs et un développement rural renforcé qui rendent les deux piliers mieux ciblés et plus équitables. La PAC est divisée en trois axes différents, qui forment les deux piliers de la politique. Le premier pilier comprend *les paiements directs* et des *mesures de marché* (European Parliament, 2019b). Le deuxième pilier concerne la *politique de développement rural* (European Parliament, 2019c).

Pilier 1. Les paiements directs

Ce sont les paiements annuels à usages multiples donnés aux agriculteurs pour aider à stabiliser les revenus agricoles en raison de la volatilité des prix sur le marché et des conditions météorologiques. Les producteurs doivent s'aligner sur le marché produisant les biens attendus par les consommateurs. Les paiements directs sont caractérisés par trois composantes obligatoires et trois composantes volontaires (voir Figure 1.5). Les composantes obligatoires se réfèrent à : i) ***un paiement de base***, qui doit être harmonisé selon un critère de convergence entre les États membres et les agriculteurs ; (ii) ***une composante écologique*** qui devrait représenter 30% des paiements directs accordé à chaque État membre et qui doit être conçue pour maintenir une zone écologique en utilisant des pratiques respectueuses pour l'environnement ; (iii) ***un paiement supplémentaire pour soutenir les jeunes agriculteurs***, accordé pour une période de cinq ans pour les 90 premiers hectares de leur ferme. En valeur, cette aide ne devrait pas dépasser 2% du paquet des paiements directs. Les composantes volontaires se réfèrent à : i) ***un paiement redistributif***, comme aide supplémentaire pour les premiers hectares, jusqu'à 30% du paiement direct ; (ii) ***un soutien supplémentaire pour les zones soumises à des contraintes naturelles*** spécifiques et qui doit être inférieur à 5% des paiements directs ; (iii) ***un soutien couplé facultatif accordé aux zones présentant des difficultés*** pour des raisons économiques et qui ne doit pas dépasser 15% du total des paiements directs ; (iv) ***un système simplifié pour les petits agriculteurs***.

Ces composants seront décrits plus en détail ci-dessous.

LES AGRICULTEURS DE L'UE ONT ACCÈS:

Aux régimes obligatoires

(tous les États membres):

- Paiement de base
- Paiement vert*
- Régime des jeunes agriculteurs

(+)

Aux régimes facultatifs

(Choix des États membres):

- Soutien couplé
- Aide dans les zones soumises à des contraintes naturelles
- Paiement redistributif

Tous les paiements soumis à l'écoconditionnalité

OU

À un régime simplifié pour les petits agriculteurs

(facultatif pour les états membres)

FIGURE 1.5. Composantes des paiements directs de la PAC. *Source* : [European Commission \(2017a\)](#)

Le soutien de base, en tant que revenu accordé aux agriculteurs qui mènent des activités agricoles, représente le **paiement de base**, qui varie entre 12% et 68% de l'allocation budgétaire nationale selon le choix de l'État membre. Le paiement de base est octroyé par chaque État membre dans deux manières : soit sous la forme du régime de paiement par exploitation agricole, soit sous la forme d'un régime de paiement unique à la surface.

Dès le début, la PAC a démontré qu'elle détient un rôle important dans le développement de l'agriculture durable dans l'UE, en essayant de promouvoir les bonnes pratiques environnementales et climatiques. Un pas important dans cette direction a été fait avec la réforme de 2013, quand les **paiements directs verts** ont été introduits. Les États membres de l'UE étaient obligés d'allouer pour le système de paiements verts 30% du montant alloué aux paiements directs. Pour pouvoir recevoir des paiements directs verts, les agriculteurs doivent démontrer qu'ils respectent trois pratiques obligatoires, à savoir : la diversification des cultures, le maintien de prairies permanentes et la présence de zones d'intérêt écologique. Le système de paiements directs verts et les pratiques agricoles obligatoires seront analysés en détail dans le sous-chapitre 1.3. "Le lien entre la Politique agricole commune et l'environnement".

Étant donné que la population agricole de l'UE est en cours de vieillissement, la stimulation des jeunes agriculteurs est nécessaire pour l'avenir de l'agriculture. En 2013, par exemple, seulement environ 7% des agriculteurs avaient moins de 35 ans, tandis que plus de la moitié d'entre eux étaient âgés de plus de 55 ans. Afin d'encourager les jeunes agriculteurs, au paiement de base est ajouté un paiement supplémentaire propre à chaque

État membre. Le **paiement pour les jeunes agriculteurs** représente au maximum 2% du budget des paiements directs et est accordé pour une période maximale de 5 ans à compter de la prise en charge par le jeune agriculteur de la fonction de chef de l'exploitation agricole.

Le **paiement redistributif** est accordé aux petits agriculteurs pour les premiers hectares éligibles et ne dépassera pas 30% du budget des paiements directs. Pour le paiement redistributif, ont opté seulement dix États membres : l'Allemagne, la France, la Belgique (en Wallonie uniquement), le Royaume-Uni (au Pays de Galles uniquement), la Pologne, la Roumanie, la Lituanie, la Bulgarie, la Croatie, et depuis 2017 le Portugal. Ce type de paiement varie d'un État à l'autre, allant de 25 €/ha à 127 €/ha en 2015.

Pour aider les agriculteurs des **zones confrontées à des contraintes naturelles** (telles que les zones de montagne), peut être accordé un soutien qui ne doit pas dépasser 5% du budget des paiements directs. Il appartient aux États membres de décider quelles sont ces zones en utilisant des critères biophysiques (tels que les pentes). Actuellement, seulement deux États membres utilisent ce type de soutien, le Danemark et la Slovaquie.

Étant donné que plus des trois quarts des fermes de l'Union Européenne sont petites, ayant moins de 10 hectares, les États membres peuvent appliquer le **régime des petits agriculteurs**, qui est un régime de paiement direct et simplifié. Ce paiement ne peut pas dépasser 1250 € mais il est fixé au niveau de chaque État membre. Actuellement, 15 États membres utilisent ce régime : Allemagne, Pologne, Italie, Autriche, Estonie, Hongrie, Croatie, Bulgarie, Lettonie, Roumanie, Malte, Espagne, Portugal, Slovaquie et Grèce. Les agriculteurs participant à ce programme sont exemptés des contrôles et des sanctions concernant les mesures d'écologisation¹¹ et de écoconditionnalité.

Bien que le couplage entre les paiements directs et la production a été partiellement éliminé à la suite de la réforme de 2003 et totalement à la suite du Bilan de santé de la PAC de 2009, il est permis aux États membres d'associer un petit pourcentage du budget des paiements directs à certains produits. L'objectif de ce **soutien couplé facultatif** est de maintenir le niveau de production dans les zones défavorisées, mais qui sont particulièrement importantes du point de vue social, économique et environnemental.

Concernant la répartition des paiements directs annuels à chaque État membre, peuvent avoir lieu des transferts entre les piliers (voir Figure 1.6 pour l'année 2015).

11. Par le terme "écologisation", nous nous référons à la composante écologique, la composante verte ou le verdissement, comme composante du système des paiements directs.

Member States (Calendar year 2015)	Before transfer		After transfer
France	7.55	↓	7.30
Germany	5.14	↓	4.91
Spain	4.84	=	4.84
Italy	3.90	=	3.90
Poland	2.99	↑	3.38
United Kingdom	3.56	↓	3.17
Greece	2.04	↓	1.92
Romania	1.63	↓	1.60
Hungary	1.27	↑	1.35
Ireland	1.22	=	1.22
Denmark	0.92	↓	0.87
Czech Republic	0.87	↓	0.84
Netherlands	0.78	↓	0.75
Bulgaria	0.72	=	0.72
Sweden	0.70	=	0.70
Austria	0.69	=	0.69
Portugal	0.57	=	0.57
Belgium	0.54	↓	0.52
Finland	0.52	=	0.52
Slovakia	0.38	↑	0.44
Lithuania	0.42	=	0.42
Croatia	0.13	↑	0.18
Latvia	0.20	↓	0.18
Slovenia	0.14	=	0.14
Estonia	0.12	↓	0.11
Cyprus	0.05	=	0.05
Luxembourg	0.03	=	0.03
Malta	0.01	=	0.01

Source: Annex II of Regulation (EU) No 1307/2013 and Annex II of Regulation (EU) No 1307/2013 as modified by Commission Delegated Regulation (EU) No 994/2014 of 13 May 2014.

FIGURE 1.6. La répartition annuelle des paiements directs pour chaque État membre (en milliards €, prix courants), avant et après le transfert entre les deux piliers.

L'Union Européenne autorise donc une plus grande flexibilité entre les piliers, les frontières entre le premier et deuxième pilier étant moins clairement établies. Ainsi, il appartient à chaque État membre d'organiser son budget pour les deux piliers, pouvant renforcer le second pilier en utilisant jusqu'à 15% du budget des paiements directs, mais ayant aussi la possibilité de renforcer le budget du premier pilier en utilisant du budget qui a été prévu pour le deuxième pilier.

Bien que les instructions et les règles réglementant l'attribution des paiements

directs aux agriculteurs sont fixés au niveau de l'UE, la gestion de mise en œuvre est résolue par chaque État membre (*le principe de la gestion partagée*), selon les conditions agricoles caractérisant chaque pays.

L'écoconditionnalité

Afin de recevoir l'intégralité des paiements directs, les agriculteurs doivent respecter un ensemble de règles strictes, connues sous le nom de écoconditionnalité. Il comprend deux types de règles :

- *Les exigences réglementaires en matière de gestion (ERMG)* comprennent 13 normes législatives issues de domaines prioritaires de l'UE tels que l'environnement, la sécurité alimentaire, la santé des animaux et des plantes, le bien-être des animaux.
- *Les bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE)* font référence aux normes liées à l'obligation de maintenir et de protéger l'environnement dans les meilleures conditions, normes en matière de protection des sols contre l'érosion, de maintenance de la structure et la matière organique des sols, l'évitement de la détérioration des habitats, la préservation des paysages, une bonne gestion de l'eau.

Pilier 1. Les mesures de marché

Les mesures de marché sont utilisées pour faire face aux situations spécifiques du marché et soutenir la promotion du commerce. L'Organisation Commune des Marchés Agricoles implique un ensemble de règles comprenant :

- règles relatives à la commercialisation des produits agricoles (indications géographiques, étiquetage, etc.);
- établir des paramètres pour les interventions et fournir un appui sectoriel;
- règles sur le fonctionnement des organisations de producteurs et des organisations interprofessionnelles;
- un fonds de réserve en cas de crise créé pour garantir les ressources financières nécessaires en cas de crise dans le secteur agricole;
- règles relatives au commerce international.

Pilier 2. La politique de développement rural

Les mesures de développement rural de l'UE au titre du deuxième pilier concernent :

- la modernisation des exploitations grâce à l'adoption de technologies de pointe;
- des investissements pour stimuler les zones rurales;
- accroître la compétitivité du secteur agricole;
- protéger l'environnement et atténuer le changement climatique;

- le développement des communautés rurales ;
- créer les conditions pour attirer les jeunes vers l'agriculture.

Dans l'UE, les zones à prédominance rurale couvrent plus de la moitié de son territoire (environ 57%), approximativement 20% de la population européenne habitant dans ces zones. Les mesures de l'UE encouragent la diversification des activités dans les zones rurales afin de les aider à développer et à améliorer leurs niveaux d'emploi et de vie. En même temps, la politique de développement rural est un outil essentiel pour soutenir le développement durable des zones rurales et de l'agriculture en général. Le deuxième pilier est cofinancé par les États membres qui, outre le budget de l'UE, affectent une partie du budget national à la création de mesures de soutien aux agriculteurs.

Le deuxième pilier de la PAC repose sur le fait que l'agriculture offre des biens publics et services qui méritent d'être financés. Les mesures prises en charges par le deuxième pilier font apparaître des disparités au niveau de l'UE. Si dans l'Europe occidentale prédomine les mesures agro-environnementales et le soutien aux régions agricoles avec des handicaps naturels, dans les États membres ultérieurement entrés dans l'UE, les fonds alloués à ce pilier sont davantage orientés vers la modernisation de l'agriculture. Étant donné que certains États membres se caractérisent par un grand nombre de très petites exploitations, la gestion des mesures prévues dans ce pilier est très complexe et nécessite des programmes, des inspections et des contrôles pluriannuels avec des coûts administratifs élevés (Bureau et al., 2012).

Les principes qui sont à la base de la politique de développement rural sont :

- Le principe de la multifonctionnalité de l'agriculture, qui implique une sortie de la sphère traditionnelle du fournisseur de produits agricoles ;
- Le principe d'une approche multisectorielle et intégrée de l'économie rurale, impliquant une diversification des activités et une attention particulière pour la préservation du patrimoine rural ;
- Le principe de flexibilité financière pour soutenir le développement rural ;
- Le principe de transparence en ce qui concerne le développement des programmes de développement rural.

La perception des outils de la PAC dans la littérature au fil du temps

L'approche des instruments politiques aide à comprendre et à analyser le changement des politiques publiques au fil du temps. Dans le cas de la PAC, les problèmes d'inclusion et d'exclusion, ainsi que le privilège de certains acteurs, semblent évidents. Grant (2010) divise les instruments de la PAC en 3 catégories :

- Les instruments politiques qui ont été abandonnés (prix d’objectif ; prix de seuil ; prélèvement variable à l’importation ; seuils de garantie ; stabilisateurs budgétaires, etc.). Il s’agit des instruments qui ont disparu en raison de changements dans d’autres domaines politiques (politique monétaire et politique commerciale).
- Les instruments politiques qui ont été utilisés avant, mais qui ont perdu leur importance avec le temps (subventions à l’exportation ; quotas ; paiements en coresponsabilité ; tarifs, etc.). Les instruments de cette catégorie ont vu leur importance diminuer en raison de l’évolution de la nature de la PAC. Des changements fondamentaux dans les instruments se sont produits à la suite de la réforme de 2003, les outils étant dirigés progressivement d’un soutien économique au soutien social des agriculteurs (Garzon, 2006).
- Instruments politiques relativement nouveaux susceptibles de jouer un rôle déterminant dans la définition de la PAC à l’avenir (découplage, paiement unique par exploitation, éco-conditionnalité, mécanisme de discipline financière). La nouvelle génération d’outils de la PAC met en évidence le passage du soutien du marché (acheteurs) au soutien des agriculteurs (producteurs), étant donné que ces instruments sont liés aux objectifs environnementaux et de développement rural (Cunha & Swinbank, 2011).

Le découplage est au cœur de la PAC réformée, les paiements n’étant plus liés à la production, le «*paiement unique à l’exploitation*» étant associé à la gestion des terres. Depuis sa création, cet instrument de paiement unique a provoqué de nombreuses controverses, à l’origine étant partiel et avec un caractère semi-permanent (Lascoumes & Le Gales, 2004). Cependant, les prévisions concernant cet instrument étaient positives, même depuis 2004, le commissaire Fischer Boel affirmant que cet instrument aura une longue durée de vie, anticipant en même temps qu’il survivra à la réforme de la PAC de 2013.¹² L’instrument de paiement unique a été maintenu au fil du temps, mais a pris diverses formes à la suite des différentes réformes. En 2009, le découplage partiel a été remplacé par un découplage total, ce qui a donné aux États membres la possibilité d’améliorer leur capacité d’intervention et de participation et d’être plus sélectifs dans la mise en œuvre de la PAC (Sorrentino et al., 2011 ; Daugbjerg & Swinbank, 2009). L’instrument a changé de nouveau sa forme suite à la réforme de 2013-2014. Ainsi, les paiements uniques à l’exploitation sont remplacés par un système de paiements par strates, comprenant les sept composantes, décrites ci-dessus dans ce sous-chapitre. La principale caractéristique de la PAC après la réforme 2013-2020 a été la flexibilité acquise par les États membres, leur permettant de mettre en œuvre les normes européennes qui ne sont pas obligatoires en fonction de leurs propres besoins économiques, sociaux et structurels (e.g. les trans-

12. Agra Europe, 30 March 2007 : EP/2

ferts budgétaires entre les deux piliers, les ressources allouées à chaque paiement direct) (Anania & Pupo, 2015). Suite à la réforme de 2013, les paiements directs sont répartis de manière plus équitable entre les États membres, entre les régions et entre les agriculteurs. Selon [Official Journal of the European Union \(2013b\)](#), l'année financière 2016 a été la première année de mise en œuvre intégrale de la réforme 2013, le budget des paiements directs étant de 41 milliards d'euros. Ce budget a bénéficié à environ 7 millions d'exploitations dans l'UE. À la suite de l'introduction de conditions d'éligibilité plus strictes¹³ et de la clause "agriculteur actif", le nombre de bénéficiaires en 2016 était inférieur de 7% par rapport à l'année précédente. Pour chaque État membre, la structure des paiements est différente car elle est influencée par la surface et, implicitement, par la structure des exploitations agricoles, ce qui crée des disparités dans le niveau des paiements entre les États membres de l'UE.

Afin de s'aligner sur la stratégie UE 2020, qui essaie de surmonter les faiblesses structurelles de l'économie européenne à travers une croissance intelligente, durable et inclusive, la PAC a subi tout un processus de réforme au fil du temps ([European Commission, 2010a](#)). L'intégration des préoccupations relatives au changement climatique et à l'environnement a entraîné une demande croissante d'outils et de modèles économiques capables d'évaluer les décisions prises dans le secteur agricole. Dans le but de représenter les effets du découplage dans l'Union Européenne, [Balkhausen et al. \(2007\)](#) utilisent 6 modèles d'équilibre partiel (AGLINK, AG-MEMOD, CAPRI, CAPSIM, ESIM, FAPRI) et 2 modèles d'équilibre général (GOAL et GTAP) en montrant que, au-delà des différences considérables qui les séparent, le même résultat est atteint, à savoir, le découplage a pour effet l'augmentation des surfaces fourragères et le déclin à la fois des superficies consacrées à la production de céréales ainsi que de la production de bovins et d'ovins.

En utilisant le modèle AGMEMOD fonctionnant sur un horizon de 10 ans, [Chantreuil et al. \(2005\)](#) analyse la réforme PAC de Luxembourg et montre que, dans un scénario où les paiements directs pour les céréales, les oléagineux, les bovins et les ovins sont complètement découplés, l'impact du découplage des paiements directs dans le cas de la production animale est plus fort que celui de la production arable. Dans le même temps, les superficies récoltées et la production des principales cultures céréalières ont diminué sous ce scénario.

13. Pour que les agriculteurs puissent demander des paiements directs annuels, ils doivent être éligibles, c'est-à-dire qu'ils doivent remplir chaque année les conditions suivantes : i) exigences minimales (la superficie du terrain doit avoir une certaine taille, fixée par chaque État membre); ii) les agriculteurs doivent être actifs (avoir une exploitation dans l'Union Européenne et y exercer des activités agricoles); (iii) les agriculteurs doivent disposer de terres agricoles (terres arables, cultures permanentes et pâturages permanents) qui sont utilisés pour l'activité agricole (Règlement (EU) No 1307/2013 [Official Journal of the European Union \(2013b\)](#)).

En faisant recours à deux modèles d'équilibre partiel (ESIM et CAPRI) et un modèle d'équilibre général LEITAP, [Meijl et al. \(2019\)](#) a évalué l'impact économique du transfert de fonds du premier pilier vers le deuxième pilier à travers le mécanisme de modulation obligatoire, en montrant que la modulation a eu un effet positif sur l'environnement, la compétitivité et la qualité de vie.

Selon [von Witzke et al. \(2010\)](#), les résultats de la littérature montrent que le système de paiements directs se caractérise par des effets analogues à ceux des subventions aux terres agricoles, n'étant pas neutres du point de vue de la production, entraînant une augmentation de la production. [Ciaian et al. \(2008\)](#) évaluent les impacts statiques et dynamiques du système des paiements découplés dans l'Union Européenne, montrant qu'ils ont un effet positif sur la production, étant capitalisés dans les prix des terres agricoles.

[Schroeder et al. \(2014\)](#) utilise une extension du modèle CAPRI avec un modèle d'équilibre général dans le but d'estimer l'impact du deuxième pilier de la PAC. Est observé un impact modéré, ce qui implique une légère augmentation du revenu agricole et de l'utilisation des terres agricoles, ainsi qu'une substitution des terres arables avec des prairies, conduisant à une augmentation de la production agricole et des émissions de gaz à effet de serre dans le cas de l'Allemagne.

[Erjavec et al. \(2011\)](#) utilisent le modèle d'équilibre partiel AGMEMOD afin d'évaluer la pertinence de l'introduction d'un système de paiement européen largement uniforme et montre l'occurrence d'un impact négatif mineur sur la production agricole européenne, tandis que des effets plus significatifs se produiront dans le cas d'États membres individuels pour certains produits de base.

[Barnes et al. \(2016\)](#) évalue les intentions des agriculteurs concernant la production agricole d'ici 2020, à travers une enquête menée auprès de 1764 fermes d'élevage en Écosse. Outre l'impact de la réforme Fischler dans le cadre de la PAC, deux scénarios (croissance et diminution des paiements) sont pris en compte, soulignant la volonté des agriculteurs de rester dans l'industrie dans le cas du scénario d'augmentation des paiements, tandis qu'une réduction des paiements obligerait les fermiers à réduire à la fois l'intensité et la taille des troupeaux, pendant que d'autres prendrait la décision de quitter l'industrie.

Le budget de la Politique Agricole Commune

La PAC est une politique commune pour tous les pays de l'Union Européenne, étant gérée et financée au niveau européen à partir des ressources du budget de l'UE. Depuis plus de cinquante ans, la PAC est considérée comme la principale politique eu-

ropéenne, raison pour laquelle une grande partie du budget européen lui est traditionnellement allouée. Cependant, les dépenses agricoles dans le budget de l'UE ont fortement diminué, passant de 70% dans les années 1970 à 30% actuellement.

La PAC est financée par deux fonds¹⁴ :

- ★ le Fonds Européen Agricole de Garantie (FEAGA) pour financer le premier pilier par les paiements directs aux agriculteurs et les mesures de marché ;
- ★ le Fonds Européen Agricole pour le développement rural (FEADER) pour financer le deuxième pilier, c'est-à-dire le développement rural dans les pays membres de l'UE.

Pour la période 2007-2013, les dépenses totales pour les deux piliers ont été de 397.6 milliards € (voir Figure 1.7).

Année	FEAGA	FEADER	TOTAL
2007	44,8	11,4	56,1
2008	45,0	11,2	56,1
2009	45,4	10,7	56,1
2010	45,9	10,8	56,7
2011	45,9	11,2	57,1
2012	46,4	11,2	57,5
2013	46,8	11,1	58,0

Unité : milliards d'euros

Source : Commission européenne

FIGURE 1.7. Les dépenses agricoles de l'UE pour la période 2007-2013.

Source : <https://agriculture.gouv.fr/>

Pour l'exercice 2014-2020, les dépenses réalisées en tant que paiements directs, mesures de marché et programmes de développement rural ont été financés avec environ 38% de son budget, mais il ne représente que 0.4% du PIB de l'Union, soit 1% des dépenses publiques des États membres (European Commission, 2015).

Pour pouvoir atteindre les objectifs proposés, la PAC doit bénéficier d'un budget

14. RÈGLEMENT (UE) No 1306/2013 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 17 décembre 2013 relatif au financement, à la gestion et au suivi de la politique agricole commune et abrogeant les règlements (CEE) no 352/78, (CE) no 165/94, (CE) no 2799/98, (CE) no 814/2000, (CE) no 1200/2005 et no 485/2008 du Conseil.

maitrisé. À la suite des transferts entre les deux piliers, en 2015 a eu lieu une modification du cadre financier pluriannuel concernant le secteur agricole pour la période 2014-2020 (Règlement d'exécution (UE) 2015/141 [Official Journal of the European Union \(2015\)](#)). Ainsi, pour l'exercice 2014-2020, pour le financement de la PAC ont été alloués 408.31 milliards € (montant calculé en prix courants), dont 308.73 milliards pour le premier pilier et 99.59 milliards pour le deuxième pilier (voir Tableau 1.8) ([European Parliament, 2018a](#)).

BUDGET DE LA PAC 2014/2020 (UE-28)	Total 2014/2020 (milliards d'euros à prix courants)	% PAC
MESURES SUR LES MARCHÉS (OCM)	19,002	
(a) Recettes affectées	(4,704)	
(b) Réserve de crise	+3,155	
(A) TOTAL OCM [(a) + (b)]	17,453	4,3 %
PAIEMENTS DIRECTS (PD)	298,438	
(c) Transferts en faveur du pilier 2	(7,369)	
(d) Transferts en faveur des PD	+ 3,359	
(e) BILAN NET DES TRANSFERTS [(c) + (d)]	(4,010)	
(b) Réserve de crise	(3,155)	
(B) TOTAL PD [(e) + (b)]	291,273	71,3 %
TOTAL PILIER 1 [(A) + (B)]	308,726	75,6 %
MESURES DE DÉVELOPPEMENT RURAL (DR)	95,577	
(e) Bilan net en faveur du pilier 2	+ 4,010	
(C) TOTAL PILIER 2 (DR)	99,587	24,4 %
TOTAL PAC 2014/2020 [(A) + (B) + (C)]	408,313	100 %

FIGURE 1.8. Budget de la PAC pour le cadre financier pluriannuel 2014-2020. *Source : Fiches techniques sur l'Union Européenne - 2018 "Le financement de la PAC" www.europarl.europa.eu/factsheets/fr*

Étant donné que la PAC est une politique commune d'importance stratégique, la proposition de la Commission prévoit pour la période 2021-2027 l'allocation d'une partie importante du budget de l'UE pour l'agriculture, plus précisément un montant de 365 milliards € (en prix courants). Il est proposé que la PAC mène ses activités principales avec un budget de 285.2 milliards € alloués pour FEAGA et de 78.8 milliards € alloués pour FEADER ([European Commission, 2018b](#)). Est prévu également un paquet financier de 10 milliards € qui sera consacré à la recherche et à l'innovation dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, du développement rural et de la bioéconomie.

1.1.3 Politique de sécurité alimentaire de l'UE - sécurisation du niveau de la production agricole

Le XXe siècle a été marqué par une augmentation importante de la population mondiale, qui est passée d'environ 1.7 milliards en 1920 à plus de 7.6 milliards en 2018. Sur cette période, l'augmentation de la production agricole a bénéficié du progrès technique, en particulier la mécanisation et les engrais de synthèse, ainsi que par l'augmentation des surfaces cultivées. Selon l'Organisation des Nations Unies ([United Nations, 2017](#)), la population mondiale devrait atteindre 9.8 milliards d'habitants en 2050. Des défis pour nourrir cette population surviennent, l'activité agricole étant caractérisée par des coûts et risques élevés, dont la production agricole dépend. Selon la Commission Européenne ([European Commission, 2017b](#)), l'UE est l'un des principaux producteurs mondiaux de produits alimentaires, assurant la sécurité alimentaire pour la population des États membres (environ 500 millions habitants). Afin de préserver le potentiel de la production agricole de l'UE, les institutions européennes ont inclus la sécurité alimentaire en tant que facteur clé de la réforme de la PAC après 2013. Toutefois, garantir la sécurité alimentaire ne signifie pas que la PAC devrait être utilisée comme un instrument pour accroître la production européenne au-delà des niveaux imposés par les conditions du marché ([House of Commons, 2011](#)).

Le concept de sécurité alimentaire est vieux, datant des années 1970 à la suite de mauvaises récoltes répétées, à une époque où les prix du pétrole étaient en hausse. Cependant, le problème d'assurer un niveau d'alimentation fiable commence plus tôt. À cette époque, on ne peut pas encore parler d'une politique de sécurité alimentaire communautaire. L'incapacité de l'Europe à satisfaire ses propres besoins alimentaires a représenté la pierre angulaire de la mise en place de la Politique Agricole Commune. De cette façon, les agriculteurs ont été encouragés à produire une quantité de nourriture en quantité importante, variée et à des prix accessibles, tout en assurant leurs revenus.

Cependant, une politique européenne de sécurité alimentaire était nécessaire. En 1996, par le [Règlement \(CE\) N0 1292/96 du Conseil \(1996\)](#) se poursuit l'action communautaire dans la lutte contre la faim, établissant la politique communautaire en matière de sécurité alimentaire. Le principe sur lequel est guidé le Livre Blanc ([Commission des Communautés Européennes, 2000](#)) consiste dans le fait que la politique de sécurité alimentaire doit être caractérisée par une approche globale et intégrée, ce qui implique que la politique et les piliers de la sécurité alimentaire puissent être appliqués à la fois au niveau de l'UE et en dehors de l'Union, à la fois entre les États membres de l'UE, ainsi qu'entre tous les secteurs de l'alimentation.

La Commission Européenne a alloué à la sécurité alimentaire depuis 1996, environ 500 millions € par an en moyenne. En 2006, la Commission Européenne a défini le nouveau programme de sécurité alimentaire, intitulé "Stratégie thématique de sécurité alimentaire", visant à atteindre "l'Objectif du Millénaire pour le développement"¹⁵. Depuis 2007, les programmes nationaux d'élimination de la pauvreté sont financés par l'Instrument de Coopération au Développement (ICD), l'Instrument Européen de Voisinage et de Partenariat (IEVP) et par le Fonds Européen de Développement (FED). Ces programmes concernent non seulement la sécurité alimentaire, mais aussi la coordination avec d'autres programmes thématiques, qui se réfèrent à l'investissement dans les ressources humaines, l'environnement, l'énergie. Le programme de sécurité alimentaire a traité également la sécurité alimentaire au niveau mondial, continental et régional ([European Commission, 2007](#)).

Bien que l'UE ait sa propre politique de sécurité alimentaire, les préoccupations en termes de sécurité alimentaire sont traitées au niveau global par les institutions européennes et les organisations internationales. Malgré qu'aujourd'hui, sont produit suffisamment aliments pour nourrir la population mondiale, à cause des chocs climatiques, des conflits armés, de la pauvreté, des fluctuations des prix, il existe encore de nombreux endroits où les habitants n'ont pas accès à une nourriture suffisante. Selon [Commission Européenne \(2018\)](#), il y a quatre façons à travers lesquelles les denrées alimentaires peuvent améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle : (i) Les aliments stockés peuvent être acheminés en permanence vers les ménages en situation d'insécurité alimentaire ; (ii) Les crises alimentaires peuvent être gérées en effectuant des transferts urgents vers les ménages en situation d'insécurité alimentaire ; (iii) Indépendamment du mode de stockage, l'agence d'acquisition des réserves alimentaires peut offrir des incitations aux agriculteurs afin d'investir dans la production alimentaire à moyen terme ; (iv) On élabore des instruments stabilisateurs sur les marchés régionaux et internationaux afin que les réserves alimentaires d'un pays puissent être utilisés par d'autres pays. Les réserves alimentaires combinées avec d'autres instruments peuvent être très utiles dans la lutte contre l'insécurité alimentaire à condition qu'une bonne gouvernance soit assurée (le choix minutieux de l'emplacement, la taille, la gestion et la composition des réserves alimentaires, assurer l'équité et la correctitude entre les acteurs du marché et les bénéficiaires).

L'agriculture produisant des biens échangés sur des marchés mondiaux, en augmentant sa productivité, sa durabilité et son efficacité, contribue par ce type d'échanges à résoudre le problème de la sécurité alimentaire dans différents endroits du monde ([Under-](#)

15. Une des cibles du premier objectif décidé lors du Sommet mondial de l'alimentation et du Millénaire visait à réduire de moitié la proportion de la population qui souffre de la faim entre 1990 et 2015 ([United Nations, 2011](#)).

wood et al., 2013). L'un des principaux défis consiste à accroître la production végétale et animale et la productivité agricole de manière à ne pas affecter la biodiversité et les conditions environnementales, ainsi que l'utilisation durable des ressources naturelles en termes d'adaptation au changement climatique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le terme intensification durable a été utilisé pour décrire ce double défi de l'augmentation de la productivité agricole et des services environnementaux dans un climat en constante évolution (Baulcombe et al., 2009; Foresight, 2011).

1.1.4 Politique climatique de l'UE

Dès le début des années 1990, l'Union Européenne a aspiré de jouer un rôle de premier plan dans la lutte mondiale contre le changement climatique (Van Schaik & Schunz, 2012; Bäckstrand & Elgström, 2013; Oberthür & Roche Kelly, 2008; Gupta & Grubb, 2000; Parker et al., 2017). Les efforts de l'UE pour développer une politique climatique mondiale ont connu quatre phases : (i) la conception de la Convention des Nations Unies sur le climat et du Protocole de Kyoto (1992-1997); (ii) la mise en œuvre du Protocole de Kyoto (1998-2005); (iii) la stratégie post-Kyoto (2005-2009) et (iv) l'ère post-Copenhague (2009-2012). L'UE et ses 28 États membres ont signé la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, en anglais, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)), adoptée en 1992 à Rio de Janeiro lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) et entrée en vigueur en 1994. Selon Bäckstrand & Elgström (2013), la convention représentait plutôt un compromis entre les États-Unis et l'Union Européenne, avec le but de stabiliser les gaz à effet de serre à un niveau de sécurité. Cependant, un principe important a été établi, à savoir le Principe «d'obligations communes mais différenciées» ce qui impliquait que les pays industrialisés soient moteurs dans l'atténuation du changement climatique, les pays en développement étant exemptés de réductions contraignantes des émissions. Cette participation très active de l'UE aux discussions internationales sur le changement climatique a représenté un stimulant pour l'élaboration de politiques internes sur le climat.

A l'heure actuelle, pour l'Union Européenne, la lutte contre le changement climatique est devenue une priorité. Afin de réaliser la transition vers une économie à faible émission de carbone, l'UE a défini diverses stratégies et objectifs, dont les plus importants sont :

- ◇ le Paquet sur le climat et l'énergie – 2020
- ◇ le Cadre pour le climat et l'énergie – 2030

◇ la Stratégie à long terme 2050

Ces paquets consistent dans un ensemble de lois visant à garantir que l'UE va atteindre les objectifs fixés en matière de climat et d'énergie dans la période prévue. En 2008, a été donc adopté le premier Paquet européen en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2020 caractérisé par trois objectifs principaux, connus sous le nom des objectifs "20-20-20" : (i) la réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990 ; (ii) l'augmentation de 20% du poids de l'énergie produite à partir de sources renouvelables ; (iii) l'amélioration de 20% de l'efficacité énergétique. Ils constituent également les principaux objectifs de la Stratégie Europe 2020 pour "*une croissance intelligente, durable et inclusive*" Décision No 406/2009/EC ([Official Journal of the European Union, 2009b](#); [European Commission, 2013b](#)).

Afin que l'UE puisse atteindre ces objectifs, des mesures dans plusieurs domaines sont nécessaires (voir Figure .1 dans les Annexes). *Le système d'échange de quotas d'émission de l'UE* (SEQE-UE) (en anglais, EU Emissions Trading System (EU ETS)), créé en 2005, représente le tremplin de la politique de l'UE en matière de changement climatique, concernant des secteurs représentant environ 45% des émissions de gaz à effet de serre de l'UE. Les entreprises désireuses d'augmenter leur activité avec un coût marginal d'émissions de CO₂ inférieur au prix du CO₂ peuvent acquérir des droits à émettre auprès d'entreprises ayant des coûts marginaux plus élevés que le prix du CO₂ et disposés à vendre des droits à émettre. Ces quotas sont plafonnés à un niveau qui diminue avec le temps afin de réduire les émissions mondiales. Chaque État Membre fixe des quotas d'émission pour ses propres activités, validées par la Commission Européenne. Les principales industries émettrices de gaz à effet de serre reçoivent des droits d'émission ou les achètent aux enchères. Lorsqu'une entreprise émet moins de CO₂ que les droits dont elle dispose, elle peut vendre le surplus. L'entreprise peut acheter des droits supplémentaires si elle veut augmenter son activité. Le système encourage les entreprises propres et stimule les pollueurs à adopter des méthodes de production plus respectueuses pour l'environnement. Le système agricole n'est pas couvert par le marché SEQE, mais il existe une connexion indirecte avec le système SEQE via la production de biogaz dans les installations d'énergie et par la production industrielle d'engrais azotés ([European Parliament, 2017](#)).

Une autre mesure prise dans ce sens est contenue dans les *Objectifs nationaux de réduction des émissions*, qui supposent que les États membres se sont fixé des objectifs annuels contraignants en matière de réduction des émissions dans les secteurs non-couverts par le marché SEQE (e.g. logement, agriculture, déchets et transport (hors aviation)). Ce mécanisme est basé sur une législation du partage de l'effort par les États membres pour

les périodes 2013-2020 et 2021-2030.

Les objectifs nationaux des émissions fixés dans le cadre du Paquet 2020, ont été prises en respectant la "Décision de partage d'effort" (en anglais, EU's Effort Sharing Decision (ESD)). Cependant, une certaine flexibilité est autorisée, les objectifs nationaux étant basés sur la richesse relative des États membres, mesurée par le Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant. Dans le secteur agricole, les efforts d'atténuation sont couverts par la Décision de partage des efforts au sein de l'Union Européenne, plus spécifiquement, les émissions couvertes sont celles autres que le CO₂ (par exemple, le CH₄ et le N₂O).¹⁶ Dans le cadre de ce mécanisme, les objectifs de réduction des émissions provenant de l'agriculture varient considérablement d'un État membre à l'autre. Selon [European Parliament \(2017\)](#), parmi les États dont le PIB par habitant est supérieur à la moyenne européenne, l'Irlande consacre 43% des émissions couvertes par ce mécanisme à l'agriculture, à l'opposé étant l'Autriche avec 13%. Parmi les États membres dont le PIB est inférieur à la moyenne européenne, en Lituanie, 35% de ces émissions sont attribuées à l'agriculture, à l'opposé, étant Malte avec 11%.

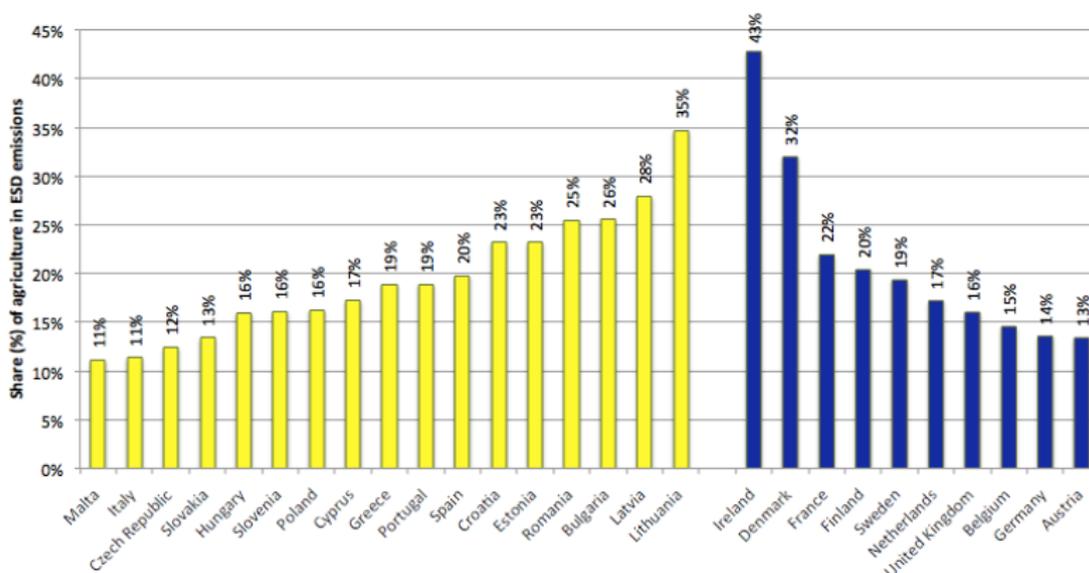


FIGURE 1.9. Le poids (%) de l'agriculture dans les émissions couvertes par la Décision de partage des efforts dans l'UE en 2015. Les États membres dont le PIB est supérieur à la moyenne européenne sont représentés par les barres bleues et les États membres dont le PIB est inférieur sont représentés par les barres jaunes.

Source : [European Parliament \(2017\)](#)

16. D'autre part, les émissions et les absorptions de CO₂ provenant des secteurs utilisateurs des terres sont couverts par la Décision relative à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie (en anglais, Land use, land-use change, and forestry (LULUCF)) ([European Parliament, 2017](#)).

Pour la période comprise entre 2021-2030, en 2014 a été approuvé le *Cadre stratégique pour le climat et l'énergie - 2030* qui a comme objectifs majeurs : (i) de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40% (par rapport aux niveaux de 1990); (ii) de porter la part des énergies renouvelables à au moins 27%; et (iii) d'améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 27%. Ensuite, en mai 2018 a été adopté *Le Règlement sur le partage de l'effort*¹⁷ (en anglais, Effort Sharing Regulation (ESR)) fondé sur les principes d'équité, du rapport coût-efficacité et d'intégrité environnementale. Le Règlement traduit les engagements pris en 2014 par les dirigeants de l'UE¹⁸ en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour chaque État membre pour cette période 2021-2030. Le règlement sur le partage de l'effort du Paquet climat et énergie 2030 continue de reconnaître les différentes capacités des États membres à agir en différenciant les objectifs en fonction de leur PIB par habitant.

A l'horizon 2050, en novembre 2018, la Commission Européenne a présenté sa vision stratégique à long terme pour une économie prospère, moderne, compétitive et climatiquement neutre. Surnommée la *Stratégie à long terme 2050*, elle vise : (i) une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 80% d'ici à 2050 par rapport à 1990; (ii) pour que l'objectif précédent soit atteint, une réduction de 40% d'ici à 2030 et 60% d'ici à 2040. La stratégie attire l'attention sur le fait qu'une contribution de tous les secteurs est requise pour obtenir les résultats souhaités, rendre possible la transition vers une économie à faible intensité de carbone. La Stratégie 2050 vise également à rendre l'orientation de la politique climatique et énergétique de l'UE compatible avec ses engagements dans le cadre de l'Accord de Paris ([European Commission, 2018](#)), qui constitue un pont entre les politiques actuelles et l'objectif à long terme de neutralité climatique fixé pour la fin du siècle.

L'Accord de Paris sur le changement climatique est un accord mondial adopté par 196 pays en décembre 2015 lors de la Conférence des Parties, ayant pour objectif principal de limiter le réchauffement climatique à une température inférieure à 2 degrés Celsius. Pour l'adoption de l'accord, la stratégie de négociation de l'Union Européenne a été déterminante ([European Commission, 2016b](#); [Parker et al., 2017](#)). Moins d'un an après son adoption, l'Accord devenait une loi internationale le 4 novembre 2016. L'accord est

17. RÈGLEMENT (UE) 2018/842 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 30 mai 2018 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris et modifiant le règlement (UE) no 525/2013.

18. Pour l'ensemble de l'économie, le cadre a fixé un objectif contraignant de réduction des émissions nationales avec au moins 40% d'ici 2030, par rapport à 1990. Les secteurs de l'économie non couverts par le SEQE devraient réduire leurs émissions avec 30% d'ici 2030 par rapport à 2005, représentant leur contribution à l'objectif global. Les secteurs couverts par le SEQE devront réduire leurs émissions de 43% comparé à 2005.

caractérisé par les éléments suivants (UNFCCC, 2016) :

- * Les gouvernements des États participants à la Conférence ont convenu à long terme de maintenir l'augmentation de la température moyenne au niveau mondial en dessous de 2 degrés Celsius, en poursuivant les efforts pour une limitation ambitieuse à 1.5 degrés Celsius ;
- * Les pays participant à la Conférence de Paris ont présenté des plans d'action nationaux sur la réduction des gaz à effet de serre ;
- * L'accord vise à renforcer la capacité des pays à faire face aux impacts du changement climatique ;
- * Dans le cadre de la Conférence, les gouvernements des États participants ont décidé de se rencontrer et communiquer leurs contributions tous les cinq ans ;
- * Afin d'assurer la transparence, les gouvernements ont convenu de s'informer mutuellement des résultats de leurs efforts pour atteindre les objectifs proposés ;
- * Les pays développés acceptent de fournir une aide aux pays en développement afin de faire face aux effets du changement climatique, ainsi que d'accorder le financement nécessaire pour le combattre ;
- * L'accord fait aussi référence au rôle des parties prenantes non-Party (y compris la société civile, le secteur privé, les villes, les autres autorités sous-nationales, etc) dans la lutte contre le changement climatique, étant invités à intensifier leurs efforts et à soutenir les actions visant à réduire les émissions.

Afin de donner une continuité aux décisions prises dans le cadre de l'Accord de Paris (COP21) qui a créé les lignes directrices mondiales de la lutte contre le changement climatique, le 7 novembre 2016, a été organisée la Conférence de Marrakech sur les changements climatiques (COP22), dont le but a été de démontrer que les engagements pris à Paris sont mis en pratique, de servir de catalyseur pour les actions futures et d'établir des modèles pour mettre en œuvre ces lignes directrices, dans un scénario qui est plus durable que celui en cours. La COP22 a été suivie par la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques 2017 à Bonn (COP23) et la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques 2018 (COP24) à Katowice, en Pologne.

Dans le contexte de l'Accord de Paris, Mitchell et al. (2018) considère qu'une limitation du réchauffement climatique à 1.5°C est encore faisable. Kriegler et al. (2018) trouve qu'une limitation de l'augmentation de la température en dessous de 1.5 degré ne sera possible que si la réduction d'émissions démarre sans délai et si le niveau des émissions reste inférieur à 800 GtCO₂. Cependant, une estimation des budgets de carbone

pour 1.5°C est caractérisée par une grande incertitude, étant comprise dans l'intervalle [100,900] GtCO₂, à compter de 2016. [Henry \(2018\)](#) affirme que l'utilisation de combustibles fossiles est en baisse dans de nombreuses régions du monde, les évolutions technologiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre gagnent du terrain et que, surtout les mesures politiques ont un rôle décisionnel essentiel.

En référence au secteur agricole, [Jensen et al. \(2018\)](#) apportent des améliorations au modèle AGLINK-COSIMO afin d'analyser les impacts d'une économie sobre en carbone dans ce secteur, montrant que, si les réductions d'émissions ne sont pas significatives, les impacts sur la production agricole sont considérables, en particulier au niveau pays. Ils soulignent également la nécessité des approches politiques plus différenciées et complexes pour le secteur agricole, principalement en termes de transfert et changements dans la technologie en ce qui concerne les réductions d'émissions.

La tarification du carbone

Lors des discussions et des négociations internationales, l'introduction d'un prix du carbone commence à gagner du terrain. Selon [World Bank Group \(2018\)](#), un progrès important en matière de tarification du carbone a été réalisé lors du Sommet One Planet en 2017 à l'occasion du deuxième anniversaire de l'adoption de l'Accord de Paris. Ainsi, l'un des 12 engagements en ce qui concerne la lutte contre le changement climatique, a été représenté par le prix du carbone. À cette occasion, plusieurs pays au niveau international se sont engagés à utiliser des taxes du carbone plus élevées.

Dans l'Union Européenne, un exemple de succès de taxation du carbone est représenté par la Suède qui depuis 1991, pratique une politique climatique qui taxe les émissions d'énergie dans plusieurs secteurs, l'industrie, l'agriculture, les transports et les bâtiments. Actuellement, la taxe appliquée en Suède est de 120 €/tCO₂eq ([Adelphi, 2018](#)).

Bien que le mécanisme de tarification du carbone (taxe carbone ou systèmes d'échange d'émissions) commence à prendre de l'ampleur tant au niveau européen qu'au niveau international, l'agriculture est toujours exclue des politiques climatiques, malgré sa part importante dans les émissions totales de GES.

1.1.5 Politique énergétique de l'UE - promotion de l'utilisation des énergies renouvelables

La politique énergétique de l'Union Européenne a débuté dans les années 1950 dans un vide juridique¹⁹. Les principales sources d'énergie des pays de la Communauté Européenne à ces débuts étaient les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire²⁰. En 1951, par le Traité de Paris, a été instituée la Communauté Européenne du charbon et de l'acier (CECA)²¹, qui comprenait six pays européens : la France, l'Allemagne de l'Ouest, l'Italie, la Belgique, les Pays-Bas et Luxembourg. Son objectif principal était de départager les ressources d'acier et charbon des États fondateurs et d'organiser leur libre circulation. Ce traité est entré en vigueur en 1952 et a expiré après 50 ans, en 2002. En 1957, avec la création de la Communauté Économique Européenne (CEE), est également entré en vigueur le Traité instituant la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM)²² à la suite de la crise pétrolière de Suez en 1956. Son objectif était de réduire la dépendance des pays membres vis-à-vis du pétrole importé du Moyen-Orient.

À la suite de plusieurs incidents nucléaires, du fait de coûts miniers élevés et à cause des fluctuations des prix du pétrole, il a fallu adopter une politique énergétique commune dans les années 1970. En 1974, le Conseil de la CEE a adopté une résolution sur une stratégie de politique énergétique. Toutefois, même en 1987, par l'Acte Unique Européen, le secteur énergétique n'avait aucun avantage particulier, parce que certains gouvernements des États membres n'étaient pas disposés à renoncer aux monopoles nationaux d'énergie. En 1992, à la suite du traité de Maastricht, des compléments ont été apportés aux problèmes existants en créant un cadre juridique permettant de définir le concept de marché intérieur de l'énergie (Bell et al., 2013). En 2006 la Commission élaborant un Livre Vert sur une nouvelle politique énergétique de l'UE proposant de mieux atteindre des objectifs clés tels que : la compétitivité énergétique sur le marché intérieur, la lutte contre le changement climatique et la sécurité de l'approvisionnement énergétique dans un contexte mondial²³.

Au fil du temps, la législation énergétique de l'UE a considérablement évolué,

19. Le vide juridique désigne l'absence de normes législatives dans un certain cas.

20. En 1956, la France met en place le premier réacteur nucléaire en Europe qui produit de l'énergie électrique. Une étape de développement et d'industrialisation rapide de l'énergie nucléaire a lieu dans la seconde moitié des années 1960, en particulier en Europe et aux États-Unis. Voir <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-energie-nucleaire-a-z-126/page/2/>

21. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0022>

22. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0024>

23. COM(2006) 105 final. Livre vert : une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable.

principalement afin d'atteindre les objectifs climatiques. La politique énergétique européenne cherche donc à développer les énergies renouvelables (Article 194 dans [Official Journal of the European Union \(2012\)](#)) comme alternative aux combustibles fossiles afin de réduire les émissions de CO₂ dues à la combustion. La palette d'énergies renouvelables susceptibles d'être produites et consommées dans l'UE est large : solaire (pour produire de la chaleur directe ou de l'électricité), éolienne, hydroélectrique, géothermique, marémotrice et biomasse.

Les principaux objectifs de la directive 2009/28/CE sur les énergies renouvelables ([Official Journal of the European Union, 2009c](#); [European Parliament, 2019a](#)) supposent que 20% de la consommation énergétique totale au niveau UE d'ici 2020 provienne de sources renouvelables. En outre, d'ici 2020, le Conseil Européen a également défini un objectif minimal contraignant pour tous les États membres, à savoir 10% de la consommation d'essence et de diesel pour le transport d'être remplacée par des biocarburants. Dans le cadre de cette directive, le Conseil Européen attire l'attention sur la nécessité d'évaluer les impacts potentiels de la production de biocarburants sur l'environnement et sur la production de produits agro-alimentaires. L'article 74 de la directive 2009/28/CE met en relief le fait que, pour respecter les conditions environnementales, il est nécessaire de croiser la Directive sur les énergies renouvelables avec la Directive-cadre sur l'eau afin de protéger l'agriculture et la qualité des eaux souterraines et de surface.

Il apparaît essentiel de rendre cohérents les objectifs de la directive sur les énergies renouvelables et les autres politiques communautaires, en particulier les politiques agricole, climatique, environnementale et de sécurisation du niveau de la production agricole. En raison de l'augmentation de la demande de produits agricoles au niveau mondial, il est nécessaire que la productivité du secteur agricole augmente, ainsi que les surfaces des terres destinés à l'agriculture. De plus, l'augmentation de la demande de biocarburants nécessitera une augmentation nette de la demande de cultures, donc une augmentation nette de la surface cultivée²⁴. Ce point est discuté en particulier dans la dimension du changement indirect de l'utilisation des terres (indirect land use change ou ILUC), car lorsque les cultures destinées à la production de biocarburants occupent les terres destinées à la production de cultures alimentaires, peut entraîner leur déplacement dans des zones inexploitées avant. Cela entraînerait un changement dans l'utilisation des sols, ce qui conduirait à la libération d'une quantité importante d'émissions de CO₂ dans l'atmo-

24. Cela pourrait affecter la quantité de carbone stockée dans le sol. Pour réduire ce risque, il est nécessaire d'accroître la productivité agricole sur des terres déjà cultivées et de continuer à utiliser les terres dégradées. Conformément à l'article 85 de la DIRECTIVE 2009/28/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE.

sphère.

Au fil du temps, dans de nombreux domaines politiques de l'UE, les énergies renouvelables sont devenues une priorité transversale essentielle. Le nouveau programme énergie et climat, adopté par le Conseil Européen en 2014, stipule que d'ici 2030, au moins 27% de la production énergétique de l'UE doit provenir de sources renouvelables. Pour encourager les États membres à produire et à utiliser des énergies renouvelables, plusieurs schémas de soutien et programmes de financement européens ou nationaux ont été mis au point. Ainsi, au niveau national, pour atteindre leurs objectifs en matière d'énergie, les États membres recourent à diverses mesures économiques, telles que des incitations financières (primes ou tarifs fixes) et d'autres mesures (certificats verts commerciaux). Au niveau européen, le soutien est fourni par le Fonds Européen de développement régional (FEDR), le Fonds Européen agricole pour le développement rural (FEADER), ainsi que par les programmes de recherche Horizon 2020 et LIFE.

1.2 L'interdépendance entre le changement climatique et l'agriculture

1.2.1 La réalité du changement climatique

Le changement climatique est considéré comme l'un des phénomènes les plus importants pouvant affecter l'humanité à moyen et long terme, raison pour laquelle, depuis le XIXe siècle, les scientifiques se sont intéressés à étudier tous les aspects du climat (T Pierrehumbert, 2005). À la fin du XXe siècle, les premiers signes de modification de l'équilibre naturel ont été observés. Le réchauffement climatique pose deux problèmes majeurs à l'humanité : d'une part, trouver des solutions afin de stabiliser le niveau de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère par une réduction significative des émissions de ces gaz et, d'autre part, la mesure des coûts d'adaptation au changement climatique. Les dernières observations scientifiques sur les causes du changement climatique et leurs impacts à court, moyen et long terme ont été présentés dans le cinquième rapport mondial d'évaluation du climat du AR5 préparé par "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC, 2014) dans son rôle d'organisme scientifique chargé d'évaluer les risques liés au réchauffement de la planète dus aux effets de l'activité humaine. La communauté scientifique internationale a pleinement accepté le phénomène de réchauffement climatique résultant d'une analyse de données d'observation à long terme. Les simulations effectuées indiquent que les principaux facteurs à l'origine de ce phénomène sont à la fois naturels (rayonnement solaire, activités volcaniques, etc.) et anthropogènes (dus aux activités humaines). Selon le AR5 du GIEC, les dernières décennies sont caractérisées par un réchauffement intense à la surface de la Terre par rapport aux décennies précédentes depuis 1850. Afin de réduire les risques de changement climatique, l'adaptation et l'atténuation sont présentées comme des stratégies complémentaires sans lesquelles les émissions mondiales augmenteraient dans le contexte de la croissance démographique et, implicitement, des activités économiques. En raison de l'augmentation de plus en plus rapide de la température terrestre en Europe au-dessus de la température moyenne mondiale, au cours des dernières décennies dépassant de 1.3 °C le niveau préindustriel, European Commission (2013a) attire l'attention sur la nécessité de limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C au-dessus du niveau préindustriel et sur l'importance d'une Stratégie européenne face au changement climatique.

La relation existante entre l'agriculture et le changement climatique est très étroite. Dans un sens, la production agricole dépend du climat, plus précisément de ses caractéris-

tiques clés (précipitations, température, concentration en CO₂, luminosité). Dans le sens opposé, ces activités ont un impact sur le changement climatique du fait de la libération de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cependant, le secteur agricole peut aider à maîtriser les effets du changement climatique, par exemple en jouant le rôle de puits de carbone, avec le stockage du carbone dans les sols.

Dans un premier temps, nous traiterons l'impact de l'agriculture européenne sur les émissions de GES et ensuite nous allons illustrer les impacts du changement climatique sur l'agriculture de l'UE et les conséquences qui en découlent.

1.2.2 Impacts de l'agriculture européenne sur le changement climatique

Selon [European Environment Agency \(2018\)](#), en 2016, l'agriculture a représenté le deuxième secteur émetteur de GES dans l'UE28 (10% des émissions totales). L'énergie est le secteur responsable de la plus grande quantité d'émissions de GES au niveau UE (78%). Les processus industriels représentent 9% des émissions et les déchets contribuent avec 3%, étant les moins polluants (voir Figure 1.10). Ces pourcentages sont calculés sans tenir compte du UTCATF (Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie)²⁵, qui, en 2016, était de 291 millions de tonnes de CO₂, compensant environ 7% du total des émissions des autres secteurs.

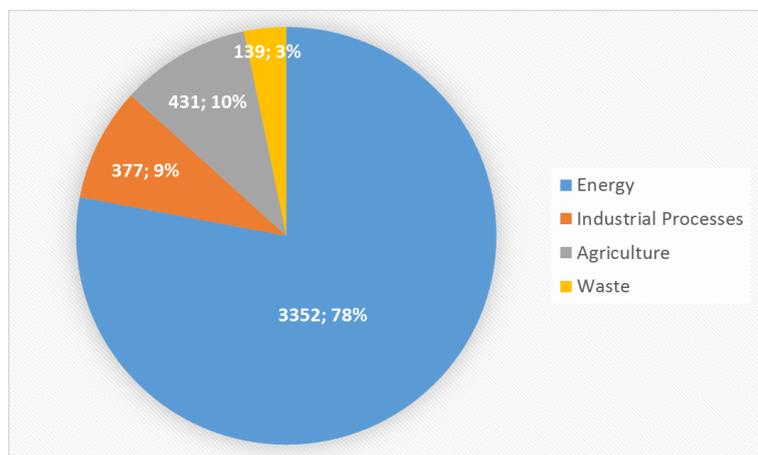


FIGURE 1.10. La quantité d'émissions (en MtCO₂eq et en pourcentage %) par source en 2016, excluant LULUCF, dans l'UE28 et l'Islande. *Source : Calculs personnels, données provenant de [European Environment Agency \(2018\)](#)*

25. UTCATF (en anglais, LULUCF (Land use, land-use change, and forestry)) couvre les émissions anthropiques de GES et les absorptions de CO₂ résultant des pratiques de gestion des terres. Selon [Official Journal of the European Union \(2018\)](#), ce secteur se caractérise par un potentiel important en termes des bénéfices climatiques à long terme, pouvant contribuer de manière significative à la réalisation des objectifs climatiques fixés dans le cadre de l'Union et de l'Accord de Paris.

Les émissions de GES provenant de l'agriculture européenne ont diminué de 20.6% (112 MtCO₂) entre 1990 et 2016 (voir Figure 1.11). Les tendances en matière de réduction des émissions provenant de l'agriculture résultent dans une large mesure de l'amélioration de l'efficacité des pratiques agricoles (par exemple, techniques améliorées d'application d'engrais et stockage amélioré du fumier), de la diminution du nombre d'animaux, de la mise en œuvre de la Directive sur les nitrates et l'encouragement de la Politique Agricole Commune et ses réformes récentes, en établissant un lien entre les paiements directs d'aide aux agriculteurs et le respect des conditions environnementales.

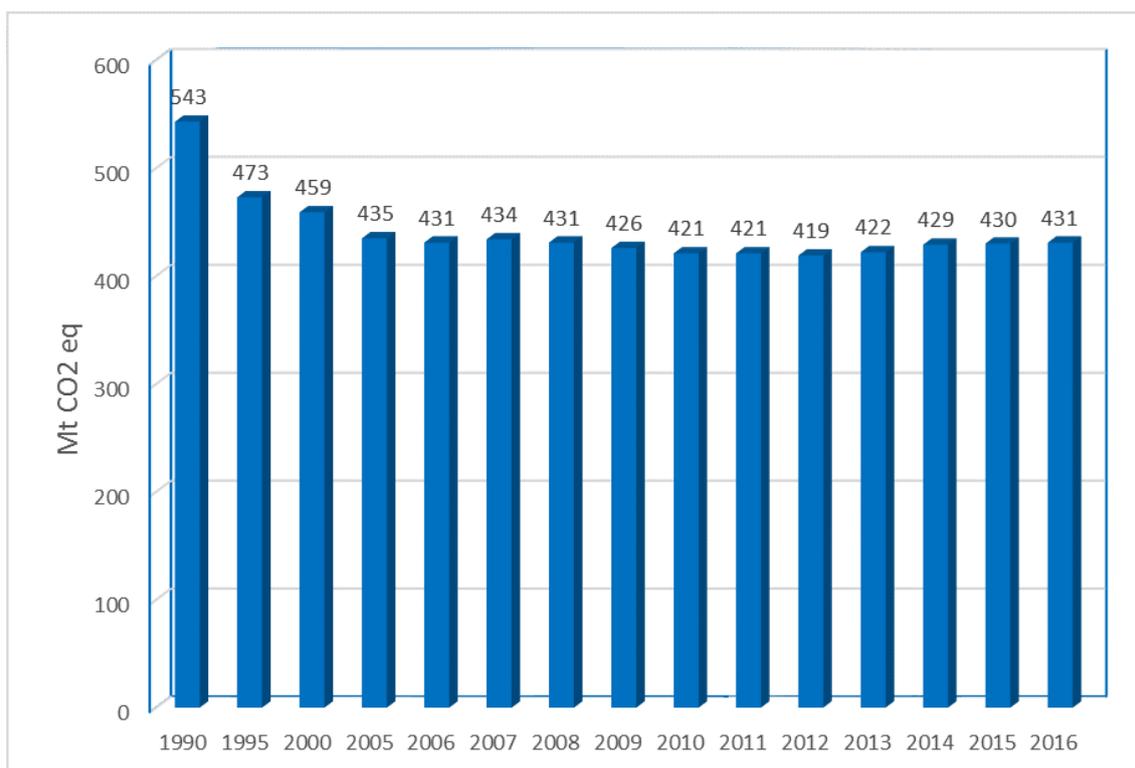


FIGURE 1.11. Aperçu des émissions de GES provenant de l'agriculture, dans l'UE28 et l'Islande (en MtCO₂eq) pour la période 1990-2016. *Source : Calculs personnels, données provenant de [European Environment Agency \(2018\)](#)*

Le secteur zootechnique, par les effectifs des animaux, par les modes d'alimentation et par les modes de gestion des effluents, contribue significativement aux émissions de GES avec 80% des émissions agricoles totales et environ 12% des émissions totales anthropiques. En utilisant le modèle GLOBIOM, [Havlik et al. \(2014\)](#) montrent qu'une transition des systèmes de production animale extensifs à des systèmes plus productifs peut jouer un rôle clé dans la réduction des émissions de GES.

En 2009, l'UE a pris l'engagement de réduire ses émissions totales de GES d'au moins 20% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2020. Malgré l'absence des instruments politiques pour stimuler la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de

l'agriculture, le secteur agricole contribuerait à respecter les engagements de l'UE pour réduire les émissions GES d'ici 2050. La contribution de l'agriculture réside dans l'effet de la gestion des terres sur la séquestration du carbone dans les sols ainsi que le changement d'utilisation des terres sur une grande partie du territoire européen (European Commission, 2008, 2011c, 2012).

En fonction des conditions climatiques et environnementales, des systèmes agricoles dominants, de la taille et l'importance du secteur agricole, la part des émissions provenant de l'agriculture varie considérablement d'un État membre à l'autre (European Environment Agency, 2012). La tendance générale des émissions agricoles de GES dans l'UE est dominée par les deux principaux producteurs d'émissions agricoles (la France et l'Allemagne) représentant un tiers des émissions agricoles totales européennes en 2016. Ces deux États membres de l'UE ont réalisé ensemble une réduction de 20.6 MtCO₂eq en 2016 par rapport à 1990, ce qui représente un sixième de la réduction totale des émissions agricoles (112 MtCO₂eq). Le Royaume-Uni et l'Espagne sont les troisième et quatrième émetteurs de gaz à effet de serre d'origine agricole, avec un total de 76.4 MtCO₂eq, en 2016, presque autant que la quantité émise par la France. Par rapport à 1990, ces deux pays ont réalisé conjointement une réduction de 7.6 MtCO₂eq, presque autant que la réduction faite par la France, de 6.42 MtCO₂eq (voir Figure 1.12).

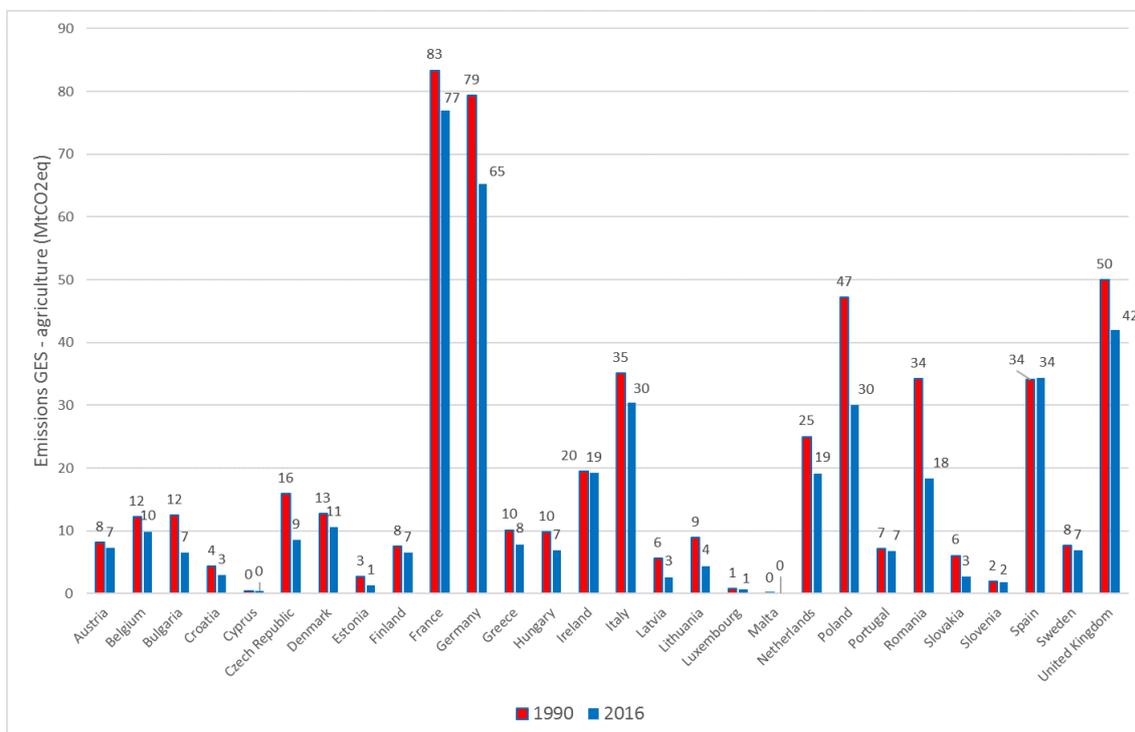


FIGURE 1.12. Quantité des émissions de GES provenant de l'agriculture (en MtCO₂eq), pour chaque État Membre de l'UE28, en 1990 et 2016. *Source : Calculs personnels, données provenant de UNFCCC - GHG Data Interface*

Les émissions provenant de l'agriculture sont associées à la fois à des processus biologiques qui émettent naturellement des gaz à effet de serre et à des processus anthropique via les activités économiques. Dans le secteur agricole, les émissions de gaz à effet de serre proviennent en grande partie du méthane (CH₄) 55.1%, oxyde d'azote (N₂O) 42.4% et dioxyde de carbone (CO₂) 2.5% (European Environment Agency, 2018). Les émissions de méthane proviennent de la fermentation entérique des animaux, de la gestion du fumier, de la riziculture et le brûlage sur place des résidus agricoles. Dans le cas de l'oxyde d'azote, les principales sources sont les sols agricoles et la gestion du fumier. La part la plus élevée des émissions agricoles totales est constituée des émissions de méthane de la catégorie "Fermentation entérique" (44.6%), suivies des émissions de N₂O de la catégorie "Sols agricoles" (37.13%) (Figure 1.13).

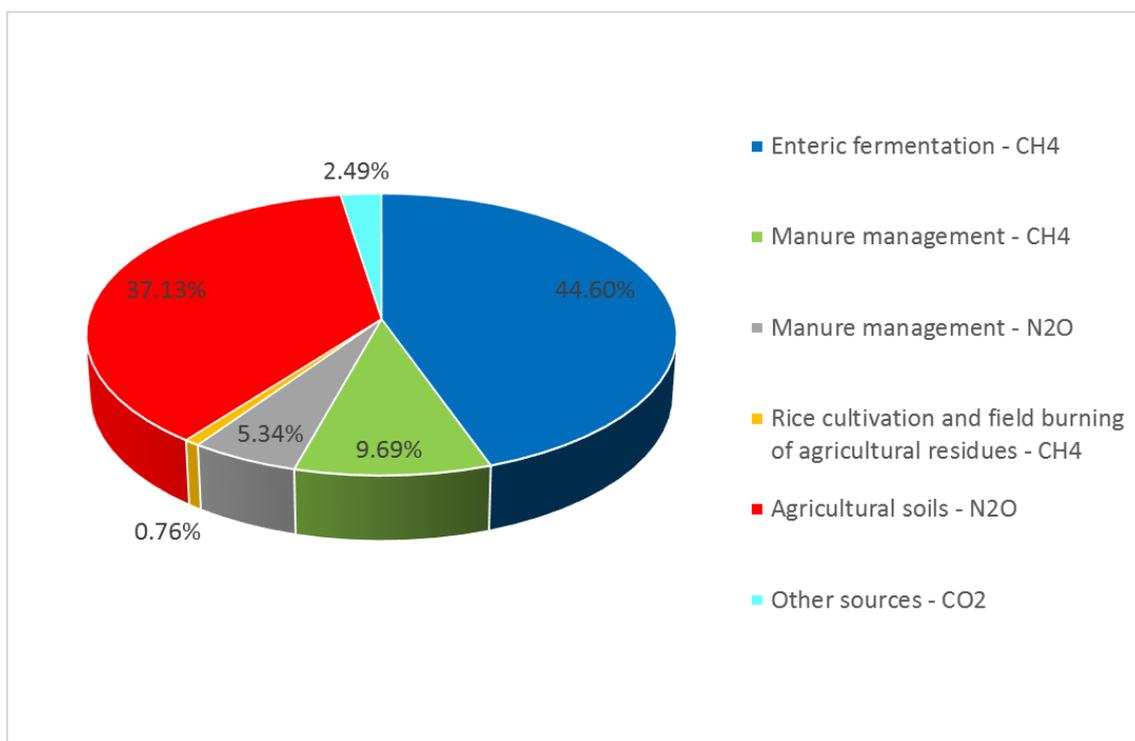


FIGURE 1.13. Les principales sources et les parts des émissions de GES dans le secteur agricole de l'UE-28 en 2016. *Source : Calculs personnels, données provenant des inventaires nationaux soumis en 2018 à UNFCCC par chaque État membre*

L'agriculture peut contribuer à atténuer le changement climatique par :

- ◇ la production de biogaz à partir de déchets animaux. En dépit des coûts élevés, cette option peut être très efficace pour réduire le méthane, en particulier dans les régions à forte densité d'animaux. À cette fin, des investissements sont financés par les fonds de développement rural de l'UE.
- ◇ la fourniture de services environnementaux. En tant que fournisseur de services écologiques, l'agriculture peut atténuer les effets du changement climatique grâce

à diverses mesures telles que une utilisation efficace de l'eau dans les zones sèches, un maintien multifonctionnel des terres agricoles, gestion des inondations.

- ◇ l'utilisation à grande échelle de l'agriculture écologique. L'agriculture écologique utilise moins d'énergie que l'agriculture conventionnelle. Le Plan Européen d'action sur l'alimentation et la nutrition, vise à soutenir le développement de l'agriculture écologique.
- ◇ la séquestration du carbone dans le sol. L'agriculture et les forêts sont les principaux secteurs de captage du CO₂ résultant des activités humaines, du stockage et de la fixation par photosynthèse. Ces secteurs ont un potentiel important dans les efforts d'atténuation du réchauffement climatique. En stockant du carbone dans le sol, on peut retirer des quantités importantes de CO₂ de l'atmosphère. Ceci peut être réalisé par un éventail de pratiques agricoles, telles que l'agriculture organique, la plantation d'arbustes, l'entretien des prairies permanents et la transformation de terres arables en pâturages.
- ◇ la fourniture des ressources renouvelables durables pour les bioénergies. La biomasse agricole produit des bioénergies qui peuvent remplacer les combustibles fossiles.
- ◇ l'innovation dans les activités agricoles peut jouer un rôle important dans la réduction de l'impact de l'agriculture sur le changement climatique et l'environnement.
- ◇ l'encouragement par la Politique Agricole Commune de pratiques (e.g. la plantation, la récolte, l'arrosage, la fertilisation des cultures existantes, l'utilisation de différentes variétés, la diversification des cultures) contribuant à améliorer l'efficacité de l'agriculture et son potentiel d'atténuation des émissions de GES.
- ◇ la réduction des émissions d'oxydes d'azote grâce à une utilisation plus efficace des engrais azotés.

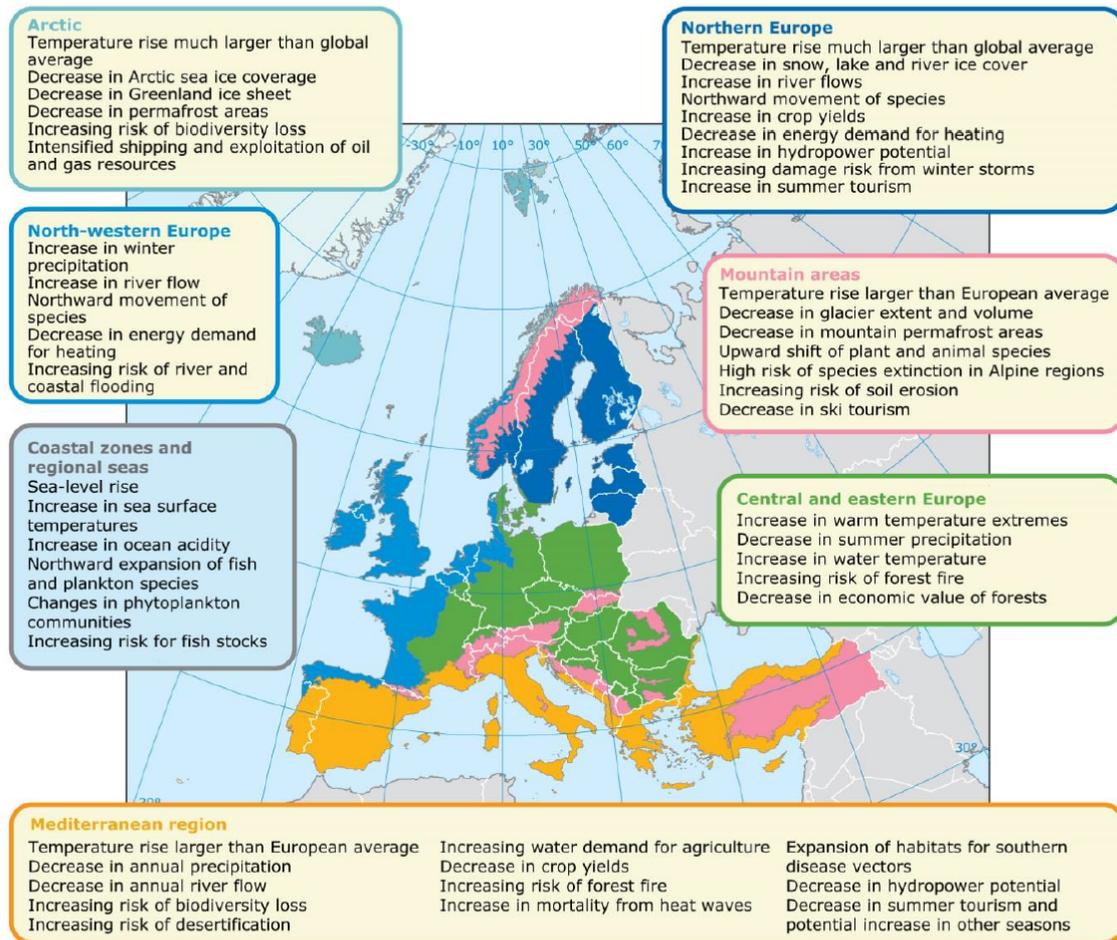
Dans le secteur agricole, l'augmentation de la productivité a pu être maintenue et même augmentée grâce aux mesures d'adaptation au changement climatique ([Gornall et al., 2010](#)). Les agriculteurs se sont efforcés de s'adapter en permanence au changement climatique et ont tenté de réagir le plus rapidement possible à l'aide de diverses méthodes, telles que la modification des technologies de travail et des pratiques de management (e.g. l'utilisation des méthodes d'irrigation plus efficaces, des "climate-smart inputs"). Les agriculteurs ont également recours à des calculs coûts-bénéfices, en tenant compte des risques supplémentaires qui pourraient être causés par le changement climatique ([OECD, 2015](#)).

1.2.3 Les impacts du changement climatique sur l'agriculture de l'UE

Les effets du changement climatique sur l'agriculture européenne seront ressentis principalement au niveau de la production agricole directement influencée par les conditions météorologiques extrêmes (e.g. augmentation de la température, niveau de précipitations, tempêtes, sécheresse) ([Official Journal of the European Union, 2011](#)). [Shrestha et al. \(2013\)](#) utilisent le modèle CAPRI pour analyser les effets économiques à moyen terme du changement climatique sur l'agriculture de l'UE, montrant qu'ils seront à la fois des gagnants et des perdants. Si certaines régions vont bénéficier d'un ajustement de la production agricole en raison du changement climatique, d'autres régions seront affectées négativement à la fois en termes de bien-être et de production. [Leclère et al. \(2013\)](#) utilisent un cadre de modélisation couplant le modèle AROPAj et le modèle STICS et montrent que qu'avec l'adaptation au changement climatique, toutes les régions agricoles pourraient dans une certaine mesure être des gagnants, en déplaçant le problème vers les besoins d'irrigation. Selon les auteurs, les adaptations autonomes à l'échelle des exploitations atténuent considérablement les effets négatifs sur les rendements des cultures et les marges brutes et augmentent considérablement les niveaux de production européens. Ainsi, la plupart des études montrent que la localisation géographique peut jouer un rôle important, certains effets du changement climatique pouvant être bénéfiques pour certaines régions, notamment celles dans l'Europe du Nord, mais la plupart des effets du réchauffement global seront adverses, affectant déjà une grande partie des régions. Cet effet inégal du changement climatique met en lumière les disparités existantes entre les régions rurales de l'Union Européenne, tout en amplifiant le risque d'abandon des terres. Ainsi, les impacts adverses du changement climatique se font sentir différemment dans l'Europe (voir [Figure 1.14](#)), toutes les régions étant touchées, mais le niveau d'intensité est différent. En raison du risque potentiel de pénurie d'eau, les régions les plus vulnérables seront celles du Bassin Méditerranéen et de l'Europe du Sud. Tout aussi vulnérables sont les zones montagneuses où l'augmentation de la température pourrait provoquer la fonte massive de la neige et un changement des vallées des rivières, tout cela pouvant conduire à la détérioration des terres agricoles et des zones habitables.

Un des plus gros impacts du changement climatique sur l'agriculture est causé par **le problème de l'eau** ([Aydinalp & Cresser, 2008](#)). Ainsi, en raison de la réduction de la quantité des précipitations estivales, en particulier dans les régions du sud et centre de l'Europe, les cultures agricoles sont compromises. Dans de nombreux pays de l'UE, en particulier dans les zones touchées par la sécheresse, l'irrigation est pratiquée. Il convient de noter que l'agriculture doit s'efforcer pour rationaliser l'utilisation de l'eau afin de réduire les pertes, et les plans d'irrigation doivent être soigneusement planifiés pour atténuer

Key observed and projected climate change and impacts for the main regions in Europe



Source: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, An indicator-based report, European Environment Agency

FIGURE 1.14. Les impacts projetés du changement climatique dans différentes parties de l'Europe.

l'impact du réchauffement planétaire.

L'augmentation de la fréquence d'événements **météorologiques extrêmes** tels que les inondations, la grêle, les vagues de chaleur, la sécheresse a été ressentie dans toute l'Europe, en particulier la dernière période. En raison du réchauffement climatique, l'évaporation augmente, entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations (European Environment Agency, 2012). Les faibles précipitations estivales et la sécheresse extrême augmentent la fréquence et l'ampleur des incendies. Le changement climatique, tant au niveau des précipitations que de la température, peut affecter la structure du sol. Dans le même temps, la capacité du sol à modifier les substances nutritives et à maintenir la matière organique et l'eau est réduite.

La plupart des études concernant l'impact du changement climatique sur l'agriculture ont fait référence à la production végétale et moins à l'impact sur les animaux (Hjerp et al., 2012). La **distribution et le rendement des cultures** seront significativement affectés par les variations extrêmes des conditions climatiques, qui se manifesteront dans le niveau de la production agricole, dans la gestion de l'élevage, l'approvisionnement avec des produits alimentaires sur le marché intérieur dans certaines régions de l'UE, tous ces facteurs pouvant entraîner une augmentation de l'instabilité des prix et un risque accru pour les revenus des agriculteurs. Le changement climatique, par la modification du cycle de production et de la période de développement des cultures, par l'augmentation du nombre d'événements extrêmes imprévisibles, affecte la productivité des cultures dans l'espace européen (European Environment Agency, 2012). L'augmentation de la température a entraîné une augmentation de la période de végétation pour certaines cultures, conduisant à des rendements plus élevés, tandis que pour d'autres cultures, y compris les céréales, l'augmentation de la température a une influence négative en raison de la réduction de la quantité d'eau pendant la période de croissance. Les facteurs de restriction, tels que l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques, augmentent l'incertitude sur la survie des cultures, ce qui détermine les agriculteurs à investir moins dans l'agriculture (Hart et al., 2013). En outre, l'élévation de la température conduit à un déplacement vers le nord pour certaines cultures qui étaient autrefois répandues dans le sud de l'Europe, ayant ainsi lieu une compensation de la production agricole à travers l'Europe (European Environment Agency, 2010, 2012; Bowyer & Kretschmer, 2011). La sécheresse et les températures élevées ont entraîné une faible production en Europe centrale et du Sud (Maracchi et al., 2005; Trnka et al., 2011b,a).

Les effets du changement climatique toucheront également les consommateurs. L'augmentation de la température, en particulier pendant la saison de développement des cultures, peut influencer considérablement les productions agricoles, et avec eux, les revenus agricoles et la sécurité alimentaire (Battisti & Naylor, 2009). Dans certains États membres, une productivité réduite, une variabilité de la production et éventuellement une augmentation des coûts supportés par les agriculteurs auront des conséquences négatives sur les consommateurs, du fait de la variation du prix des produits agricoles.

1.3 Mise en œuvre de la coordination des politiques publiques dans l'UE

1.3.1 Lien entre la Politique agricole commune et l'environnement

La relation étroite entre l'agriculture et l'environnement a conduit la Politique Agricole Commune à s'adapter de plus en plus en intégrant les préoccupations environnementales, afin de rendre durable une agriculture fondée sur une gestion pérenne des ressources naturelles. Cet enjeu est très important, étant donné que près de la moitié du territoire de l'UE est couverte de terres agricoles, comprenant à la fois des terres arables et des prairies permanentes.

Toute politique a des effets sur l'environnement (Benson & Jordan, 2015). L'impact des politiques agricoles sur l'environnement est toujours difficile à évaluer en tenant compte du fait que toute mesure politique n'agit pas de manière isolée, mais s'inscrit dans un contexte économique large, qui, en même temps, doit tenir compte du cadre spécifique de chaque pays. En utilisant le modèle Stylised Agri-environmental Policy Impact Model (SAPIM), OECD (2010) attire l'attention sur l'importance d'une bonne connaissance par les décideurs publics, des liens entre les impacts environnementaux et les instruments de la politique agricole, en particulier en ce qui concerne les émissions de GES et le changement climatique, l'hétérogénéité des ressources plus ou moins disponibles, la structure de l'agriculture, la complexité des processus biophysiques, la variabilité des conditions météorologiques ou le contexte qui caractérise chaque région. Ainsi, la compréhension des liens entre l'agriculture et l'environnement est devenue essentielle pour la mise en œuvre de politiques agricoles et environnementales, l'agriculture étant toujours étroitement associée à l'environnement, en raison de son impact majeur sur l'utilisation des terres, des sols, de l'eau ou de la biodiversité.

1.3.1.1 Influence des instruments de la PAC sur l'environnement

La Politique Agricole Commune veille à ce que ses mesures et ses règles soient compatibles avec les exigences environnementales, en promouvant des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement et en encourageant les agriculteurs à travailler de manière durable pour l'environnement et maintenir les sols et la biodiversité. À cet égard, trois plans d'action pour protéger la richesse rurale de l'UE ont été établies par la PAC : (i) *la gestion du changement climatique*, (ii) *la gestion de l'eau et du sol*, (iii)

la préservation de la biodiversité et des pratiques agricoles naturelles respectueuses de l'environnement.

La PAC a une grande influence sur l'environnement grâce à ses instruments. Ainsi, la PAC intègre les préoccupations environnementales dans ses deux piliers à travers des mesures et instruments spécifiques à chacun :

- Dans le but d'améliorer les performances environnementales de l'agriculture européenne, dans le cadre de la réforme PAC de 2013, a été introduit un nouvel instrument dans le système des paiements directs du premier pilon, qui a commencé à être pleinement mis en œuvre en 2015. Il s'agit des **paiements directs verts**²⁶ en tant qu'innovation majeure qui s'appliquerait à la grande majorité des exploitations commerciales soutenues par la PAC et la plupart des terres agricoles. Cet instrument sera décrit ci-dessous dans cette sous-section.
- Les **mesures de développement rural** liées à l'environnement ont le rôle d'inciter à mettre en œuvre des pratiques bénéfiques pour l'environnement dans le cadre de contrats pluriannuels. Ces mesures se réfèrent en particulier à l'utilisation de programmes agro-environnementaux, de mesures agro-environnement-climat, mesures d'agriculture biologique. Les programmes nationaux et régionaux répondent aux besoins et défis spécifiques des zones rurales. Même s'il existe de grandes différences entre les pays, les problèmes environnementaux revêtent désormais une importance accrue dans la Politique Agricole Commune. Afin de fournir une incitation à une bonne supervision et au contrôle par les autorités locales, le Pilier 2 de la PAC est cofinancé par les États membres contrairement au Pilier 1 financé uniquement par le budget européen (Bureau et al., 2012).
- La **conditionnalité** a le rôle de conditionner le paiement intégral du soutien de la PAC au respect de certaines règles. Il s'agit à la fois d'un ensemble d'obligations statutaires de gestion fondées sur la législation environnementale de l'UE concernant l'eau, la biodiversité, ainsi que de plusieurs règles définies par les États membres qui sont relatives aux bonnes conditions agricoles et environnementales de la terre. Les agriculteurs sont ceux qui doivent supporter les coûts des exigences imposées par la conditionnalité. Lorsque des infractions à ces règles sont commises, la conditionnalité entraîne une réduction du soutien offert par la PAC.

Le schéma des paiements directs verts ne fonctionne pas de manière isolée, il complète les autres instruments et mesures de la PAC qui ciblent l'environnement (voir

26. RÈGLEMENT (UE) No 1307/2013 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 17 décembre 2013 établissant les règles relatives aux paiements directs en faveur des agriculteurs au titre des régimes de soutien relevant de la politique agricole commune et abrogeant le règlement (CE) no 637/2008 du Conseil et le règlement (CE) no 73/2009 du Conseil.

Figure 1.15). Cependant, chacun de ces instruments a une fonction différente et un rôle bien établi, soutenant l'écologisation de la PAC dans son ensemble.

La composante écologique des paiements directs se base sur les exigences en matière de conditionnalité qui ont été implémentées depuis 2005. En collaboration avec la conditionnalité, elle constitue aussi la base pour les paiements de programmes de développement rural (PDR). En fait, les règles de conditionnalité font partie du "niveau de référence" pour les mesures volontaires agro-environnement-climat financées au titre des PDR. Pour éviter le risque d'un double financement qui peut se produire entre les paiements directs verts et les paiements agro-environnement-climat, le soutien financier pour ces mesures est calculé différemment. Dans le cas des mesures de développement rural, le soutien accordé aux agriculteurs est calculé en fonction des coûts supplémentaires et de revenus perdus en raison de la gestion de l'environnement par rapport à un niveau de référence, incluant les règles établies par la loi. Contrairement aux mesures de développement rural liées à l'environnement, dans le cas des paiements directs verts, les paiements sont déterminés à un niveau standard estimé pour être suffisants afin de respecter en totalité les mesures, tout en stabilisant les revenus des agriculteurs. Ces paiements ne correspondent pas au revenu perdu et aux coûts supplémentaires liés à la mise en œuvre de pratiques de verdissement.

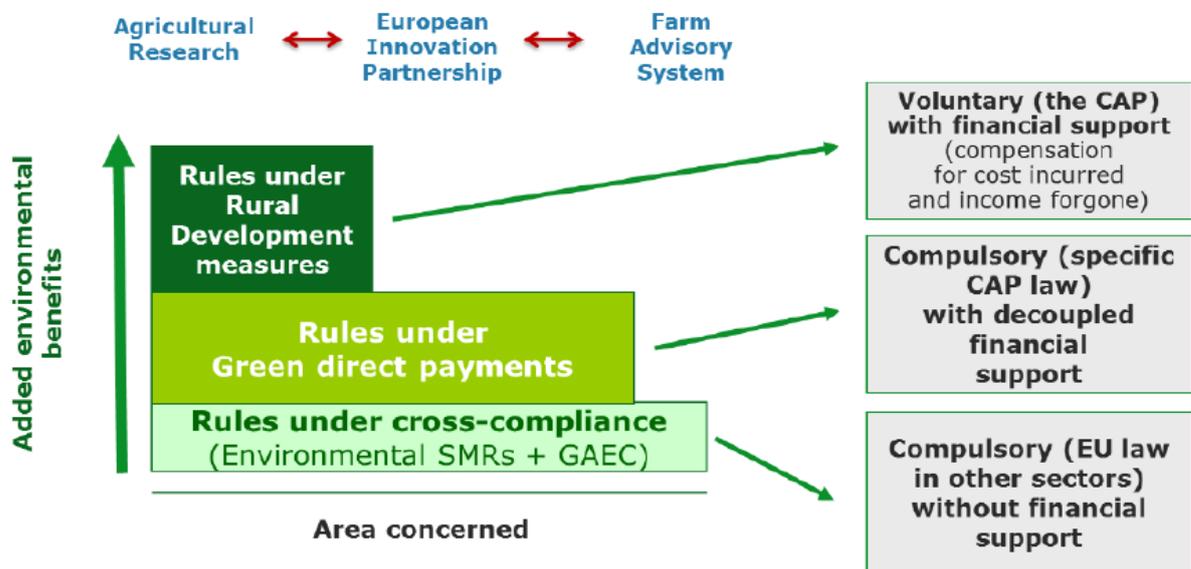


FIGURE 1.15. La nouvelle architecture des instruments de la PAC liés à l'environnement.
Source : European Commission - DG AGRI

Le schéma des paiements directs verts

Parmi les principaux objectifs de la nouvelle PAC, il y a donc l'amélioration de la performance environnementale en incluant dans le premier pilier une composante écologique des paiements directs²⁷ applicable dans toute l'Union. L'amélioration de l'écologisation des pratiques agricoles est possible grâce à un meilleur financement (Erjavec & Erjavec, 2015). Cela se produit par l'attribution par la PAC d'un montant moyen de 11.87 milliards € par an sur la période 2014-2020 afin de promouvoir les pratiques qui bénéficient l'environnement et le climat, à savoir : la diversification des cultures, le maintien des prairies permanents et la consécration de 5% des terres arables à des surfaces d'intérêt écologique (Grosjean et al., 2018; European Commission, 2011b, 2013c).

Selon le Règlement (UE) no 1307/2013 (Official Journal of the European Union, 2013b), ces pratiques devraient prendre des formes d'actions *simples* (réfléter des pratiques agricoles durables standard), *généralisées* (la population cible comprend en principe tous les agriculteurs bénéficiant des paiements directs de la PAC), *non contractuelles* (contrairement aux mesures de développement rural) et *annuelles* (pour se conformer aux principes de gestion des paiements directs).

D'autres exigences importantes concernant ces pratiques obligatoires consistent d'aller au-delà des règles statutaires liées aux règles environnementales en matière de conditionnalité et d'être liées à l'agriculture (voir Figure 1.16). Ceci est important pour l'environnement, car des pratiques agricoles inappropriées peuvent avoir de graves conséquences sur les ressources naturelles, principalement par la pollution de l'air, des sols et de l'eau. Les agriculteurs peuvent avoir un avantage financier si leurs activités n'endommagent pas les ressources naturelles, aident à atteindre les objectifs environnementaux et climatiques et s'ils utilisent les terres agricoles de manière durable, soutenant ainsi une agriculture durable. Mais si les agriculteurs ne respectent pas les lois environnementales, dans ce cas les règles d'écologisation, ils sont sanctionnés par une réduction des paiements de soutien qui leur sont accordés.

27. Point 37 du Règlement (UE) no 1307/2013.

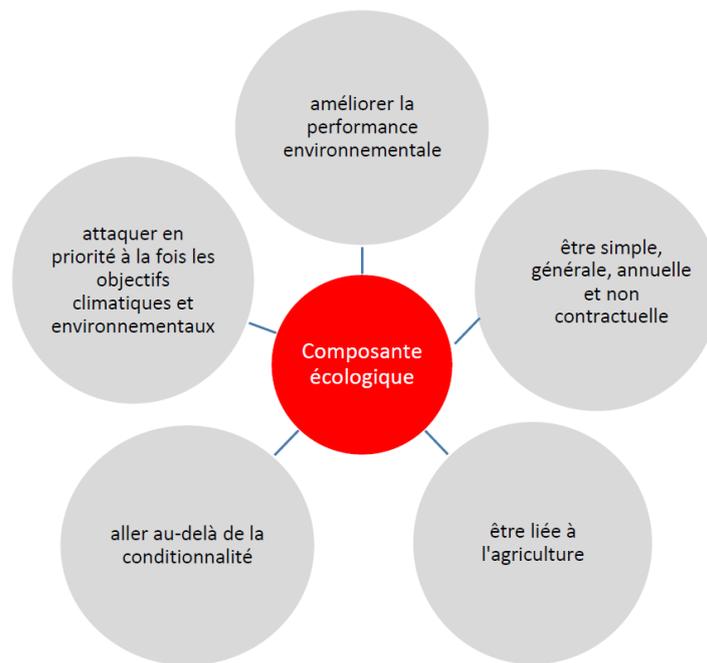


FIGURE 1.16. Caractéristiques auxquelles doivent répondre les pratiques obligatoires de la composante écologique introduite dans le premier pilon de la PAC.

Les paiements directs verts représentent 30% des budgets de paiements directs des pays de l'UE²⁸, prenant la forme d'un paiement annuel par hectare admissible. Ce qui suit indique en quoi consistent les trois obligations d'écologisation.

- ◇ **La diversification des cultures** s'applique aux agriculteurs possédant plus de 10 ha de terres arables. Ceux qui répondent déjà aux objectifs de diversification des cultures, une grande partie de leurs terres étant des prairies ou des jachères, sont exemptés de cette exigence. Les agriculteurs qui possèdent jusqu'à 30 ha de terres arables doivent avoir au moins deux cultures et la culture principale ne doit pas couvrir plus de 75% des terres. Ceux qui ont plus de 30 ha de terres arables doivent cultiver au moins 3 cultures, la culture principale couvrant au maximum 75% des terres et les autres deux cultures principales au plus 95%. Cette pratique apporte notamment des avantages pour la qualité des sols, en arrêtant leur dégradation et leur érosion, ce qui contribue au développement de la capacité de production (Article 44 du Règlement (UE) No 1307/2013 ([Official Journal of the European Union, 2013b](#))).

28. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT EVALUATION of the Regulation (EU) No 1307/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 establishing rules for direct payments to farmers under support schemes within the framework of the common agricultural policy and repealing Council Regulation (EC) No 637/2008 and Council Regulation (EC) No 73/2009 concerning the greening in direct payments.

- ◇ **Le maintien des prairies permanentes** impose aux gouvernements nationaux de respecter plusieurs conditions. Ils doivent désigner des prairies permanentes sensibles à l'environnement dans les zones Natura 2000, mais aussi en dehors de ces zones. Les prairies de grande valeur environnementale ne peuvent être ni labourées ni converties. Une autre condition consiste à maintenir par les gouvernements nationaux un certain ratio des prairies permanentes dans la surface agricole totale, afin de ne pas tomber en dessous de 5% par rapport à l'année de référence, sinon, des mesures d'action urgentes seront nécessaires. En ce sens, il peut s'imposer que les agriculteurs qui ont converti et utilisé leurs prairies permanentes à d'autres fins soient forcés d'inverser la conversion. Cette pratique du maintien des prairies permanentes représente un moyen important de capture du carbone, créant ainsi une alternative pour la réduction du changement climatique. Cette pratique présente notamment des bénéfices environnementaux associés avec la protection des prairies sensibles à l'environnement et la séquestration du carbone (Article 45 du Règlement (UE) No 1307/2013 ([Official Journal of the European Union, 2013b](#))).
- ◇ **Les surfaces d'intérêt écologique** appartenant à des agriculteurs dont les superficies agricoles dépassent 15 hectares, doivent occuper au moins 5% de ces terres. Les agriculteurs disposant d'une grande proportion de prairies bénéfiques pour l'environnement peuvent être exemptés. Ces surfaces d'intérêt écologique couvrent un large éventail de caractéristiques en vue d'améliorer la biodiversité dans les exploitations agricoles, incluant des jachères, des zones boisées, des terrasses, des haies ou des bordures boisées ou des cultures fixatrices d'azote. En fonction des systèmes agricoles et des priorités nationales, il appartient à chaque État membre de décider quelles sont les zones d'intérêt écologique (Article 46 du Règlement (UE) No 1307/2013 ([Official Journal of the European Union, 2013b](#))).

En plus de ces pratiques standard, selon l'Article 43, paragraphe 3 du Règlement (UE) No 1307/2013 ([Official Journal of the European Union, 2013b](#)), il est également permis d'utiliser des pratiques équivalentes mais qui doivent apporter un avantage tout aussi élevé ou supérieur pour le climat et l'environnement. De cette manière, sont prises en considération aussi les différentes situations environnementales et la diversité des systèmes agricoles à travers l'Union Européenne (concept d'"équivalence"). Telles pratiques alternatives acceptées peuvent être des mesures agro-environnement-climat dans le cadre de programmes de développement rural ou des systèmes de certification nationaux ou régionaux similaires aux mesures verts.

L'objectif de ces méthodes d'écologisation est de rémunérer les agriculteurs pour leurs actions de protéger l'environnement et la biodiversité, ce travail ne se reflétant pas dans les prix de marché. La création d'un système de paiements directs verts dans le cadre

du premier pilier de la PAC a visé à garantir que tous les agriculteurs de l'Union Européenne bénéficiant d'un soutien dépassent les exigences de la conditionnalité en effectuant leur activité agricole quotidienne de manière à apporter des bénéfices pour l'environnement. Ce système de pratiques vertes n'implique pas le changement de méthodes dans les exploitations où les pratiques d'agriculture durable sont déjà implémentées, mais vérifie que les trois conditions obligatoires requises et présentées ci-dessus sont appliquées dans toutes les fermes concernées.

L'intersection de la politique agricole et la politique environnementale revêt une importance majeure à la fois à court terme et surtout à long terme. Depuis plus de 10 ans, accompagner les agriculteurs dans la transition vers une agriculture durable est au cœur du débat politique. Un changement important dans cette direction a été l'introduction du système de paiements directs verts dans le premier pilier de la PAC, qui, dès la première année de mise en œuvre, a renforcé le rapprochement de la politique agricole commune et la politique environnementale, comme le montre les rapports d'évaluation [European Commission \(2016a\)](#). Cet instrument a montré qu'il peut avoir un impact positif significatif sur l'environnement, non seulement en couvrant la plupart des terres agricoles de l'UE, mais également en apportant un grand bénéfice aux pratiques agricoles en dépassant la sphère de la conditionnalité, dans le sens que les agriculteurs deviennent préoccupés de l'environnement et du climat dans le cadre de leur activité agricole réalisée quotidiennement.

Les effets positifs de l'instrument des paiements directs verts ont déjà été visibles pour les trois pratiques obligatoires. Dans le cas de la diversification des cultures, la pratique a été appliquée sur la quasi-totalité des terres agricoles de l'UE, les paiements directs verts prévenant la dégradation de la qualité des sols. Dans le cas des prairies permanentes, les mesures de verdissement ont contribué à la séquestration du carbone dans le sol. Une attention particulière sera accordée à la protection des prairies permanentes sensibles liées à Natura2000. Toutefois, l'évaluation du système des paiements directs verts souligne le fait qu'un aspect important est représenté par les décisions prises par les États membres et les agriculteurs, dans la taille de l'impact sur l'environnement. Les plus touchées à cet égard semblent être les surfaces d'intérêt écologique, peu d'États Membres faisant l'effort de limiter la quantité de pesticides et d'engrais utilisés dans ces zones.

Le rapport d'évaluation [European Commission \(2016a\)](#) montre que les niveaux de production, les conditions de concurrence loyale entre les agriculteurs des États membres et les marchés n'ont pas été affectés par la mise en œuvre du système des paiements directs verts, leur impact étant très limité. Selon le rapport, seulement quelques petites faiblesses dans l'implémentation de l'instrument pourraient empêcher d'exploiter pleinement son

potentiel, montrant que des améliorations doivent être apportées afin de le simplifier et d'accroître la cohérence et les synergies entre tous les instruments environnementaux introduits dans la PAC et la politique environnementale. Ces aspects augmenteraient les performances environnementales, la zone de couverture des cultures permanentes et la flexibilité au niveau des exploitations agricoles.

[Was et al. \(2014\)](#) analysent les effets potentiels de l'introduction de la composante verte de la PAC sur l'agriculture européenne, en utilisant le modèle CAPRI et un scénario de base pour 2020 dans les pays baltes. Selon son analyse, l'introduction de la composante écologique entraînerait une augmentation des prix des cultures, une diminution des superficies des principales cultures et une augmentation limitée des revenus des agriculteurs.

[Cortignani & Dono \(2015\)](#) utilisent un modèle hybride calibré en utilisant la programmation mathématique positive pour étudier l'impact de la composante organique dans une zone agricole située au sud de l'Italie. Ses résultats montrent que les mesures de verdissement peuvent avoir des effets contradictoires, d'une part, s'avérant non bénéfiques dans la région méditerranéenne étudiée, affectant seulement une très petite partie des fermes et, d'autre part, elles semblent avoir un effet positif, consistant dans une plus grande diversification des cultures et une réduction de l'utilisation de produits chimiques, en particulier d'azote.

En utilisant le modèle IFM-CAP pour analyser les effets économiques de la composante verte, [Louhichi et al. \(2017\)](#) montrent que seulement 29% des fermes dans l'UE sont touchées par cette composante, bien que 55% des fermes auraient dû faire l'objet du "verdissement". La superficie re-allouée suite au verdissement représente 4.5% de la superficie totale utilisée, bien qu'environ 86% de la SAU était susceptible de faire l'objet de la composante écologique.

Certains auteurs ([Cortignani et al., 2017](#); [Gocht et al., 2017](#)) considèrent que le verdissement produit des changements insignifiants dans les indicateurs environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre ou la diversité des cultures. D'autres auteurs ([Martin et al., 2015](#)) partent du principe que l'écologisation ne constitue que le premier pas dans la nouvelle PAC et indiquent que la composante écologique a besoin d'être redéfinie pour atteindre pleinement son objectif.

1.3.1.2 Impacts des mesures de la politique environnementale sur l'agriculture

Non seulement les mesures et les instruments de la Politique Agricole Commune impactent l'environnement, mais aussi l'agriculture est impactée par les mesures prises dans le cadre de la politique environnementale. Le secteur agricole se trouve dans une relation complexes avec l'environnement, étant un utilisateur majeur des ressources naturelles. Le point de rencontre entre la préservation de la biodiversité de l'environnement et l'agriculture est représenté par l'agro-environnement. Le respect des conditions agro-environnementales implique le respect simultané des conditions environnementales et agricoles. Premièrement, l'environnement constitue la base du système agricole et alimentaire, sans lequel l'agriculture ne pourrait pas fonctionner.

En tant qu'instruments de la politique de l'environnement, la Directive 91/766/CE sur les nitrates et la Directive cadre-sur l'eau ont un impact majeur sur l'agriculture, la production agricole étant réglementée aussi par ces directives. Les outils de la politique environnementale exigent également le respect de bons codes de pratiques agricoles, étant également reflétées dans l'architecture de la PAC. Éviter la pollution par les nitrates et, implicitement, garantir une bonne qualité de l'eau, favorise également une bonne production agricole. Dans le même temps, la protection des sols est vitale pour l'agriculture et la production alimentaire. En plus, la sécurité alimentaire mondiale repose sur la préservation de l'environnement et les processus écologiques qui sous-tendent l'agriculture.

Un autre outil de la politique environnementale qui impacte le secteur agricole est le Programme d'action pour l'environnement 7 (PAE 7) [Official Journal of the European Union \(2013a\)](#), créé de manière à apporter des avantages connexes à d'autres secteurs, notamment l'agriculture. Un exemple dans ce sens est représenté par les efforts visant à protéger les écosystèmes de manière à fournir des services écosystémiques vitaux aux autres secteurs économiques, en particulier l'agriculture (la purification de l'eau pour l'agriculture et la pollinisation).

La protection de l'environnement est donc étroitement liée au fonctionnement de l'agriculture et l'affecte de manière positive et directe. Bien que les effets de la politique environnementale sur l'agriculture soient extrêmement bénéfiques, ils peuvent entraîner certains coûts. Selon [Bateman et al. \(2006\)](#), est attendu que l'agriculture va devoir supporter une part significative des coûts de mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau étant donné qu'elle est obligée de réduire les émissions de polluants diffus dans l'eau. Afin d'estimer l'impact sur l'agriculture de l'implémentation de la directive-cadre sur l'eau, dans n'importe quelle région du Royaume-Uni, [Fezzi et al. \(2010\)](#) ont recours à une approche statistique, estimant par des modèles de régression les impacts économiques sur

les fermes qui cherchent à réduire la pollution par les nitrates. En introduisant trois mesures liées à la quantité d'engrais organique, le nombre d'animaux et la conversion des terres arables en prairies, appliquées au bassin versant de Derwent, il montre qu'il y a des changements importants dans l'utilisation des terres qui se produisent, une partie importante des cultures arables étant convertie en prairies, entraînant des coûts significatifs pour l'agriculture.

1.3.2 L'intérêt de la coordination des politiques publiques à des objectifs en matière de climat, agriculture et environnement

La coordination des politiques a toujours représenté un défi pour les gouvernements et implicitement dans le processus de prise de décision au niveau européen. Toutes les politiques qui s'influencent réciproquement devraient être conçues de manière à s'aider mutuellement, à produire une synergie ou au moins à réduire au minimum les pressions qui peuvent survenir. L'Union Européenne aborde la résolution des problèmes de la lutte contre le changement climatique, d'assurance de la sécurité alimentaire, du développement uniforme des zones rurales, de la croissance économique et de l'utilisation durable des ressources naturelles à travers l'interaction des réformes de la PAC, la politique environnementale, la politique climatique, la politique de sécurité alimentaire et la politique énergétique.

La capacité à assurer une cohérence entre les politiques environnementales, agricoles et climatiques deviendra de plus en plus importante au fil du temps. Bien que les préoccupations environnementales fassent partie constitutive des traités depuis 1997, la situation actuelle de l'environnement dans l'Union Européenne montre que de nombreux progrès ont été faits, mais ils ne sont pas suffisants. Une intégration plus efficace et une approche commune plus cohérente au niveau des politiques sont nécessaires pour atteindre les objectifs prioritaires de l'UE. Dans le contexte d'un climat changeant, les fonds alloués aux différentes politiques joueront un rôle majeur dans la réalisation des objectifs climatiques et environnementaux. L'agriculture, en tant que fournisseur de services écologiques et environnementaux, grâce aux fonds alloués par la Politique Agricole Commune, pourra apporter des bénéfices à l'environnement et atténuer le changement climatique. Dans le même temps, la législation environnementale, dans son ensemble, occupe un rôle clé dans l'atténuation du changement climatique. Ainsi, la Directive sur les nitrates, la Directive-cadre sur l'eau ou la Stratégie thématique concernant les sols, malgré le fait qu'elles ne traitent pas directement du changement climatique, elles sont pertinentes pour éviter les émissions de GES dans le secteur agricole.

L'intégration des questions environnementales dans toutes les politiques est présentée dans [Official Journal of the European Union \(2013a\)](#) comme une mesure primordiale pour la diminution des contraintes provenant des autres secteurs auxquels l'environnement est confronté, dans le but de réaliser les objectifs tant environnementaux que climatiques. Un pas important est représenté par les réformes successives de la PAC, qui depuis 2003, a incité les agriculteurs à respecter les conditions agricoles et environnementales, afin de pouvoir recevoir les paiements directs.

L'interdépendance entre le changement climatique et l'agriculture (analysée dans les sections précédentes) devrait jouer un rôle essentiel dans le processus de prise de décision en ce qui concerne la réforme des politiques agricole commune, climatique et environnementale.

Bien qu'aujourd'hui, il y a déjà une certaine coordination entre la PAC et la politique climatique, l'inclusion des objectifs climatiques de manière explicite dans la PAC serait essentielle pour exploiter pleinement les avantages qui peuvent être obtenus. À l'heure actuelle, la nouvelle PAC dispose de plusieurs instruments qui contribuent indirectement à la réalisation des objectifs climatiques (composante verte, mesures agro-environnementales). Dans le même temps, l'inclusion de l'agriculture dans le cadre de la politique climatique semble avoir une importance majeure. Bien qu'aujourd'hui le secteur agricole est laissé de côté dans le cadre des politiques climatiques, malgré sa part dans les quantités d'émissions de GES au niveau européen, de nombreuses études ont montré que l'agriculture pourrait apporter une contribution significative dans l'atteinte des objectifs climatiques. Toutefois, il faut tenir compte que les politiques climatiques ne peuvent à elles seules réduire les émissions provenant de l'agriculture sans qu'il existe une bonne intégration entre les deux politiques, parce que le secteur agricole se caractérise par une identité propre législative nationale et européenne. [Bodiguel \(2014\)](#) considère que le législateur communautaire devrait diriger le système des paiements de manière à participer directement à la lutte contre le changement climatique et implicitement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'Union Européenne cherche, par l'intermédiaire des États membres, d'une part, à mettre en place un service national d'accompagnement des agriculteurs et d'autre part, de veiller à ce que les règles soient mieux respectées au niveau national.

Afin d'assurer que les politiques se caractérisent par cohérence et offrent des avantages connexes, l'Union Européenne conçoit son budget de manière à soutenir les objectifs proposés dans le cadre de chaque politique. Pour l'exercice 2014-2020, la Commission Européenne a lancé diverses propositions afin de s'assurer que les objectifs climatiques et environnementaux sont bien intégrés dans tous les instruments de financement

de l'UE, à condition que les fonds soient dépensés de manière efficiente et corrélés aux politiques.

Un autre progrès dans la coordination entre les politiques a été représenté par l'inclusion du changement climatique dans la politique énergétique. Un exemple dans ce sens sont les stratégies et les paquets énergie-climat. Toutefois, la coordination entre la politique climatique et la politique énergétique ne peut être assurée sans une harmonisation des instruments des deux politiques.

Assurer un cadre de politique climatique cohérent et un bon alignement avec les autres politiques devrait tenir compte du fait que plusieurs niveaux de gouvernance (UE, État membre, région, collectivités locales) sont à la base de la politique de changement climatique. Selon [Rivera et al. \(2018\)](#), un premier pas consiste à aligner les priorités budgétaires avec les objectifs ciblés, en attirant l'attention sur le fait que le budget européen est un élément clé pour résoudre la manque de cohérence entre les politiques nationales et européennes.

Assurer une bonne coordination entre la PAC et la politique environnementale, la politique climatique, la politique de sécurité alimentaire (sécurisation du niveau de la production alimentaire) est essentielle car la réalisation des objectifs en matière d'agriculture, de climat et d'environnement implique tout un circuit qui doit fonctionner correctement. Dans un contexte du changement climatique, l'agriculture doit assurer une production alimentaire suffisante pour répondre aux besoins des citoyens et garantir la sécurité alimentaire. Dans le même temps, l'agriculture ne doit pas nuire à l'environnement et aux ressources qu'elle utilise, un environnement dégradé mettant en péril la sécurité alimentaire. Selon [Rouquette \(2018\)](#), il existe l'intention que la nouvelle PAC, valable après 2020, soit davantage dirigée vers une politique durable et écologique. Selon [IPES-FOOD \(2016\)](#), il est prévu une modification du système alimentaire de manière à ce qu'il ne tienne pas seulement compte de la productivité, mais il devrait aller vers une alimentation équilibrée et durable, ce qui impliquerait une plus grande sécurité alimentaire.

La sécurité alimentaire à long terme a été le thème principal pour la nouvelle PAC selon la proposition de la Commission Européenne et du Parlement Européen. La PAC s'est efforcée de relever le défi de l'autosuffisance alimentaire sur le continent européen. Elle a également lancé et développé une offre européenne d'aliments à prix peu élevés, de bonne qualité, abondants et diversifiés, notamment en France. À la suite de la mise en œuvre de la PAC, les pays européens ont mis au point des outils permettant d'orienter l'agriculture dans l'intérêt des citoyens.

Au cours de ces 57 années d'existence de la Politique Agricole Commune, de

nombreux changements se sont produits, ayant lieu une augmentation de la multidimensionnalité du secteur agricole impliquant l'inclusion de nouvelles préoccupations dans la PAC, y compris du commerce et du développement à la sécurité alimentaire et à l'environnement (Alons, 2017). Les recherches sur la politique environnementale dans le secteur agricole montrent qu'il est difficile de passer d'un engagement politique à une véritable intégration dans la PAC de la politique environnementale. La cause principale est le réseau relativement fermé de la politique agricole, ainsi que la faible priorité accordée aux problèmes environnementaux (Buller, 2002; Lowe & Baldock, 2000).

Le programme PAE 7 [Official Journal of the European Union \(2013a\)](#) prévoit diverses mesures pour assurer la cohérence des politiques et l'intégration des objectifs environnementaux : 1) réalisation des évaluations ex ante des impacts environnementaux et économiques dans le contexte des propositions de politiques visant à garantir leur efficacité et leur cohérence ; (2) la recherche de solutions de compromis potentielles au niveau de toutes les politiques pour la maximisation des synergies et d'éviter, réduire ou réparer les impacts négatifs éventuels sur l'environnement.

CHAPITRE 2

Données et modèles

2.1 Modélisation de l'agriculture européenne

La décision publique en agriculture a besoin d'instruments afin de pouvoir estimer l'impact des changements de politique sur le secteur agricole. Le recours aux méthodes quantitatives est devenu indispensable, les modèles d'analyse économique conçus dans ce sens, occupant un rôle essentiel. Indifféremment de la famille des modèles économiques dont ils font partie (modèles d'offre, équilibre partiel ou général) et quelles que soient les techniques de modélisation sur lesquelles ils sont basés (programmation mathématique, économétriques), ces modèles sont des outils efficaces pour l'éclairage des politiques publiques, donnant en même temps aux décideurs la possibilité de pouvoir justifier leur choix, la nécessité des réformes et leur décisions. Par conséquent, l'évaluation des impacts des politiques agricoles et environnementales fait partie intégrante du processus décisionnel dans l'UE.

Ce travail s'appuie sur une modélisation en grande partie existante, qui a été fortement développée ces dernières années au sein de l'Unité Économie Publique, par Pierre-Alain Jayet, Stéphane De Cara et un collectif qui capitalise une longue expérience de modélisation. La méthodologie de la thèse repose sur le modèle d'offre agricole européenne AROPAj, en utilisant les données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA, en anglais, Farm Accountancy Data Network (FADN)), ce qui m'a permis de pouvoir réaliser une analyse à plusieurs niveaux, infra-régional, régional, national et européen.

Ce travail tient en partie compte de la variabilité économique qui caractérise l'agriculture européenne, en s'appuyant sur les années d'observations 2007-2012, caractérisées par une forte variation des prix agricoles et des conditions météorologiques au cours de la période.

2.1.1 Les données du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)

Le Réseau d'Information Comptable Agricole, dont le concept date de 1965¹ ([Official Journal of the European Union, 1965](#)), est une base de données qui permet d'évaluer à la fois les revenus des exploitations agricoles et l'impact des mesures prises dans le cadre de la Politique Agricole Commune ([Official Journal of the European Union, 2009a, 2013c](#)). La base de données RICA comprend actuellement environ 83000 exploitations, représentant approximativement 4.700.000 fermes des États Membres de l'UE ([European Commission, 2018a](#)).

Cet outil représente un atout majeur pour les décideurs des politiques publiques et les chercheurs dans le domaine de l'agriculture, le RICA étant la seule source de données micro-économiques harmonisées qui couvre toute la gamme des activités agricoles dans l'Union Européenne, facilitant les comparaisons entre pays et régions.² Outre le fait que la base RICA se caractérise par une méthodologie bien établie sur longue période, elle présente également l'avantage d'une utilisation intensive à des fins d'élaboration de politiques. Parmi ses principaux objectifs à cet effet figurent les éléments suivants : (i) Évaluation de politiques, des effets potentiels de l'évolution des conditions du marché ; (ii) Planification budgétaire, (iii) Surveillance approfondie du revenu agricole, (iv) Représentation de la plus grande partie possible de la production, la main-d'œuvre et la superficie agricole des exploitations. Par ailleurs, la PAC n'est pas la seule politique à bénéficier des informations sur la situation économique des exploitations contenues dans RICA, c'est aussi le cas d'autres politiques (e.g. la politique climatique) dans la situation de l'affichage d'objectifs plus larges pour l'UE (e.g. stimuler la croissance, développer le marché du travail).

La collecte de la base de données est faite à travers une enquête menée au niveau de chaque État Membre de l'Union Européenne. Les données comptables sont collectées annuellement à l'aide d'une fiche qui prend la forme d'un questionnaire adressé à un

1. Dans le Règlement No 79/65/EEC du Conseil, de 15 juin 1965, a été mise en place la base juridique de l'organisation d'un réseau communautaire pour la collecte de données comptables agricoles, afin de répondre aux besoins de la Politique Agricole Commune.

2. <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/>

échantillon d'exploitations agricoles professionnelles³ choisies pour chaque région RICA de l'UE⁴ ([Official Journal of the European Communities, 2000a](#)). La fiche d'exploitation RICA de la Communauté couvre à la fois des données économiques et financières ainsi que des données physiques et structurelles (voir le Tableau 2.1). Des informations complètes sur différents indicateurs du revenu agricole (e.g. niveaux absolus, distribution) sont fournies. Les données du RICA peuvent être également utilisées pour calculer différents paramètres financiers (coûts de production, la part des subventions, etc.). Étant donnée la très grande diversité des exploitations agricoles au niveau européen, trois dimensions sont prises en compte afin de fournir des données représentatives et de permettre des comparaisons de compétitivité : la région, le type d'exploitation et la taille économique ([Neuenfeldt & Gocht, 2014](#)).

TABLE 2.1. Les différentes catégories de données contenues dans la fiche d'exploitation du RICA. *Source* : <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/> et [Official Journal of the European Communities \(2000a\)](#).

<i>Tableaux RICA</i>	<i>Catégories</i>
A	Informations générales sur l'exploitation
B	Structure et rendement
C	Détail de la main-d'œuvre
D	Nombre et valorisation d'animaux
E	Achats et ventes d'animaux
F	Coûts
G	Capital
H	Détail des dettes
I	Taxe sur la valeur ajoutée
J	Primes et subventions
K	Production
L	Quotas et autres droits
M	Paiements compensatoires
N	Détail des achats et ventes d'animaux
SE	Revenus et indicateurs financiers non mentionnés ailleurs

Le codage régional du RICA au niveau européen, en 2012, est illustré dans la Figure 2.1. Chaque région se voit attribuer un numéro d'identification unique dans la base

3. L'enquête prend en compte seulement les exploitations agricoles caractérisées par une dimension suffisante (c'est à dire de dépasser une dimension économique minimale) pour être considérées comme ayant le statut de professionnelles.

4. Pour des objectifs liés à la base de données, l'Union Européenne est divisée en régions RICA.

de données.

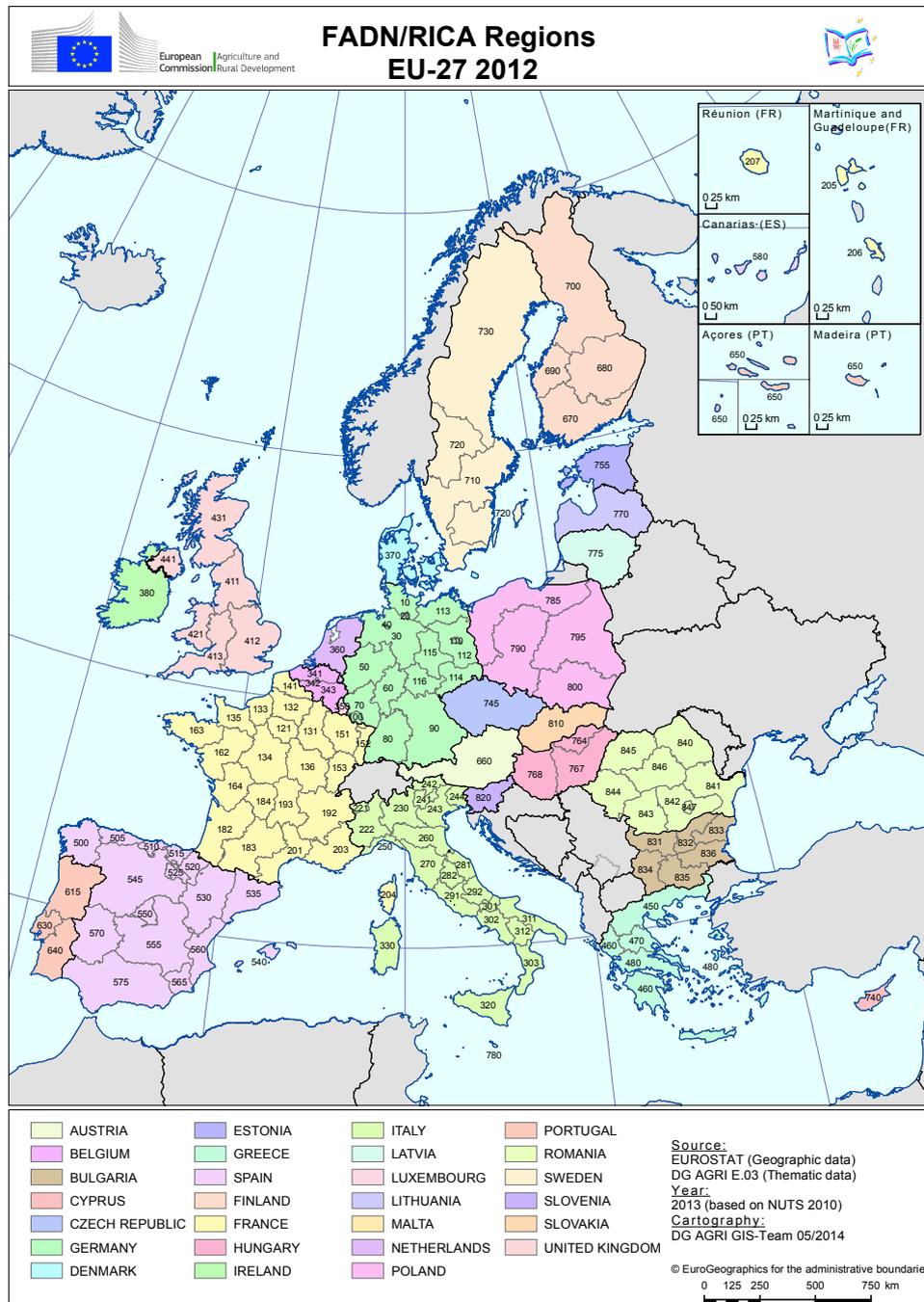


FIGURE 2.1. Codes des régions RICA pour UE-27.

Source : FADN, European Commission.

Le RICA est la principale source de données du modèle AROPAJ en raison de sa capacité à représenter statistiquement l'hétérogénéité du système agricole à l'échelle régionale, en couvrant 90% de l'agriculture européenne. AROPAJ utilise à la fois des données économiques RICA ainsi que des données physiques telles que les animaux et

les surfaces. Cependant, bien qu'elle représente la source de données principale du modèle, certains paramètres dans AROPAj ne sont pas utilisés directement dans la forme brute fournie par le RICA, nécessitant le recours à des calculs économétriques pour les obtenir.

Les différentes versions du modèle AROPAj reposent sur différents échantillons annuels du RICA. La version actuelle V5 du modèle est calibrée par rapport à six années RICA, plus précisément les années 2007 à 2012. Au fil du temps, l'unité INRA-Économie Publique a été autorisée à accéder aux données du RICA pour différents programmes européens de recherche (EUROTOOLS, GENEDEC, AnimalChange, FoodSecure).

2.1.2 Le modèle agro-économique européen AROPAj

Le modèle d'offre agricole européenne AROPAj ("*Agriculture, Recomposition de l'Offre et Politique Agricole*")⁵ est un modèle technico-économique d'optimisation qui simule les impacts des politiques européennes agricoles et environnementales sur les choix économiques des agriculteurs. À l'origine, l'objectif d'AROPAj a été l'évaluation des effets des réformes de la Politique Agricole Commune, reposant sur la prise en compte de divers facteurs (e.g. les instruments de la Politique Agricole Commune, l'hétérogénéité des systèmes agricoles), qui ont permis d'adapter le modèle aux données du RICA et à l'élargissement de l'Union Européenne. En raison de sa capacité à intégrer des interactions complexes entre l'agriculture et l'environnement, AROPAj est actuellement utilisé dans plusieurs domaines, à la fois économiques et environnementaux, tels que la réduction des gaz à effet de serre, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, les pollutions d'origine azotée, les politiques agro-environnementales.

Étant donné que les informations contenues dans le RICA sont constituées d'enquêtes sur des échantillons individuels d'exploitations, afin de constituer une unité de modélisation pour le modèle AROPAj, ces exploitations individuelles sont regroupées par une méthode de clustering⁶ dans des groupes d'exploitations présentant des caractéristiques similaires, ce qu'on appelle *groupe-type* (GTs) ou *ferme-type*. Le nombre et la diversité des GTs confère au modèle sa capacité à appréhender la diversité des systèmes de production de l'UE.

5. [https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications](https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie%20publique/Publications)

6. Afin de garder les informations entièrement anonymes, la Commission Européenne demande que chaque type d'exploitation regroupe au moins 15 exploitations différentes.

La typologie AROPAj est construite sur une base infra-régionale, les fermes étant regroupées selon différentes variables clés :⁷

- ◇ le type d'exploitation, associé à l'orientation technico-économique des exploitations (OTEX) selon la nomenclature du RICA. Le modèle AROPAj représente les catégories des productions végétales et animales, excepté l'horticulture et la viticulture.
- ◇ l'altitude, qui prend la forme d'une variable discrète à valeurs 1 à 3 (1 pour les fermes dont l'altitude est inférieure à 300 mètres, 2 pour une altitude comprise entre 300-600 mètres et 3 pour une altitude supérieure à 600 mètres).
- ◇ l'irrigation, calculée comme la part de la superficie des cultures irriguées rapportée à la superficie des cultures cultivées.
- ◇ la taille économique, sous la forme d'une variable discrète allant de 1 à 10, selon la taille de la ferme échantillonnée.

Le modèle AROPAj mobilise les techniques de programmation linéaire mixte, en anglais : mixed integer programming (MIP). Dans AROPAj, chaque groupe-type k tente de maximiser sa marge brute totale (π_k) dans les conditions où leur activités sont soumises à des contraintes économiques et techniques. La forme linéaire générique du modèle peut être représentée comme suit :

$$\begin{aligned} \max \quad & \pi_k(x_k) = g_k \cdot x_k \\ \text{s.c.} \quad & A_k \cdot x_k \leq z_k \quad (\lambda_k) \\ & x_k \geq 0 \quad (\mu_k) \end{aligned}$$

où x_k représente le vecteur des activités de production pour le groupe-type k , (e.g. la superficie de chaque culture, le nombre d'animaux dans chaque catégorie, la production et la consommation à la ferme, la production de viande et de lait, etc.). Les émissions de gaz à effet de serre sont une composante de x_k , étant calculées de manière endogène dans le modèle. g_k est le vecteur des valeurs de la marge brute. λ_k et μ_k sont des variables duales définies en tant que multiplicateurs de Lagrange. Tous ces éléments sont des fonctions de paramètres estimés par des méthodes économétriques et complétés par des informations techniques.

Dans le modèle, la production globale est limitée par des contraintes politiques ou agronomiques indiquées par la matrice des coefficients d'entrée-sortie A_k et z_k qui est la

7. Un algorithme ayant à la base une méthode de classification hiérarchique agglomérative (hierarchical clustering) qui nous permet de maximiser la similarité au sein des groupes ainsi que la distance entre différents groupes, est appliqué sur ces quatre variables qui forment un espace à quatre dimensions.

représentation formelle du "vecteur de ressources". Parmi ces contraintes, les principales sont les contraintes de rotation des cultures, permettant la ré-allocation des terres entre les différentes cultures dans la limite de ce qui est acceptable du point de vue agronomique. D'autres contraintes concernent les besoins en aliments pour les animaux et la mise en œuvre des instruments de la Politique Agricole Commune, la disponibilité de la superficie agricole utilisée (SAU) étant donnée (paramétrée) pour chaque groupe-type. Le nombre d'animaux par catégorie de "capital" (par exemple troupeau de laitières, troupeau de vaches à viande) est autorisé à varier dans un intervalle paramétré permettant d'introduire différents ajustements du capital animal (par défaut $\pm 15\%$). Une présentation plus détaillée du modèle en fonction du sujet analysé, est présentée dans la section méthodologique des chapitres suivants.

AROPAj est un modèle multi-producteur et multi-produit. C'est un modèle d'offre, les agents économiques représentés par le modèle réagissent donc à des prix exogènes pour les intrants comme pour les produits. Ce sont 32 productions végétales et 28 productions animales qui sont présentes dans AROPAj. Le modèle couvre une grande partie des terres agricoles européennes (terres arables et pâturages), dont la production peut être soit collectée (et vendue au prix du marché), soit collectée ou consommée sur la ferme, soit entièrement consommée sur la ferme pour l'alimentation animale. Du point de vue de la production animale, le modèle inclut une grande variété d'animaux (24 catégories de bovins⁸ et autres 4 catégories : ovins, porcins, chèvres et volailles).

AROPAj est un modèle statique, mono-périodique à court terme, les résultats fournis par le modèle étant annuels. La surface agricole utilisée (SAU), le capital animal ou les quotas peuvent être ajustés de façon exogène, comme tous les paramètres du modèle.

AROPAj a fait l'objet de différentes versions ajustées sur les données du RICA disponible (année RICA) : V1 (1997), V2 (2002), V3 (2004), V4 (2009), V5 (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012). La version V5 du modèle inclut au niveau européen entre 1747 et 1993 fermes représentatives selon les années (voir Tableau 2.2) réparties sur les 130 régions RICA. Les résultats de la thèse sont basés sur les 6 variantes de la version V5 calibrée pour les années 2007 à 2012.

8. Les bovins sont divisés selon de nombreux critères : âge, sexe, utilisation (lait ou viande) et provenance (achetés ou pas).

TABLE 2.2. Nombre de fermes-types et surface agricole utilisée (en milliers d'hectares) par pays associé à la version V5 d'AROPAj 2007-2012.

Pays	2007		2008		2009		2010		2011		2012	
	GT	SAU										
bel	23	1357	25	1392	26	1362	30	1400	29	1395	30	1405
bgr	45	2889	49	3025	48	3377	61	3623	61	3698	65	3768
cyp	5	100	8	89	9	85	10	75	11	70	11	71
cze	42	3307	44	3339	45	3195	44	3194	47	3265	47	3270
dan	31	2529	29	2532	29	2467	33	2476	34	2579	22	2548
deu	180	15073	195	15323	215	16033	229	16141	215	15960	218	16078
ell	86	1788	90	1822	93	1580	80	1546	90	1553	106	1581
esp	190	12538	178	12107	182	11826	185	12016	182	12282	200	13721
est	16	794	18	798	17	849	22	881	22	905	23	899
fra	164	23244	159	23230	157	23246	164	23505	169	23648	170	23623
gbr	74	10506	73	10303	74	10383	74	10270	71	10247	78	10450
hun	54	4432	53	4551	57	4358	53	4655	54	4529	48	4197
irl	20	4014	19	4007	18	3917	17	4011	20	4011	18	3579
ita	323	8827	249	7857	233	8228	239	8035	238	7843	256	7782
ltu	30	2099	28	2096	30	2304	30	2506	30	2417	31	2523
lux	7	117	7	114	7	126	7	124	8	124	8	134
lva	31	1172	31	1164	24	1296	25	1290	27	1242	26	1167
mlt	9	4	11	4	11	5	11	4	10	4	11	4
ned	24	1558	22	1531	24	1694	25	1740	24	1768	23	1718
ost	43	2079	43	2063	41	2066	41	2026	43	2027	45	2053
pol	222	12832	222	13777	215	12696	200	12781	205	12863	209	13031
por	51	1145	48	1913	46	2062	46	1793	47	1922	48	1840
rou	38	9746	55	10281	102	9856	178	10214	171	10109	180	9967
suo	24	2075	24	2065	26	2024	22	1969	26	1941	26	1965
sve	25	2608	28	2590	30	2585	30	2583	30	2675	30	2703
svk	19	2041	18	2023	18	2014	18	2052	18	2023	18	1995
svn	22	402	21	413	25	401	27	418	28	408	36	435
EU	1798	129276	1747	130409	1802	130035	1901	131328	1910	131508	1993	132507

Les 9 blocs d'AROPAj sont présentés dans le Tableau 2.3.

TABLE 2.3. Les différents blocs du modèle AROPAj (les lettres capitales font référence au document sur le modèle accessible en ligne <https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications>).

Bloc	Désignation
G	Bloc général
A	Animaux et module démographique pour les bovins
C	Rotations et productions de cultures
E	Impacts environnementaux
F	Alimentation animale
N	Bilan d'azote pour les cultures et les sources d'azote
P	Politiques (PAC...)
T	Contraintes trans groupes types
W	Eau

Le calibrage du modèle AROPAj⁹ est basé sur un algorithme spécifique qui implique des calculs séquentiels reposant sur un couplage de méthodes aléatoires de type MonteCarlo et de méthodes de gradient. Le principe consiste de calculer les valeurs des paramètres en minimisant la distance entre les valeurs des variables PL calculées (fonction des paramètres) et les valeurs observées des variables associées. Le calibrage se fait indépendamment pour chaque année basée sur des données RICA, étant effectué groupe-type par groupe-type. La randomisation des paramètres de calibrage repose sur un grand nombre d'itérations PL pour chacun des groupes type du modèle. Selon la version, en fonction des moyens de calcul disponibles, ce nombre d'itérations pour un groupe type peut varier de 1000 (V2) à 2500 itérations (V5).

9. Le calibrage suppose d'établir un jeu de paramètres (sous la forme d'un vecteur de variables de calibrage) qui représente un sous-ensemble parmi la multitude de paramètres correspondant à un groupe type d'agriculteurs.

2.2 Analyse critique du modèle AROPAj par rapport à d'autres modèles utilisés dans le secteur agricole

Dans ce sous-chapitre, nous traiterons des similitudes et des différences entre le modèle utilisé dans la thèse, AROPAj, et les autres principaux modèles utilisés au sein de la communauté de modélisation agricole (AGLINK-COSIMO, CAPRI, GLOBIOM, AGMEMOD). L'objectif n'est pas de mettre en évidence la supériorité des modèles par rapport aux autres, mais de mettre en relief les caractéristiques de chacun selon différents critères qui les différencient.

2.2.1 Bref aperçu des autres principaux modèles dans la communauté de modélisation agricole

Le modèle économique **AGLINK-COSIMO** est le fruit d'une collaboration commune entre l'OCDE et la FAO, afin de représenter les marchés les plus importants dans l'agriculture mondiale (OECD, 2007; Fernandez et al., 2013; OCDE, 2015; Joint Research Centre, 2015). Le modèle inclut deux composants (Aglink de l'OCDE et Cosimo de la FAO), représentant deux modèles différents à l'origine. La composante AGLINK (Worldwide Agribusiness Linkage Program) a été créée par le Secrétariat de l'OCDE en étroite collaboration avec les États membres de l'OCDE et d'autres pays développés non membres. Depuis 1992, AGLINK a été fortement utilisé dans les activités de l'OCDE, principalement en raison de sa capacité à élaborer des scénarios alternatifs et des analyses à moyen terme. Son succès a fait qu'en 2004 se décider l'extension du modèle AGLINK et son utilisation en collaboration avec la FAO, principalement pour mener conjointement l'exercice annuel de prévisions à moyen terme. Cela a conduit à l'apparition de la composante COSIMO du modèle (Commodity Simulation Model), dont la structure de programmation était celle du modèle AGLINK, tandis que certains paramètres ont été repris du Modèle Alimentaire Mondial mis au point par la FAO. Outre son utilisation par l'OCDE-FAO, le modèle présente également une version européenne, utilisée par la Commission Européenne, à savoir par DG AGRI et JRC, afin de préparer et publier les perspectives annuelles à moyen terme des marchés agricoles européens (Joint Research Centre, 2015).

Le modèle économique spatial à large échelle **CAPRI** (Common Agricultural Policy Regionalised Impact) a été développé par l'Université de Bonn dans le cadre d'un projet financé par des fonds de recherche de la Commission Européenne entre 1997-1999 (FAIR3-CT96-1849 : CAPRI 1997-1999). Son objectif initial a été d'évaluer les effets des instruments de la Politique Agricole Commune à la fois au niveau de l'UE et des États membres, mais également au niveau infra-national. La première version applicable du modèle remonte à 1999, en se développant beaucoup dans le temps grâce aux nombreux projets dans lesquels il a été utilisé, ce qui l'a fait largement reconnu au sein de la communauté de modélisation agricole (Britz & Witzke, 2014; Britz et al., 2011; Britz & Witzke, 2008). Par exemple, un de ces projets, en 2001-2002 (ENV.B.2/ETU/2000/073), financé par DG REGIO, a eu un apport majeur dans l'évaluation des impacts environnementaux des politiques agricoles, en ajoutant une échelle inférieure à celle des régions administratives, celle de ferme-type.

Actuellement, le modèle vise à évaluer et prédire (sur un horizon de temps 8-10 ans) les impacts de la PAC et des politiques commerciales sur la production, les marchés, l'environnement, etc. Le client principal de CAPRI est la Commission Européenne, le modèle étant largement utilisé par Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies (IPTS).

Le modèle économique multi-sectoriel **GLOBIOM** (Global Biosphere Management Model) a été développé par International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) depuis 2007, dans le but de fournir une analyse politique sur des questions globales concernant la concurrence dans l'utilisation des terres entre les principaux secteurs de production basés sur les terres (e.g. l'agriculture, la foresterie et la bioénergie) (Valin et al., 2013a). Le modèle présente également deux versions régionales (GLOBIOM-EU et GLOBIOM-BRAZIL) qui fournissent une représentation spatiale plus détaillée des changements d'utilisation des sols afin d'évaluer l'impact de politiques régionales.

GLOBIOM est un modèle qui a été conçu pour traiter à l'échelle mondiale divers sujets liés à l'utilisation des terres (e.g. perspectives agricoles à long terme, impacts des politiques en matière de bioénergie, dynamique de la déforestation, changement climatique, etc.). Le modèle repose sur le principe que la production de denrées alimentaires, de bio-énergies et de fibres forestières doit être analysée et planifiée de manière intégrée dans les secteurs de l'agriculture, la foresterie et la bioénergie. Parmi les principaux projets dans lesquels GLOBIOM est actuellement utilisé sont AnimalChange, EnerGEO, EUCLIMIT, GHG-Europe, GLOBAL IQ, IMPACT2C, REDD-PAC.

Le modèle économique **AGMEMOD** (Agricultural Member State Modelling) a été créé en 2001, étant initialement coordonné par Brendan Riordan de Teagasc (The Agriculture and Food Development Authority) en Irlande ([AGMEMOD Partnership, 2008](#); [Chantreuil et al., 2012](#); [van Leeuwen & Tabeau, 2005](#)). AGMEMOD est un modèle d'équilibre partiel multi-produits, avec le rôle d'évaluer des mesures, des programmes et des politiques dans le domaine de l'agriculture à la fois au niveau de l'Union Européenne, ainsi qu'au niveau des États membres.

Afin d'intégrer les modèles des pays individuels dans un modèle européen combiné, AGMEMOD utilise une approche bottom-up. Sur la base d'un ensemble de "templates", les modèles spécifiques à chaque pays ont été créés pour analyser le secteur agricole, permettant de capturer l'hétérogénéité des systèmes agricoles européens à travers la paramétrisation du modèle. Dans AGMEMOD, les projections macroéconomiques, sur un horizon de 10 ans, proviennent des services de la Commission Européenne et des services nationaux de recherche de chaque pays modélisé. Parmi les clients d'AGMEMOD se trouvent la Commission Européenne, les gouvernements nationaux des pays modélisés, ainsi que des organisations qui représentent les agriculteurs et d'autres parties intéressées.

2.2.2 Comparaison entre AROPAj et les modèles économiques agricoles : CAPRI, AGLINK-COSIMO, GLOBIOM et AGMEMOD

Les objectifs des modèles

Tous les modèles analysés ci-dessous visent à modéliser le secteur agricole mais en fonction de leurs caractéristiques spécifiques, leurs objectifs bien qu'entrelacés dans une certaine mesure, ont un champ d'application différent.

Ayant comme objectif initial d'analyser les réformes successives de la Politique Agricole Commune, AROPAj a la capacité d'intégrer les relations complexes entre l'agriculture et l'environnement, pouvant être utilisé dans plusieurs domaines, à la fois économiques et environnementaux, tels que la réduction des gaz à effet de serre, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, les pollutions d'origine azotée, les politiques agro-environnementales. AROPAj permet une analyse à quatre niveaux (infra-régional, régional, pays et Union Européenne).

Dans le cas du modèle CAPRI, en prenant en compte les instruments de la PAC et l'utilisation de données biophysiques pour la construction d'indicateurs environnementaux, le modèle a pour objectif d'évaluer les impacts ex ante de la PAC et des politiques commerciales sur la production, les prix, les revenus et l'environnement, d'un niveau glo-

bal à un niveau régional ou ferme-type, avec un accent sur l'Union Européenne.

Le modèle AGLINK-COSIMO est utilisé pour analyser l'offre et la demande de l'agriculture mondiale. Contrairement à AROPAj, qui permet une analyse détaillée des émissions de gaz à effet de serre, le modèle Aglink-Cosimo est limité à cet égard. Selon [Jensen et al. \(2018\)](#), Aglink-Cosimo doit être amélioré et développé pour pouvoir analyser la contribution potentielle et les impacts de l'agriculture pour une économie mondiale à faible émission de carbone, n'étant pas encore préparé avec toutes les fonctionnalités nécessaires pour prendre en considération les émissions agricoles et les efforts d'atténuation correspondants.

GLOBIOM a comme objectif principal d'analyser la compétition dans l'utilisation des terres, en prenant en compte 3 secteurs, l'agriculture, la foresterie et la bioénergie. Le modèle permet d'explorer les divers compromis et synergies autour de l'utilisation des sols et des services écosystémiques, ayant la capacité de répondre à des questions liées à la demande future de produits alimentaires, l'atténuation du changement climatique par les bioénergies, les émissions de GES, ou encore l'adaptation au changement climatique ¹⁰.

AGMEMOD a pour objectif principal de générer des analyses sur les perspectives de marché des produits de base agricoles et pour effectuer des analyses d'impact des changements de politique sur le secteur agro-alimentaire au niveau UE ou au niveau pays Membre ¹¹.

Approche et techniques de modélisation

Alors que le modèle AROPAj est un modèle d'offre, les modèles CAPRI, AGLINK-COSIMO, GLOBIOM et AGMEMOD sont des modèles d'équilibre partiel. Parmi les modèles d'équilibre partiel, où la demande et l'offre sont à la base des équations comportementales, CAPRI est différenciée, son noyau consistant en deux modules inter-connectés : un module offre et un module de marché.

De nature, AROPAj est un modèle comparatif-statique, comme le modèle CAPRI. Contrairement, Aglink-Cosimo est un modèle récursif-dynamique, chaque variable ayant une certaine valeur pour une année donnée et chaque année étant modélisée sur la période de projection et dépendant des résultats des années précédentes ¹². GLOBIOM et AGMEMOD sont également des modèles dynamiques. GLOBIOM est récursif dynamique par le fait que les changements d'utilisation des terres sont effectués sur une période de 10

10. voir <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/EcosystemsServicesandManagement/GLOBIOM.h>

11. See <http://agmemod.eu/home/agmemod-partnership>

12. Aglink-Cosimo modélise dix ans dans le futur

ans généralement, modifiant la disponibilité des terres dans les différentes catégories au cours de la période suivante. Le changement dans l'utilisation des terres est ainsi transmis d'une période à l'autre.

AROPAj, CAPRI et GLOBIOM sont basés sur la programmation mathématique. Alors que le modèle AROPAj est un modèle de programmation mathématique au départ linéaire (avec des variables binaires, et une composante non linéaire quand les fonctions de rendements qui dépendent de l'eau et l'azote sont intégrées), le module d'offre de CAPRI se compose d'un ensemble de modèles indépendants de programmation non linéaire. Contrairement, AGMEMOD est un modèle économétrique et Aglink-Cosimo est un modèle d'équilibre partiel basé sur des équations comportementales.

Couverture géographique

Tous les modèles qui font partie de cette analyse sont caractérisés par une couverture significative des pays, soit au niveau européen, soit au niveau global, selon le modèle. AROPAj couvre 27 États Membres ¹³ de l'Union Européenne.

Dans CAPRI, le module offre est focalisé en particulier sur l'UE27, Turquie, Norvège et les Balkans occidentaux et le module demande couvre 77 pays dans le monde entier.

En ce qui concerne les régions et les pays couverts par AGLINK-COSIMO, les modules pays/régions sont développés par les secrétariats de l'OCDE et de la FAO, conjointement avec des experts et des administrations nationales. Dans la dernière version du modèle, la composante AGLINK inclut 14 modules : 10 pays et régions membres de l'OCDE (Australie, Canada, États-Unis, Union Européenne, Suisse, Norvège, Japon, Corée, Mexique, Nouvelle-Zélande) et quatre pays non membres de l'OCDE (Argentine, Brésil, Chine et Russie). La région agrégée UE comprend les 28 membres divisés dans deux sous-modules endogènes (les 15 premiers membres et les 13 derniers membres intrants dans l'UE) ¹⁴. La composante COSIMO du modèle comprend 42 modules endogènes : trois membres de l'OCDE (Chili, Israël et Turquie), 27 autres pays non-membres OCDE et 12 agrégats régionaux (voir Figure .2 dans les Annexes).

GLOBIOM couvre 50 régions du monde, incluant les États membres individuels de l'UE.

Le modèle AGMEMOD couvre en plus des États membres de l'UE, certains pays

13. Sauf la Croatie.

14. Il y a 3 régions qui composent le module UE du modèle : EUN (UE-28), E15 et NMS (pour les 13 derniers états membres)

individuels tels que la Macédoine, l'Ukraine, la Russie et la Turquie. Pour tous les pays inclus dans le modèle, la modélisation est effectuée selon les mêmes règles, la raison d'inclusion de ces États non-membres de l'UE, consistant dans le fait que la Russie et l'Ukraine jouent un rôle important sur le marché européen des céréales et que la Macédoine et la Turquie sont des pays en voie d'adhésion à l'UE.

Couverture du secteur agricole

Tous ces modèles sont multi-produits. Le modèle AROPAj couvre l'ensemble des productions agricoles au niveau européen, sauf la viticulture et la horticulture. Pas moins de 32 productions végétales et 28 productions animales sont incluses dans le modèle ¹⁵.

Dans le modèle CAPRI, le module d'offre comprend environ 50 activités des cultures et animales, dans les catégories d'activités suivantes : céréales, oléagineux, autres cultures annuelles, fruits et légumes, fourrages, friches, bovins, porcs, volailles et d'autres animaux.

La dernière version du modèle AGLINK-COSIMO inclut plus de 90 produits (céréales et autres cultures, produits animales, produits à l'huile végétale, produits laitiers, produits d'alimentation, produits liés à l'énergie (Les biocarburants : éthanol et biodiesel, sont pleinement intégrés dans le modèle), sucre et les édulcorants (voir Figure .3).

GLOBIOM couvre au niveau global environ 20 cultures parmi les plus importantes au monde ¹⁶, une gamme des productions animales, des produits forestiers, l'eau et différentes filières de transformation de l'énergie (bioénergie de première et deuxième génération).

AGMEMOD comprend la majorité des productions végétales et animales, qui peuvent être réparties dans quatre catégories principales : céréales, oléagineux et cultures

15. Le modèle couvre un large éventail d'activités agricoles. Les productions végétales incluses dans le modèle sont : *durum wheat, soft wheat, barley, oats, other cereals, rye, rice, maize, sugar beet, A-sugar, B-sugar, C-sugar, tobacco, cotton, flax and hemp, rapeseed, sunflower, soja, proteins, field vegetables, fallow, 1988 set-aside, various set-aside, fix set-aside or forest, short rotation coppice such as miscanthus and poplars, potatoes, fodder vegetable, fodderbeet, fodder maize, alfalfa, protein fodder, permanent meadows, temporary grassland*. Les productions animales contiennent : *8-days slaughtered calves, 2-months slaughtered calves, 6-months calves (field), calves reported on-farm to be young bulls, calves reported on-farm to be more 2-yr bulls, female calves from dairy herd non reported on farm, female calves from breeding herd non reported on farm, female calves reported on farm, male calves bought to be young bulls, male calves bought to be bulls (> 2 years), female calves bought to renew the dairy herd, female calves bought to renew the breeding herd, 18-months bulls, 1-yr males, 1-yr males bought to be bulls, 1-yr female on-farm dairy herd, 1-yr female on-farm breeding herd, 1-yr female bought for dairy herd, 1-yr female bought for breeding herd, 2-yr males on-farm > beef, dairy heifers, bred heifers, dairy cows, suckler cows, sheep, goats, pigs, poultry*.

16. La version GLOBIOM-EU inclut 27 cultures.

de racine, cultures permanentes, animaux et produits laitiers.

Les sources des bases de données

Les modèles du secteur agricole font usage de nombreuses sources de données, dont certaines sont utilisées par la plupart des modèles (Eurostat, RICA, etc.), d'autres n'étant utilisées que par certains modèles (Oil World, données d'instituts de recherche, etc.).

Le modèle AROPAj repose sur la base de données RICA, décrite dans la section 2.1.1. Les autres bases de données auxquelles AROPAj fait recours pour certains de ces modules, sont : CORINE Land Cover (CLC), Land Use/Cover Area frame Statistical Survey (LUCAS), Digital Elevation Model (DEM), European Soil Database fourni par European Joint Research Centre (JRC), données en contenu et besoins en énergie/protéines (INRA), inventaires annuels (CCNUCC), ainsi que les informations climatiques fournies par l'unité Monitoring Agricultural ResourceS (MARS) du JRC.

Selon [Britz & Witzke \(2014\)](#), le modèle CAPRI se caractérise par une base de données cohérente, unifiée et bien documentée¹⁷, provenant de sources diverses, principalement des statistiques officielles de l'UE, statistiques nationales et des statistiques régionales (e.g. EUROSTAT, OCDE, FAOSTAT, RICA, base de données REGIO, etc.). Les données utilisées dans le modèle CAPRI incluent des informations sur la production végétale, la taille du cheptel, l'utilisation des terres, le commerce extérieur, l'abattage, etc. Le modèle assure la cohérence entre les données économiques (prix, etc.) et les données physiques (rotation des cultures, etc.). Les équipes CAPRI ont créé une base de données complète et cohérente (COCO) au niveau de chaque État membre dans le but de corriger les incohérences dans les données statistiques, de combler les lacunes et d'intégrer des données provenant de sources autres que celles d'Eurostat. Lorsqu'il y a des lacunes dans les données officielles, elles sont remplies par des algorithmes développés à cette fin. Le fait que dans les statistiques officielles européennes, les données sont souvent collectées de manière indépendante, peuvent apparaître des cas dans lesquels elles ne sont pas cohérentes. Comme pour AROPAj, le modèle CAPRI doit recourir à ses propres méthodes pour remédier aux éventuelles lacunes dans les données, éliminer les incohérences ou des erreurs de données, par exemple des ruptures non plausibles de séries temporelles ou des valeurs statistiques aberrantes. La procédure utilisée par le modèle CAPRI implique l'utilisation de techniques d'estimation sous contraintes, procédure interne qui corrige

17. Des investissements considérables ont été faites par l'équipe de modélisation de CAPRI afin de créer une base de données parfaitement adaptée aux exigences du modèle et développer des algorithmes applicables dans le temps et dans l'espace.

automatiquement les données. Pour AROPAj, le processus de calibrage permet d'assurer une plus grande cohérence dans les valeurs des paramètres du modèle. Il existe des cas où, comme dans AROPAj, le nombre d'animaux utilisés dans le modèle CAPRI diffère de celui indiqué dans les inventaires officiels de la CCNUCC. Dans le même temps, un problème commun à la fois pour AROPAj et CAPRI est la disponibilité des données au niveau de détail requis, les modèles étant parfois forcés à recourir à des méthodes telles que l'utilisation d'estimations provenant de la littérature ou des calculs agrégés basés sur les données disponibles.

Dans AGLINK-COSIMO, les sources de données utilisées pour le module européen du modèle sont très diverses. Dans le cas des prix, la plupart proviennent des notifications des États membres à la DG AGRI. Pour les prix des huiles ou oilseeds, la source de données est représentée par Oil World. Pour les prix du biodiesel et de l'éthanol, le rapport F.O. Licht's World Ethanol and Biofuels est utilisé. Pour les prix de consommation, les données historiques jusqu'en 2008, proviennent de la base de donnée Laborsta de l'Organisation internationale du travail, après 2009, les prix de consommation étant estimés. Les données sur les cultures et les animaux, l'offre de lait, viande, les surfaces, proviennent de Eurostat. Pour le module d'alimentation, les données sur la production sont obtenues de FAOSTAT, et sur le commerce sont obtenues de FAOSTAT, UN Comtrade et des agences statistiques nationales (telles que la base de données sur le commerce du service agricole extérieur du Département de l'agriculture des États-Unis (USDA) et Statistique Canada).

La base de données GLOBIOM a été créée à partir de diverses sources (FAO, NASA, ISRIC, USGS, JRC, IFRPI, etc.) et contient des données géo-spatiales en matière de sol, climat, utilisation des sols, topographie, fertilisation. Les données ont du être harmonisées pour avoir une résolution spatiale commune, car elles variaient considérablement en termes de fiabilité, résolution spatiale, temporelle.

La base de données d'AGMEMOD est en partie constituée des données d'offre, en faisant recours au bilan des produits (e.g. la production, les importations, les exportations, la consommation alimentaire humaine, l'utilisation des aliments pour animaux, etc.). Ces variables ainsi que les prix des produits de base appartiennent à l'ensemble des variables endogènes du modèle AGMEMOD, étant déterminés à l'intérieur du modèle. Pour alimenter cette base de données, est utilisée en principal la base de données Eurostat (AgrIS-Agricultural Information System et NewCronos). Une autre partie de la base de données AGMEMOD se réfère aux instruments de la PAC (instruments de paiement direct, les aides au revenu) qui pendant la période de projection sont soit maintenus constants à des niveaux convenus politiquement, soit modifiés conformément au scéna-

rio de changement de politique analysé. Une autre partie des données couvre les données macroéconomiques qui proviennent des services statistiques nationaux des États membres ou de prévisions macroéconomiques internationales. Les prévisions des prix du marché mondial font partie d'un autre jeu de données du modèle, étant principalement obtenues à partir du système de modélisation FAPRI. Les prix mondiaux pour certains produits sont tirés de Oil World et OCDE/FAO. Les instruments de politique, les données macroéconomiques ainsi que les prix sur le marché mondial appartiennent aux variables exogènes d'AGMEMOD, étant déterminées en dehors du modèle. Dans le cas des variables endogènes, l'étape initiale du processus de collecte de données dans AGMEMOD rencontre souvent des problèmes liés soit à des données incomplètes ou incohérentes, soit à des données d'offre qui ne sont pas équilibrées. Ça pose des difficultés, étant donné qu'AGMEMOD est un modèle d'équilibre et exige que la base de données de l'offre et de la demande soient équilibrées pour tous les années et pays analysés. Lorsque les données ne sont pas équilibrées, des informations supplémentaires sur les pays doivent être cherchées auprès des instituts nationaux de statistique, des instituts de recherche, des connaissances des experts. Dans le même temps, comme chaque modèle de pays repose sur une base de données contenant des séries temporelles annuelles sur l'offre de produits agricoles, il y a des situations quand pour certains États membres, l'intervalle des séries temporelles peut être très courte (Chantreuil et al., 2012).

Le calibrage des modèles

Le calibrage est différent d'un modèle à l'autre, mais il y a un point commun dans le sens que, quelle que soit la méthode de calibrage, tous ces modèles rencontre des défis qui apparaissent pendant cette étape, les modèles recourant à des solutions spécifiques pour les dépasser.

Le processus de calibrage du modèle AROPAj suppose à déterminer tout un jeu de paramètres parmi l'ensemble des paramètres associé à un groupe-type de producteurs. Principalement, les limites potentielles qui peuvent survenir, sont dues aux informations insuffisantes qui peuvent affecter certains paramètres. Par conséquent, dans les étapes préliminaires de la création du modèle, a lieu une méthode de vérification qui suppose la résolution des informations manquantes (par exemple, dans le cas des cultures, RICA pourrait donner la surface et la production, mais pas le prix). Dans ces cas, la méthode mise en place suppose de recourir aux calculs imbriqués pour remplir les valeurs manquantes au niveau du groupe type. Ainsi, dans le cas où manquent des informations au niveau groupe type pour un paramètre, elles sont remplacées par des valeurs moyennes régionales. Si ces valeurs au niveau régional manquent également, le modèle fait recours aux valeurs moyennes au niveau pays. Si les valeurs nationales manquantes aussi, est

utilisée la valeur par défaut (il est extrêmement rare quand ces valeurs par défaut sont utilisées). Un autre défi qui peut survenir lors du processus de calibrage est lors de l'étape de comparaison entre les variables calculées et les variables observées qui constitue la base du critère de calibrage¹⁸. La base RICA doit être complétée par des informations techniques exogènes qui ne sont pas fournies (e.g. les caractéristiques des engrais, le cycle de vie des animaux), le calibrage supposant une ré-estimation du sous-ensemble, incluant d'une part, les paramètres non fournis par le RICA et les paramètres estimés avant. Les principales variables qui contribuent au critère de calibrage sont représentées par les catégories d'animaux, les surfaces de culture et les apports alimentaires. Le calibrage du modèle AROPAj permet de lancer le calibrage groupe type par groupe type, pour tout un pays ou un groupe de pays, selon la charge du serveur de calcul. L'arrêt du processus de calibrage se fait soit lorsque la limite du nombre d'itérations est atteinte¹⁹ soit lorsqu'un changement supplémentaire de la valeur des paramètres n'améliore pas le critère au cours d'une phase. Au fil du temps, les progrès informatiques ont permis de réduire énormément le temps nécessaire au calibrage. S'il y a 5 ans, plusieurs semaines étaient nécessaires pour calibrer AROPAj, actuellement le temps nécessaire a été réduit à moins de 48h pour calibrer environ 1900 groupes-type.

Le calibrage du modèle CAPRI suppose le respect de certaines conditions pour chaque point de calibrage et pour chaque modèle, soit au niveau de ferme-type soit au niveau NUTS 2 (les coûts marginaux doivent être égaux aux revenus marginaux, tout en respectant la faisabilité de toutes les contraintes). Les modèles qui composent le module d'offre CAPRI sont des modèles de programmation caractérisés par une fonction objective. En ce qui concerne la simulation du modèle, la méthodologie de base du module offre consiste à modéliser l'offre agricole au niveau régional ou ferme-type en utilisant une approche d'une fonction de profit agrégée soumise à diverses contraintes. Dans la première étape sont déterminés les coefficients des intrants de la variable optimale par hectare ou par tête (par exemple, besoins en éléments nutritifs des animaux et des cultures). La deuxième étape consiste à déterminer le mix de maximisation du profit pour les activités animales et végétales, avec une minimisation simultanée des coûts pour les engrais et les aliments dans le module d'offre. Contrairement à la plupart des intrants ou des produits, qui peuvent être vendus ou commercialisés à des prix fixes, les fourrages (maïs fourrager, herbe, ensilage, paille) sont considérés comme non commerciaux dans le modèle. L'utilisation de la méthode de programmation mathématique dans le module d'offre permet de bien saisir les relations entre les activités de production agricole et l'intégration directe

18. Le critère de calibrage représente la somme des carrés des écarts pondérés, chacun correspondant à la différence entre l'observation RICA et la variable optimale PL associée.

19. Il s'agit d'un nombre prédéfini pour les phases MonteCarlo et du gradient.

des paiements compensatoires, des obligations de mise en jachère, des mises en jachères volontaires et les quotas de vente. La simulation du module de marché implique le choix de la forme fonctionnelle, plus précisément d'une fonction quadratique normalisée pour l'alimentation, l'offre, et d'une fonction de dépenses Leontief généralisée pour la consommation humaine). Le module de marché CAPRI comprend un sous-module pour les outputs agricoles commercialisés (modèle mondial multi-produit spatial et non stochastique) et un sous-module faisant référence aux prix des jeunes animaux. La connexion entre le module d'offre et le module de marché suppose une procédure itérative, étant donné que les modules d'offre sont résolus indépendamment à des prix fixes. La procédure suppose que les termes constants des fonctions comportementales pour l'offre et la demande d'aliments sont calibrés après chaque itération, aux résultats de modèles de programmation agrégés au niveau des États membres. La moyenne pondérée des nouveaux prix obtenus en résolvant le module de marché définira les prix utilisés par le module d'offre lors de la prochaine itération. CAPRI se caractérise par une application de type modulaire car le module d'offre régional pour un certain État membre peut être exécuté à des prix exogènes fixés sans faire recours au module de marché. Dans le même temps, le modèle permet d'activer ou de désactiver l'option de ferme-type.

AGLINK-COSIMO est caractérisé par un processus de calibrage qui consiste à trouver les valeurs pour un ensemble de variables de modèle afin d'illustrer l'état de l'économie en tant que scénario de référence ou benchmark. L'une des caractéristiques de la calibration de Aglink-Cosimo est de fournir un cadre flexible permettant l'intégration de diverses sources d'informations dans le modèle à travers des facteurs de calibrage qui peuvent être utilisés comme variables d'exercice. Comme dans la plupart des modèles de marché multi-produits, les variables utilisées dans le modèle sont traitées différemment lors du calibrage. Elles sont réparties du côté de l'offre (surface, production, etc.) du côté de la demande (alimentation, consommation industrielle, combustibles, etc.) et du côté échanges entre pays (importation, exportation). Les hypothèses indirectes comme des modifications dans les modes de consommation, le taux de conversion des aliments pour animaux dans le temps, sont plus difficiles d'être harmonisées dans le modèle. AGLINK-COSIMO repose sur l'hypothèse que les marchés mondiaux des produits agricoles sont concurrentiels, les agents économiques représentés par les acheteurs et les vendeurs jouant le rôle de preneurs de prix. Dans AGLINK-COSIMO, les prix du marché sont déterminés en établissant un équilibre global ou régional de l'offre et de la demande. Les produits domestiques fabriqués et commercialisés sont considérés comme homogènes et comme des substituts parfaits pour les acheteurs et des vendeurs. Aglink-Cosimo n'est pas un modèle spatial, les importateurs ne pouvant pas distinguer les produits de base selon leur pays d'origine. Dans le même temps, les marchés non agricoles ne sont pas modélisés et

sont traités de manière exogène. Environ 36 000 équations entre dans la composition du modèle Aglink-Cosimo, étant résolues pour toutes les années de la période de simulation. Le fonctionnement du modèle est basé sur 4 éléments : variables, constantes, paramètres et résidus. Les variables qui peuvent être expliquées/endogènes ou explicatives/exogènes, contiennent également quatre dimensions : "régions", "produits", "items" et "années"²⁰. Les variables endogènes doivent être déclarées telles quelles et sont calculées lors de la simulation du modèle. Les variables exogènes sont fixes pour l'exécution de la simulation, mais peuvent prendre des valeurs différentes pour chaque année. Les variables exogènes spécifiques sont des résidus, considérés comme des variables exogènes lors des exercices de simulation et des variables endogènes lors du calibrage²¹. Les résidus sont différents pour chaque équation comportementale et chaque année, ce qui permet un bon calibrage du modèle pour tout point de donnée historique. Les coefficients du modèle incluent les paramètres et les constantes, qui contrairement aux variables, sont constants pour toutes les années de la simulation. Les paramètres sont utilisés dans de nombreuses équations comportementales pour lier des variables, représentant le plus souvent des élasticités. Dans AGLINK-COSIMO, une grande partie des équations comportementales est spécifiée sous forme de log-log, dans ces fonctions, à la fois les variables explicatives et expliquées étant exprimées en termes logarithmiques. Les paramètres sont tirés de la littérature ou calculés à partir d'informations historiques. Actuellement, Aglink-Cosimo permet la réalisation des analyses stochastiques à la suite de la création en 2011 par JRC-IPTS de la possibilité d'effectuer des simulations stochastiques partielles afin d'évaluer le degré de sensibilité des projections de base européennes sur les fluctuations du rendement des cultures en particulier. Ces analyses stochastiques avec AGLINK-COSIMO (qui implique la réalisation de jusqu'à 500 simulations) n'ont pas le rôle de prévention des conséquences d'éventuelles incertitudes affectant le marché, mais permettent au décideur de quantifier la plage de variation autour des résultats projetés en sélectionnant des sources d'incertitude spécifiques (Joint Research Centre, 2015).

Dans le cas du modèle AGMEMOD, on ne parle pas du calibrage dans le même sens que dans les modèles précédents. L'approche de modélisation d'AGEMOD met en évidence une spécificité du modèle, toutes les relations paramétriques comportementales étant estimées à partir de données des séries temporelles historiques, contrairement aux autres modèles dont les paramètres sont souvent calibrés. Compte tenu du grand nombre

20. Les dimensions 'régions' et 'produits' ont le rôle d'identificateurs pour les équations comportementales, la dimension 'items' montre le type d'équation et permet d'incorporer dans le modèle des informations sur les politiques, à savoir des droits de douane et des quotas ne s'appliquant qu'à un nombre limité de produits.

21. Ces variables sont utilisées pour calibrer le modèle AGLINK-COSIMO sur des données ex post et en vue de produire une référence à moyen terme.

de pays et des produits inclus dans le modèle AGMEMOD, et implicitement du nombre de paramètres et d'équations à estimer, le modèle fait recours à une stratégie d'estimation décentralisée qui suppose que toutes les équations d'un modèle de pays sont estimées par le partenaire AGMEMOD responsable pour ce pays. Dans AGMEMOD, le processus de paramétrage comprend 5 étapes. *La pré-estimation* suppose la sélection des équations paramétriques à estimer et la spécification de leur forme fonctionnelle. Les variables peuvent entrer dans les équations sous forme de ratios, transformations logarithmiques, racines carrées, termes quadratiques ou cubiques. Afin d'améliorer la qualité de l'estimation, des variables supplémentaires (time dummies, time trends, etc.) sont également introduites. L'objectif de la pré-estimation est d'obtenir un modèle de régression linéaire correctement estimé à l'aide des méthodes des moindres carrés ordinaires (MCO). *L'estimation* commence une fois qu'une spécification de régression linéaire appropriée a été choisie pour toutes les équations du modèle. *La post-estimation* vérifie la qualité d'ajustement des équations estimées, les signes attendus pour les paramètres associés aux variables clés du modèle (les prix, les mesures politiques, etc.), ainsi que ces paramètres estimés soient statistiquement différents de zéro. *Le calibrage* est nécessaire lorsque des séries de données incomplètes empêchent l'utilisation de procédures d'estimation régulières. Certains paramètres sont donc choisis sur la base des estimations disponibles dans la littérature ou en recourant aux connaissances d'experts. *La validation* du modèle AGMEMOD suppose des simulations intra-échantillon, des évaluations ex-post des politiques, ainsi que des analyses de choc qui sont appliquées aux modèles de pays individuels et au modèle combiné.

Outils informatiques

Dans le cas de tous les modèles, l'évolution des capacités informatiques représente un facteur clé pour le développement des différentes étapes de la construction du modèle et de ses applications.

Actuellement, AROPAj utilise la structure MGG (Matrix Generator Generator), composée d'instructions FORTRAN, le code étant ensuite automatiquement converti en GAMS (General Algebraic Modeling System), un langage de programmation spécialisé dans des questions d'optimisation. Les outils du modèle fonctionnent dans les environnements Unix ou Linux. De plus, l'évolution du progrès informatique de calcul représente une force du modèle qui a la capacité d'accroître ses aptitudes de modélisation lorsque de nouveaux problèmes scientifiques apparaissent, en anticipant la nécessité de dépasser les limites informatiques.

Le modèle CAPRI utilise le langage GAMS en principal et le solveur CONOPT

développé par ARKI Consulting and Development, Denmark, utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation non linéaire à grande échelle. Le développement et la mise à jour du modèle impliquent une "approche de type réseau" localisée à Bonn, sous la forme d'un club dont les membres contribuent en développant de nouvelles approches méthodologiques, de nouveaux projets et en proposant des solutions techniques.

La structure informatique AGMEMOD est basée sur le langage GAMS. Bien que GAMS a permis la réduction de certains problèmes dus à l'interaction avec un grand nombre de modélisateurs, le programme n'est pas en mesure de juger la pertinence du signe ou de l'ampleur des valeurs des paramètres ni la capacité du modèle à obtenir des projections de marché plausibles. Pour cette raison, dans le cas du modèle AGMEMOD, a été nécessaire l'incorporation de nouveaux outils dans le système GAMS pour effectuer des analyses de choc et des analyses au sein des échantillons.

GLOBIOM est résolu à l'aide d'un solveur de programmation linéaire, pouvant être exécuté avec le logiciel GAMS.

L'échelle groupe-type

Un des atouts important d'AROPAj est constitué par l'utilisation des groupe-types en tant que les agents économiques du modèle, ainsi que par la liaison forte avec les données du RICA. Ce lien donne à AROPAj la capacité de décrire avec une grande précision chaque exploitation type, rendant possible l'analyse du comportement de la ferme (e.g. ajustement du capital animal, changements dans l'allocation des sols, etc.). Le plus souvent, les modèles plus globaux manquent de précision et ont des difficultés à capter les différents mécanismes à l'échelle de la ferme. Par rapport aux autres modèles, AROPAj présente aussi l'avantage de pouvoir être utilisé à plusieurs échelles (infra-régional, inter-régional, nationale et européenne). Il est donc capable de simuler le comportement de l'agriculture européenne à plusieurs échelles.

Le modèle CAPRI a introduit le niveau de ferme-type dans le système pour plusieurs raisons, notamment : l'amélioration de la fiabilité des indicateurs environnementaux, la possibilité à capturer l'hétérogénéité des pratiques agricoles dans une région, la possibilité à analyser les politiques agricoles au niveau de ferme-type, ainsi que la réduction du biais lié à l'agrégation du modèle au niveau régional en utilisant des données RICA pour des fermes individuelles. Au-delà de la classification des exploitations agricoles basée sur l'importance du revenu agricole des fermes ou sur la base de la spécialisation, CAPRI prend en compte quelques éléments spécifiques. Chaque région ne contient pas plus de 5 fermes-types choisies comme étant les plus représentatives, en raison des restrictions en termes de temps de calcul et des coûts de gestion qui pourraient être générées

par un grand nombre des fermes-types. En tant que niveau de typologie, CAPRI utilise le même format à 3 chiffres utilisé par le RICA pour permettre une meilleure comparaison.

Informations supplémentaires sur la structure des modèles

AROPAJ présente l'avantage que l'utilisation de nouveaux blocs, programmes ou applications est en grande partie autonome par rapport au noyau du modèle, ce qui donne la possibilité d'utiliser n'importe quelle version du modèle. Malgré l'intégration des nouveaux blocs au cours du temps, la structure linéaire d'AROPAJ est restée stable et robuste. On peut donc affirmer qu'ajouter de nouveaux paramètres et des variables primales (liées à une activité) ou duales (liées à une contrainte)²² dans le modèle ne pose aucune difficulté tant qu'on dispose des données pertinentes pour estimer les paramètres du modèle.

Au fil du temps, en raison de l'émergence de nouveaux outils de la Politique Agricole Commune, la taille du bloc destiné à la PAC dans AROPAJ a considérablement augmenté. L'intégration des problèmes environnementaux dans AROPAJ avec l'émergence du problème du changement climatique a conduit à de substantiels développements dans la représentation des processus physiques et technico-économiques.

AROPAJ a l'avantage d'être conçu de façon générique, avec une conception modulaire, permettant de traiter une grande diversité de systèmes de production dans différentes zones géographiques. L'enveloppe du jeu de contraintes et de variables est suffisant pour définir tous les types d'exploitations représentées, bien que selon les fermes modélisées, les paramètres de chaque exploitation sont évidemment différents.

Dans le même temps, l'amélioration du bloc agronomique dans AROPAJ et l'émergence d'un intérêt pour l'étude de la pollution agricole qui ne provient pas des émissions de GES, ont conduit à l'introduction d'un bloc d'azote dans le modèle. AROPAJ peut être couplée avec d'autres modèles basés sur différentes grilles spatiales. On parlera de "couplage faible" ou de "forçage" lorsqu'AROPAJ est associé à d'autres modèles (e.g. STICS, MODCOU, AGRAF, PaSim, etc.). Cela renforce la capacité du modèle d'élargir le champ de l'analyse des questions agri-environnementales. Pour que AROPAJ soit couplé avec STICS, un effort particulier a été fait pour intégrer les pratiques agricoles en raison de leur rôle dans la modélisation des actions des agriculteurs et du lien entre le comportement des agents économiques modélisé par AROPAJ et le fonctionnement bio-

22. La variable duale fait référence à la variable implicite liée à une contrainte dans un modèle de programmation mathématique. Afin de distinguer la contrainte et la variable duale (multiplicateur de Lagrange) et pour des raisons pratiques, on utilise la bijection contrainte - variable duale en lui donnant le nom de la contrainte.

physique d'un champ spécifique, tel que modélisé par STICS. Le couplage entre AROPAj et STICS a permis l'inclusion dans AROPAj des conditions pédoclimatiques pour chaque groupe-type agricole européen. Contrairement au couplage avec STICS, le lien entre le modèle PaSim et AROPAj est d'autre nature, plutôt externe, par le fait qu'il n'y a pas de feedback entre les deux modèles.

Dans le cas du modèle AGLINK-COSIMO, en ce qui concerne l'inclusion de la PAC dans le modèle, et implicitement dans le module UE, le modèle ne prend en considération la réforme de la PAC que partiellement. Cela est dû au fait que l'impact de la production n'est pas encore finalisé pour une évaluation complète. Dans le même temps, l'agrégation géographique du modèle ne permet pas de capturer la répartition des paiements directs dans les États membres. Dans le cadre du système des paiements directs, Aglink-Cosimo inclut quatre variables, qui font référence aux paiements directs qui affectent la surface, les rendements, les stocks ainsi que les subventions en fonction de la quantité produite. Toutefois, certaines composantes des paiements directs, telles que les paiements redistributifs, les régimes en faveur des jeunes ou des petits agriculteurs, ne sont pas prises en compte. La composante écologique est incluse dans Aglink-Cosimo. Parmi les zones d'intérêt écologique, les friches, les cultures à fixation d'azote font partie des solutions afin de respecter la condition de 5% des terres arables. Dans le même temps, la proportion de la surface des prairies permanente par rapport à la superficie agricole totale est maintenue constante de manière exogène sur la période analysée.

Dans le modèle CAPRI, chacun des modèles qui composent le module d'offre maximise le revenu agricole régional à des subventions et prix donnés. Les principales contraintes sont liées à la terre (les prairies et les terres arables sont considérées comme des substituts imparfaits), les variables politiques (i.e. les quotas laitiers), les restrictions alimentaires (les besoins en nutriments des animaux²³), les prix étant exogènes dans le module d'offre et donnés par le module de marché. La substitution entre les prairies permanentes et les terres arables a été ajoutée dans le modèle, auparavant les deux constituaient deux dotations fixes. Comme particularité en ce qui concerne l'inclusion de la PAC, dans le modèle CAPRI, la diversification des cultures en tant qu'une des exigences de la composante écologique, fait recours à l'utilisation de l'indice Shannon²⁴, dont le seuil est basé sur l'analyse des fermes individuelles en utilisant des données du RICA, l'indice s'appliquant uniquement aux cultures annuelles incluses dans un fichier pré-établi.

23. En ce qui concerne les exigences d'alimentation pour chaque animal, un mix d'aliments dont le coût est minimal, est choisi sur la base de 10 types d'aliments, qui comprennent 5 types de fourrage non commercialisable et 5 types de concentrés.

24. L'indice Shannon est un indice statistique indiquant le nombre d'espèces dans un environnement et la répartition des individus au sein de ces espèces, qui sont échantillonnées de manière aléatoire.

Particularités de certains modèles

Établir la base de référence comme point de comparaison ou de projection temporelle, en tenant compte des futurs changements attendus dans le secteur agricole, diffère d'un modèle à l'autre. La base de référence du modèle CAPRI prend en compte les prévisions externes en combinant des données des experts (Commission Européenne, FAO, Banque mondiale, chercheurs) et en assurant la transparence de l'intégration de l'information.

Dans le cas du modèle AGLINK-COSIMO, la procédure consiste à envoyer des questionnaires aux pays membres de l'OCDE qui complètent les séries temporelles sur les développements futurs dans leur pays. Ces questionnaires se réfèrent à toutes les variables endogènes et exogènes du modèle Aglink. Étant donné que les pays ne connaissent pas les attentes futures des autres membres de l'OCDE, les données qu'ils complètent dans le questionnaire peuvent entraîner une incompatibilité une fois ces données rassemblées. Pour éviter ça, l'OCDE générera des résultats compatibles par l'exécution répétitive du modèle, ce qui conduira finalement à la mise à jour des données du questionnaire. Ainsi, nous observons une interaction entre le fonctionnement du modèle et les attentes des experts du marché.

Le processus de validation du transfert des résultats du modèle AGLINK à la Commission Européenne en vue de préparer le "Outlook" à moyen terme qui est publié annuellement par la CE, comporte plusieurs étapes. Une base préliminaire est obtenue après le recalibrage de la composante UE de la base de référence OCDE/FAO précédente. Étant donné que l'entier système d'équations est résolu simultanément et que seule la composante de l'UE est recalibrée, la base de référence peut s'écarter des chiffres à court terme, car des modifications du commerce net de l'UE pourraient entraîner des modifications des prix intérieurs et mondiaux. Cette base préliminaire est examinée à Bruxelles par des experts de la DG AGRI et du JRC afin de bénéficier de l'expertise sur chaque marché, ce qui implique un certain degré de calibrage des paramètres du modèle. Cela permet de détecter des conditions macroéconomiques ou d'autres situations qui ne peuvent pas être reproduites par le modèle. Par conséquent, il existe également une analyse d'incertitude et une analyse stochastique partielle permettant d'identifier les variables plus affectées par l'incertitude. Lorsque le taux de réussite diminue considérablement, ça signifie qu'une partie des paramètres doivent être recalibrés. Dans le cas contraire, la base de référence préliminaire est présentée aux décideurs des politiques publiques, aux chercheurs, aux experts du marché, aux modélisateurs ou à d'autres parties prenantes de l'UE ou du monde entier, dans le cadre d'un workshop annuel visant à améliorer les projections de base et à poursuivre le recalibrage du modèle.

La validation des résultats du modèle AGMEMOD nécessite d'abord une validation initiale effectuée par des équipes de pays modélisés, les partenaires effectuant une estimation et un calibrage supplémentaires jusqu'à l'obtention de résultats statistiques satisfaisants. Il existe ensuite une validation externe pour laquelle des rapports de pays détaillés sont préparés, les interactions entre les partenaires et les experts nationaux jouant un rôle important.

2.3 Cadre de modélisation

2.3.1 Mise à jour du bloc effet de serre dans AROPAj

Afin de mettre à jour le module effet de serre dans le modèle AROPAj, on a dû mettre à jour les valeurs des paramètres provenant du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur la base duquel le module "GES" du modèle est établi, en utilisant les dernières valeurs soumises en 2018 par les États membres à la "Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique" (CCNUCC). Mais auparavant, nous commencerons par présenter brièvement le cadre procédural du GIEC et de la CCNUCC.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) a été créé en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale, représentant le principal organisme international d'évaluation des changements climatiques et de leurs éventuels impacts socio-économiques et environnementaux ([European Commission, 2014a](#)).

Le calcul des émissions au niveau mondial est effectué par secteur, conformément aux méthodologies du GIEC pour les inventaires de GES, selon un cadre standard commun proposé par le GIEC. Tous les États membres de l'UE déclarent leurs émissions annuelles de GES en tant que signataires de la "Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique" ([IPCC, 2001, 2007](#); [European Commission, 2008](#)). Les inventaires de GES avec tous les paramètres GIEC, soumis par chaque État membre incluent les secteurs suivants : énergie, procédés industriels et utilisation des produits, agriculture, l'utilisation des terres, changements d'affectation des sols et foresterie (LULUCF) et déchets. Les paramètres du GIEC figurent dans les rapports nationaux sur les inventaires de GES. Un code est attribué à chaque secteur, ce qui facilite la gestion des tables sectorielles. L'agriculture est présentée dans les tableaux No 3 «Rapport sectoriel sur l'agriculture».

La méthode de comptabilisation des émissions utilisée dans AROPAj suit de près les lignes directrices et la méthodologie du GIEC, qui consiste à combiner les données concernant les activités spécifiques à chaque pays (e.g. le nombre d'animaux, l'utilisation d'engrais, la superficie cultivée, les systèmes de gestion du fumier, etc.) et les facteurs d'émission standard (e.g. les émissions de CH₄ par animal). Par exemple, la quantité de méthane émise lors du processus de digestion des ruminants est calculée en multipliant le nombre d'animaux par un taux d'émission par animal. Parfois, ces facteurs d'émission sont caractérisés par un certain degré d'incertitude, ne prenant pas en compte tous les changements qui se produisent (changements dans la formulation ou la technique d'application des engrais). Par conséquent, il est nécessaire un raffinement des méthodologies de surveillance pour refléter avec précision les émissions provenant du secteur agricole (Leip, 2010). En plus, en raison des processus biologiques et écologiques complexes impliqués dans les émissions de gaz provenant de l'agriculture, leur mesure est plus difficile que celle des activités industrielles.

Pendant la thèse, on a mis à jour deux fois l'entier bloc effet de serre d'AROPAj. Pour la dernière mise à jour on a réalisé les calculs à l'aide de scripts en langage R et nous nous sommes appuyés sur les plus récentes informations contenues dans le Rapport d'Inventaire National (NIR) et le Format de Rapport Commun (CFR) soumis par les États membres en 2018²⁵, qui sont basées sur les Lignes directrices de 2006 du GIEC. Dans le même temps, on a tenu compte du fait que, cette fois, dans les inventaires, les pays ont été inclus en fonction de 3 options qui supposent une division différente des catégories d'animaux, c'est pourquoi on a dû associer chaque catégorie d'animal aux catégories présentes dans AROPAj, manipulation qu'on a réalisée en R.

Lorsque les valeurs des paramètres sont disponibles dans les soumissions des États Membres à la CCNUCC, on utilise ces informations spécifiques à chaque pays. Sinon, on utilise les valeurs GIEC par défaut. Dans le bilan AROPAj, les émissions de GES -CH₄ et N₂O- sont évaluées en équivalent CO₂ en utilisant le Potentiel de réchauffement global (PRG) à l'horizon de 100 ans par défaut.

Le calcul des émissions de GES repose sur des relations linéaires entre les émissions et les données d'activités, grâce à l'utilisation de facteurs d'émissions pour chaque source d'émissions. Le GIEC fournit un cadre commun de rapport, les données d'activité spécifiques à chaque pays ainsi que les émissions des inventaires nationaux étant examinés par un groupe d'experts internationaux.

25. <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2018>

Le modèle AROPAj prends en compte les cinq principales sources des émissions directes de GES dues aux activités agricoles (IPCC, 2001; De Cara et al., 2005) : émissions d'oxyde nitreux (N₂O) provenant des sols agricoles ; émissions de N₂O provenant de la gestion du fumier ; émissions de méthane (CH₄) résultant de la gestion du fumier ; émissions de CH₄ provenant de la fermentation entérique ; émissions de CH₄ provenant de la riziculture (voir Tableau 2.4).

Dans le modèle, chaque source d'émissions de GES est liée aux variables d'activité pertinentes au niveau de l'exploitation représentative. Étant donné que la méthode de comptabilisation des émissions en AROPAj suit de près celle proposée dans les directives du GIEC, ça facilite les comparaisons des inventaires entre les pays.

TABLE 2.4. Résumé des sources des émissions de GES prises en compte dans AROPAj.
Source : <https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications>

Variable primale	Contrainte	Bilan émissions GES
EMCDT(01)	EMS(01)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions dir. engrais synthétiques
EMCDT(02)	EMS(02)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions dir. application du fumier
EMCDT(03)	EMS(03)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions dir. cultures fixation N
EMCDT(04)	EMS(04)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions dir. résidus de cultures
EMCDT(05)	EMS(05)	N ₂ O - Sols agricoles - Production animale (pâturages)
EMCDT(06)	EMS(06)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions indir. dépôts atmosphériques
EMCDT(07)	EMS(07)	N ₂ O - Sols agricoles - Émissions indir. lixiviation et ruissellement N
EMCDT(08)	EMS(08)	N ₂ O - Gestion du fumier
EMCDT(09)	EMS(09)	CH ₄ - Gestion du fumier (Vaches laitiers)
EMCDT(10)	EMS(10)	CH ₄ - Gestion du fumier (Vaches non laitiers)
EMCDT(11)	EMS(11)	CH ₄ - Gestion du fumier (Ovins)
EMCDT(12)	EMS(12)	CH ₄ - Gestion du fumier (Chèvres)
EMCDT(13)	EMS(13)	CH ₄ - Gestion du fumier (Porcins)
EMCDT(14)	EMS(14)	CH ₄ - Gestion du fumier (Volailles)
EMCDT(15)	EMS(15)	CH ₄ - Cultivation du riz
EMCDT(16)	EMS(16)	CH ₄ - Fermentation entérique (Vaches laitiers)
EMCDT(17)	EMS(17)	CH ₄ - Fermentation entérique (Vaches non laitiers)
EMCDT(18)	EMS(18)	CH ₄ - Fermentation entérique (Ovins)
EMCDT(19)	EMS(19)	CH ₄ - Fermentation entérique (Chèvres)
EMCDT(20)	EMS(20)	CH ₄ - Fermentation entérique (Porcins)
EMCDT(21)	EMS(21)	CH ₄ - Fermentation entérique (Volailles)
EMCDT(22)	EMS(22)	C - Stockage carbone sols

Ensuite, nous présentons brièvement quelle est la méthode de calcul utilisée dans

AROPAj pour chaque grande source des émissions, quels sont les paramètres GIEC par source, ainsi que la façon dont nous les prenons en compte dans AROPAj.

— Les émissions de CH₄ dues à la fermentation entérique

Elles sont principalement influencées par le nombre et l'âge d'animaux, la quantité et le type de nourriture qu'ils consomment et par le type de système digestif. Les animaux les plus émetteurs de méthane entérique sont les ruminants, en particulier les bovins et les ovins. En tant que cadre pour l'estimation des émissions de méthane provenant de la fermentation entérique, les lignes directrices du GIEC recommandent une caractérisation cohérente de la population animale (e.g. espèces et catégories d'animaux, production de lait, climat) qui est indispensable pour estimer les émissions.

Deux méthodes sont proposées par le GIEC pour calculer les émissions dans cette catégorie : (i) la méthode Échelon 1 ("Tier 1" dans la terminologie GIEC), qui est une méthode plus simple, et (ii) la méthode Échelon 2, qui suppose une approche plus complexe. Les deux méthodes impliquent, pour chaque catégorie d'animaux, une multiplication du nombre d'animaux par le facteur d'émission correspondant, suivie d'une somme des émissions de toutes les catégories d'animaux afin de calculer les émissions totales. Cependant, l'application de ce calcul est différente pour chacune des deux méthodes, la méthode 2 étant appliquée sur des catégories plus désagrégées de population des animaux, les facteurs d'émissions étant calculés différemment par rapport à la méthode Échelon 1 qui utilise des valeurs par défaut.

La fermentation entérique étant l'une des principales sources présentes dans le modèle, AROPAj utilise la méthode Échelon 2, qui consiste dans des données d'activité spécifiques et détaillées au niveau pays. Dans AROPAj, les émissions sont comptabilisées pour chacune des six catégories d'animaux utilisées dans le modèle (1. vaches laitières, 2. vaches nourrices, 3. ovins, 4. chèvres, 5. porcins, 6. volailles).

Pour calculer les facteurs d'émissions, on utilise donc l'équation 4.14 de la méthode 2 proposée dans le Guide de bonnes pratiques par le GIEC ([IPCC, 2001, 2006](#); [European Commission-Eurostat, 2011](#)) :

$$Fact_{emiss} = (Cons_{energie} \cdot Y_m \cdot 365 \text{ jours/an}) / 55.65$$

Où :

$Fact_{emiss}$ = facteur d'émissions [kg CH₄/tête/an]

$Cons_{\text{energie}}$ = consommation d'énergie brute [MJ/tête/jour]

Y_m = facteur de conversion du méthane (%)

Le facteur 55.65 [MJ/kg CH₄] représente le contenu énergétique du méthane. On calcule ensuite les émissions totales nationales en faisant la somme des multiplications entre les facteurs d'émissions obtenus et la population des animaux correspondante.

Le facteur de conversion du méthane (Y_m) représente la fraction d'énergie alimentaire convertie en méthane (IPCC, 2006). Y_m est un des paramètres AROPAj, dont les valeurs dépendent de la catégorie d'animal. Il fait partie de la liste des paramètres avec lesquels le modèle fonctionne. Nous avons extrait ces valeurs trouvées dans les inventaires des États membres au CCNUCC. Si dans le cas d'un État membre la valeur n'était pas disponible, j'ai utilisé la valeur par défaut proposée par le GIEC.

— Émissions de CH₄ dues à la gestion du fumier

Ce sont les émissions du CH₄ produit par la décomposition du fumier dans un environnement anaérobie lors de son stockage et traitement, et de son application sur des pâturages.

Les émissions dues à la gestion du fumier sont influencées par la quantité de fumier produite ainsi que par la proportion de fumier qui se décompose dans des conditions anaérobies. La quantité de fumier est liée au nombre d'animaux et au taux de production de fumier par animal. La proportion de fumier décomposée de manière anaérobie est influencée par le type de gestion du fumier. Le fumier traité et stocké sous forme solide ou s'il est déposé sur les pâturages, produit une quantité moins significative de méthane, en se décomposant dans des conditions plus aérobies, tandis que le fumier géré sous système liquide peut produire une grande quantité de méthane (IPCC, 2001, 2006).

Trois méthodes sont proposées par le GIEC afin d'estimer les émissions provenant de la gestion du fumier. Quelle que soit la méthode utilisée, comme pour les émissions de méthane provenant de la fermentation entérique, l'estimation des émissions de méthane dues à la gestion du fumier nécessite dès le départ une division cohérente de la population animale en espèces, catégories et sous-catégories spécifiques afin de pouvoir établir comment le fumier est géré et surtout la quantité de fumier produite par animal.

La première et la troisième méthode (Tier 1 et Tier 3, dans l'inventaire proposé par le GIEC) ne sont utilisées que dans des cas particuliers, la première étant une méthode très simple, critiquée par le GIEC et la troisième méthode n'étant utilisée que par certains pays.

AROPAj utilise la méthode 2, recommandée par le GIEC. Afin de développer les facteurs d'émissions spécifiques par pays, AROPAj dispose d'informations détaillées et précises sur les caractéristiques des animaux inclus dans le modèle et la manière de gestion du fumier. Ainsi, dans le modèle, les 6 grandes catégories d'animaux (vaches laitières, vaches nourrices, ovins, chèvres, porcins, volailles), sont également divisées en fonction d'âge, de l'orientation de la production (lait et viande), en tenant compte des besoins alimentaires.

Dans AROPAj, le calcul des émissions de CH₄ dues à la gestion du fumier repose donc sur les 3 équations 4.15, 4.16 et 4.17 proposées dans le Guide de bonnes pratiques (IPCC, 2001), . Pour déterminer les facteurs d'émission, il est d'abord nécessaire de déterminer la masse solide volatile du fumier excrété par les animaux, représentant le matériau organique du fumier composé d'éléments biodégradables et non biodégradables.

$$Solide_{volat} = Cons_{energie} \cdot (1/18.45) \cdot (1 - Energ_{digest}/100) \cdot (1 - Teneur_{cendres}/100)$$

Où :

$Solide_{volat}$ = masse solide volatile du fumier excrétée par jour sur la base de matière organique sèche [kg-dm/jour]

$Cons_{energie}$ = consommation d'énergie brute [MJ/jour]

$Energ_{digest}$ = énergie digestible de l'alimentation en pourcentage (par exemple 0.06)

$Teneur_{cendres}$ = teneur en cendres du fumier en pourcentage (0.08 en général)

La valeur 18.45 représente la densité énergétique de l'alimentation (en MJ par kg de matière sèche).

AROPAj calcule ensuite les facteurs d'émission, selon l'équation 4.17 de l'inventaire du GIEC. Pour cela, nous avons besoin des paramètres B₀, MCF et MS (indiqués ci-dessous), dont les valeurs se trouvent dans les soumissions des États membres au CC-NUCC.

$$Factemiss_i = Solide_{volat}_i \cdot 365 \text{ jours/an} \cdot B_{0i} \cdot 0.67 \cdot \sum_{jk} MCF_{jk} MS_{ijk}$$

Où :

$Factemiss_i$ = facteur d'émissions annuel (kg) de CH₄ pour le type d'animal i

$Solidevolat_i$ = masse solide volatile du fumier excrétée (kg) par jour pour le type d'animal i

B_{0i} = capacité maximale de production de CH₄ pour le fumier produit par type d'animal i [m^3 CH₄ / kg masse solide volatile excrétée]

MCF_{jk} = facteurs de conversion du méthane pour chaque système de gestion du fumier j par région climatique k (pourcentage)

MS_{ijk} = fraction de fumier pour le type d'animal i pour chaque système de gestion du fumier j par région climatique k

0,67 = facteur de conversion de m^3 de méthane en kg de méthane

Les paramètres MCF prennent en compte l'influence du climat sur la production de CH₄ devant être obtenus pour chaque système de gestion du fumier, comme dans le cas des paramètres MS. Chaque système est divisé dans 3 types de climat (Froid, Tempéré, Chaud), en fonction de la localisation de chaque État membre²⁶. Les dernières soumissions des membres de l'UE comprennent 9 systèmes : Anaerobic lagoon, Liquid system, Daily spread, Solid storage and dry lot, Pasture, range and paddock, Composting, Digesters, Burned for fuel or as waste, Other. Étant donné que plusieurs modifications sont apparues dans les derniers inventaires, on a mis à jour ces modifications régulièrement dans le modèle (par exemple, introduction du nouveau système Composting, et fusion des systèmes Solid storage et Dry Lot dans un seul système).

Dans le cas du paramètres MS, la somme pour chaque catégorie d'animal, pour les 9 systèmes est égale à 1, au niveau national. Pour les pays caractérisés par deux climats (France, Italie, Espagne et Portugal), j'ai considéré la somme des valeurs MS pour les deux climats (froid et tempéré). Pour les valeurs non disponibles dans les inventaires, j'ai utilisé les valeurs par défaut du GIEC pour Ouest et Est, en tenant compte de la localisation de chaque État membre en Europe.

Pour les paramètres MCF, pour les pays ayant deux climats, j'ai calculé la moyenne pondérée, les poids étant représentés par le MS associé au même système et même catégorie d'animal que le MCF. Dans le cas où les valeurs d'inventaire n'étaient pas disponibles pour certains systèmes, j'ai utilisé les valeurs par défaut fournies par le GIEC.

26. Dans le cas des pays caractérisés par un seul climat, la grande majorité présente le climat froid, à l'exception de la Grèce, Chypre et Malte, ayant un climat tempéré. Quatre États membres (France, Italie, Espagne, Portugal) sont inclus dans les inventaires CCNUCC, comme ayant deux climats, froid et tempéré.

Après le calcul des facteurs d'émissions par type d'animal i , on multiplie les valeurs obtenues par la population, afin d'estimer les émissions totales par le type d'animal i . En additionnant les émissions de toutes les types d'animaux, on obtient les émissions nationales.

— Émissions de N_2O dues à la gestion du fumier

Dans cette catégorie d'émissions, il s'agit du N_2O produit directement ou indirectement à la suite du stockage et du traitement du fumier produit par les animaux. Les émissions de N_2O résultant de la gestion du fumier dépendent à la fois du contenu en azote et en carbone, ainsi que du type de traitement et de la durée de stockage. Le stockage et le traitement du fumier de bétail dépendent également du mode d'alimentation des animaux, à savoir : animaux nourris dans des enclos et animaux nourris au pâturage.

Les émissions indirectes de N_2O dues à la gestion du fumier ont été introduites pour la première fois dans les lignes directrices 2006 du GIEC, raison pour laquelle on les a rajouté également dans le modèle. Si, au début, le calcul de cette catégorie était basé sur l'équation 4.18 (IPCC, 2001), la méthode de calcul actuelle inclut à la fois les émissions directes et indirectes de N_2O , conformément aux équations 10.25-10.29 dans les lignes directrices de (IPCC, 2006).

En faisant la somme des émissions directes et indirectes dans une seule équation, nous obtenons les émissions totales de N_2O dans cette catégorie. Les émissions indirectes sont de deux types, celles dues à la volatilisation du N et celles dues à la lixiviation lors de la gestion du fumier.

Pour le calcul des émissions directes, j'ai eu besoin d'extraire des inventaires nationaux les paramètres NEX, ainsi que les paramètres pour les neuf systèmes de gestion EF3 (<EF3ANAER>, <EF3LIQUI>, <EF3SOLIDDRYLOT>, <EF3OTHER>, <EF3ANADI>, <EF3BURNF>, <EF3PASTU>, <EF3COMPOST>, <EF3DAILY>) et MS par système et type d'animal (MSANAER, MSLIQUI, MSSOLIDDRYLOT, MSOTHER, MSANADI, MSBURNF, MSPASTU, MSCOMPOST, MSDAILY), explicités ci-dessous.

Pour calculer les émissions indirectes de N_2O provenant de la gestion du fumier, sont nécessaires aussi les paramètres EF4, EF5, FRACgas et FRACleach. Pour les paramètres EF4 et EF5 on a utilisé les valeurs GIEC par défaut (0.01 pour EF4 et 0,0075 pour EF5). Étant donné que les paramètres FRACgas et FRACleach ne sont pas renseignés pour chaque État membre, n'étant pas disponibles ni dans les inventaires, on a décidé d'utiliser les valeurs renseignées par l'Italie dans son Rapport d'Inventaire National (NIR)

à la CCNUCC.

$$\begin{aligned}
 (N_2O)_{(mm)} = & \left[\sum_{(S)} \left[\sum_{(T)} (N_{(T)} Nex_{(T)} MS_{(T,S)}) \right] EF_{3(S)} \right] \frac{44}{28} \\
 & + \left[\sum_{(S)} \left[\sum_{(T)} (N_{(T)} Nex_{(T)} MS_{(T,S)}) \left(\frac{FRAC_{gas}}{100} \right)_{(T,S)} \right] \right] EF_4 \cdot \frac{44}{28} \\
 & + \left[\sum_{(S)} \left[\sum_{(T)} (N_{(T)} Nex_{(T)} MS_{(T,S)}) \left(\frac{FRAC_{leach}}{100} \right)_{(T,S)} \right] \right] EF_5 \cdot \frac{44}{28}
 \end{aligned}$$

Où :

$(N_2O)_{(mm)}$ = émissions totales (directes + indirectes) de N_2O dues à la gestion du fumier dans le pays, (kg N_2O /an)

$N_{(T)}$ = nombre de têtes du type d'animal T dans le pays

$Nex_{(T)}$ = excréments annuels moyennes de N par tête du type d'animal T dans le pays, (kg N/animal/an)

$MS_{(T,S)}$ = fraction d'azote annuel total excrété par type d'animal T gérée dans l'un des différents systèmes de gestion du fumier S dans le pays

$EF_{3(S)}$ = facteur d'émissions pour les émissions directes de N_2O du système de gestion du fumier S dans le pays, kg N_2O -N/kg N

EF_4 = facteur d'émissions pour les émissions de N_2O dues au dépôt atmosphérique d'azote sur les sols et des surfaces aquatiques, kg N_2O -N/(kg NH_3 -N + NO_x -N volatilisé)

EF_5 = facteur d'émissions des émissions de N_2O de l'azote de lixiviation et écoulements, kg N_2O -N/kg N lessivé et écoulé

$FRAC_{gas(T,S)}$ = pourcentage d'azote de fumier géré pour le type d'animal T qui se volatilise dans le système de gestion du fumier S

$FRAC_{leach(T,S)}$ = pourcentage de pertes d'azote du fumier géré pour le type d'animal T dues aux écoulements et à la lixiviation pour le système de gestion du fumier S

— Émissions N₂O provenant des sols agricoles

Les émissions de N₂O provenant des sols agricoles sont divisées en émissions directes et indirectes. Les émissions directes proviennent de l'application d'engrais synthétique, l'application du fumier animal, la production des cultures azotées, la réutilisation des résidus de récolte, l'excrétion des animaux déposés sur les pâturages. Le principal moteur des émissions directes de N₂O par les sols agricoles est l'utilisation d'engrais azotés et le fumier animal. Les émissions indirectes proviennent des dépôts atmosphériques, et de la lixiviation et du ruissellement, en fonction de l'application totale d'azote.

Pour le calcul des émissions de N₂O provenant des sols agricoles, AROPAj suit la méthode de calcul du Guide de bonnes pratiques du GIEC (IPCC, 2001). Dans le cas des émissions directes, les facteurs d'émission suivants ont été extraits et mis à jour en utilisant les valeurs des soumissions de la CCNUCC : EF1-1 (Facteur d'émission - entrées N de l'application d'engrais inorganique sur terres cultivées et prairies), EF1-2 (Facteur d'émission - entrées N provenant du fumier appliqué aux sols), EF1-3 (Facteur d'émission - cultures de fixation d'azote), EF1-4 (Facteur d'émission - N dans les résidus de culture retournés aux sols), EF4 (Facteur d'émission - dépôt atmosphérique), EF5 (Facteur d'émission - lixiviation et du ruissellement de N), FracGAZ (Fraction d'engrais synthétique N appliquée aux sols qui se volatilise), FracGASM (Fraction de N du fumier qui se volatilise), FracLEACH (Fraction de lessivage de N).

— Émissions CH₄ provenant de la cultivation du riz

Les champs de riz inondés produisent du méthane à la suite de la décomposition anaérobie de la matière organique. Au cours d'une année, la quantité de méthane produite sur une surface cultivée avec du riz est une fonction qui dépend du nombre et de la durée des cultures cultivées avec du riz, de l'utilisation d'engrais, des pratiques de gestion de l'eau, du type et de la température du sol, ainsi que d'autres changements organiques et inorganiques.

Dans AROPAj, le calcul de cette source des émissions respecte le Guide de bonnes pratiques du GIEC. La méthode consiste à multiplier la superficie nationale totale récoltée avec du riz par un facteur d'émission. Ce facteur d'émission est extrait des soumissions des États membres, en fonction de différents écosystèmes et conditions (irrigué, pluvial, eau profonde).

2.3.2 La question de la composition et des prix des engrais

Pour chaque groupe-type AROPAj, les dépenses d'engrais par hectare pour chaque culture et chaque ferme représentative sont estimées à partir du RICA. Plusieurs engrais avec des différents teneurs d'azote et prix peuvent être utilisés pour une même culture.

Pour récupérer la quantité d'azote appliquée à chaque culture, pour chaque exploitation représentative, on a dû déterminer le prix moyen des engrais ainsi que la teneur moyenne en azote. Étant donné que plusieurs engrais peuvent être utilisés pour une même culture, on a dû donc construire un engrais "composite" applicable à chaque culture.

Afin de calculer le prix de l'engrais composé pour chaque culture, on a utilisé les données fournies par DairyCo²⁷. Les prix des engrais sont indiqués pour chaque engrais commercial simple et composé (en £/tonne), par mois, depuis avril 2001 jusqu'en avril 2015. On a eu besoin de calculer les prix annuels pour les années 2007-2012, et pour cela, on a choisi les valeurs correspondant aux années agricoles, c'est-à-dire la période juillet-juin. Pour l'année 2009 par exemple, on a utilisé la période juillet 2008 à juin 2009. On a ensuite calculé le prix annuel moyen pour chaque catégorie d'engrais et chacun des six années (en €/tonne) (voir Tableau 2.5 pour l'année 2009).

TABLE 2.5. Prix des engrais pour l'année 2009 (€/tonne).

Source : *Calculs personnels basés sur les données DairyCo.*

Engrais	Prix 2009 (€/tonne)
Ammonium Nitrate	380.4
Urea	417.9
Calcium Ammonium Nitrate (CAN)	297.7
Urea Ammonium Nitrate (UAN)	308.7
Sulphate of NH ₃ (21%N, 24%S)	319.9
Triple Superphosphate (TSP)	661.6
Other Straight P	661.6
Muriate of Potash (MOP)	650.0
Other Straight K	650.0
PK	630.4
NK	545.5
Low N (< 19% N)	543.5
High N (>=19% N)	437.6
Other	561.3

27. DairyCo est une organisation à but non lucratif financée par des taxes qui travaille dans le compte des producteurs laitiers britanniques.

On a ensuite extrait le pourcentage de chaque engrais commercial appliqué à chaque groupe de cultures indiqué dans les rapports annuels "British Survey of Fertilizer Practice" (Fertiliser use on farm crops for crop year 2009) (voir [The British Survey of Fertiliser Practice \(2009\)](#) pour l'année 2009). On a ensuite calculé la moyenne pondérée du contenu d'azote, ainsi que le prix pondéré des engrais pour chaque groupe de cultures et pour chaque année 2007-2012 (voir [Tableau 2.6](#) pour l'année 2009). La prochaine étape a été d'inclure chaque culture AROPAj dans le groupe de culture auquel elle appartient²⁸.

TABLE 2.6. Prix des engrais par cultures inclus dans AROPAj.

Source : *Calculs personnels basés sur les données DairyCo et British Survey of Fertiliser Practice 2009.*

Groupes de cultures (British Survey of Fertiliser Practice 2009)	Prix pondéré des engrais (€/tonne)	Moyenne pondérée Contenu N (1)
céréales de printemps	447.6	0.24
céréales d'hiver	423.9	0.28
betterave à sucre	539.4	0.13
autre travail du sol	512.4	0.17
colza	418.4	0.29
pommes de terre	533.3	0.15
herbe pour le foin	435.2	0.25
herbe pour ensilage	433.8	0.24
toute l'herbe	430.1	0.25

En raison du manque de données disponibles concernant le prix des engrais par culture pour chaque État membre de l'UE, on a dû extrapoler les données britanniques au niveau de l'UE, en les utilisant pour tous les pays membre. Ces valeurs sont ensuite introduites dans le modèle AROPAj (voir [Figure 2.2](#) pour l'année 2009).

Afin de calculer la quantité d'azote par hectare, la formule suivante est utilisée :

$$QN/ha = (g)_{(jk)} * N_{cont j} / P_j$$

28. Les cultures représentées dans le modèle AROPAj qui entrent dans les groupes de cultures fournis dans les rapports "British Survey of Fertilizer Practice" : céréales de printemps (blé dur, riz, maïs); céréales d'hiver (blé tendre, orge, avoine, autres céréales, seigle); betterave à sucre (betterave à sucre); autre travail du sol (tabac, coton, graines de lin, tournesol, soja, protéines, féverole, légumes du champ, légumes fourragères, betterave fourragère, maïs fourrager); colza (colza); pommes de terre (pommes de terre); herbe pour le foin (luzerne); herbe pour ensilage (protéines fourragères); toute l'herbe (prairies permanentes, prairies temporaires).

Où :

QN/ha = La quantité d'azote par hectare ;

$(g)_{(jk)}$ = Dépenses de chaque groupe type du modèle AROPA_j (mesurées en k€/ha) pour chaque culture j et groupe type k ;

P_j = Le prix correspondant d'engrais (k€/tonne) ;

$N_{cont j}$ = La fraction d'azote pour la culture j ;

Code 1	Code 2	Crops AROPA _j	Groups of crops	Parameter price	Weighted price of fertilisers (k€/tonne)	Parameter N content	Weighted average N Content
1	bd	durum wheat	spring cereal	nesbdXX	0.44763203	fesbdXX	0.24099800
6	bl	soft wheat	winter cereal	nesblXX	0.42397965	fesblXX	0.28395896
7	oh	barley	winter cereal	nesohXX	0.42397965	fesohXX	0.28395896
8	op	barley	spring cereal	nesopXX	0.44763203	fesopXX	0.24099800
12	av	oats	winter cereal	nesavXX	0.42397965	fesavXX	0.28395896
17	ca	other cereals	winter cereal	nescaXX	0.42397965	fescaXX	0.28395896
18	se	rye	winter cereal	nesseXX	0.42397965	fesseXX	0.28395896
19	rz	rice	spring cereal	nesrzXX	0.44763203	fesrzXX	0.24099800
20	ma	maize	spring cereal	nesmaXX	0.44763203	fesmaXX	0.24099800
21	bt	sugar beet	sugar beet	nesbtXX	0.53942885	fesbtXX	0.13301698
22	ba	A-sugar	sugar beet	nesbaXX	0.53942885	fesbaXX	0.13301698
23	bb	B-sugar	sugar beet	nesbbXX	0.53942885	fesbbXX	0.13301698
24	bc	C-sugar	sugar beet	nesbcXX	0.53942885	fesbcXX	0.13301698
25	tb	tobacco	other tillage	nestbXX	0.51242192	festbXX	0.17239740
26	ct	cotton	other tillage	nesctXX	0.51242192	fesctXX	0.17239740
27	li	linseed	other tillage	nesliXX	0.51242192	fesliXX	0.17239740
31	cz	rapeseed	oilseed rape	nesczXX	0.41842154	fesczXX	0.29246246
32	tr	sunflower	other tillage	nestrXX	0.51242192	festrXX	0.17239740
35	sj	soja	other tillage	nessjXX	0.51242192	fessjXX	0.17239740
36	pr	proteins	other tillage	nesprXX	0.51242192	fesprXX	0.17239740
39	fv	feverolle	other tillage	nesfvXX	0.51242192	fesfvXX	0.17239740
40	lg	field vegetables	other tillage	neslgXX	0.51242192	feslgXX	0.17239740
41	fr	fallow	Aucun	nesfrXX	0.00000000	fesfrXX	0.00000000
42	gl	1988 set-aside	Aucun	nesglXX	0.00000000	fesglXX	0.00000000
49	ja	fix set-aside or forest	Aucun	nesjaXX	0.00000000	fesjaXX	0.00000000
61	pt	potatoes	potatoes	nesptXX	0.53330439	fesptXX	0.15398000
67	lf	fodder vegetable	other tillage	neslfXX	0.51242192	feslfXX	0.17239740
71	bf	fodderbeet	other tillage	nesbfXX	0.51242192	fesbfXX	0.17239740
72	mf	fodder maize	other tillage	nesmfXX	0.51242192	fesmfXX	0.17239740
73	lz	alfalfa	grass for hay	neslzXX	0.43520745	feslzXX	0.24959459
74	sp	protein fodder	grass for silage	nesspXX	0.43389355	fesspXX	0.24425500
81	sh	permanet meadows	all grass	nesshXX	0.43013621	fesshXX	0.24964000
82	af	temporary grassland	all grass	nesafXX	0.43013621	fesafXX	0.24964000

FIGURE 2.2. Les valeurs des paramètres liés aux prix des engrais et à la teneur en azote pour chaque culture AROPA_j.

Source : Calculs personnels basés sur les données DairyCo et British Survey of Fertiliser Practice 2009.

2.3.3 Le mode d'implémentation de la Politique Agricole Commune dans AROPAj

L'évaluation des réformes de la Politique Agricole Commune a représenté l'objectif central du modèle AROPAj depuis son origine. Au fil du temps, les outils de la PAC ont fortement évolué en raison des réformes successives, raison pour laquelle le module d'implémentation de la PAC dans AROPAj a également enregistré un développement culminant ces dernières décennies. Dans le modèle, tous les instruments de politique, à la fois anciens et nouveaux, ont été maintenus opérationnels. Des séries de variables binaires agissant comme des mesures de seuil ou limite doivent être introduites pour représenter de manière réelle les politiques actuelles.

Le modèle AROPAj a régulièrement tenu compte des changements de la PAC, en introduisant et développant ses instruments dans le modèle, comme ils sont apparus dans l'ordre chronologique. **Le gel des terres** mis en œuvre par la PAC en 1988, a fonctionné dans le modèle comme un tarif binomial, le producteur bénéficiant d'une prime par hectare de terre gelée seulement dans la condition s'il gèle au moins 20% de ses terres arables. Les paramètres utilisés à ce niveau ont été donc la prime, le seuil et éventuellement un coût variable. Le modèle a permis également d'étendre l'utilisation de cet outil dans le sens que la prime par hectare peut être indexée par groupe-type, ce qui permet une régionalisation de l'intervention publique. L'introduction de la **Réforme de MacSharry 1992** dans le modèle fait référence à la prise en considération des propositions de découplage liées aux cultures. Ainsi, de nouveaux paramètres tels que les rendements de référence, les seuils en quantité équivalent céréales et d'autres paramètres de prix, de quantité ou de surface ont été introduits dans le modèle. Le système de mise en jachère obligatoire a représenté un point essentiel de cette réforme. Une **extensification des animaux** a ensuite été introduite dans AROPAj, les subventions étant octroyées en fonction du ratio nombre de bovins par hectare. D'autres outils ont été **la prime à l'herbe**, et **la subvention des jeunes bovins mâles et des vaches allaitantes**. La réforme Agenda 2000 est également implémentée dans le modèle. AROPAj a connu un autre degré de complexité avec l'introduction du découplage (partiel ou complet) caractérisé par un paiement unique par exploitation, à la suite de l'**Accord à Luxembourg de 2003**. D'autres outils qui ont suivi ont été liés à l'introduction du **paquet "Santé" en 2009** et d'autres compléments à la suite de l'adhésion des pays de l'Est à l'UE. Le dernier instrument PAC introduit dans AROPAj fait référence à la **composante écologique** ("versissement de la PAC").

CHAPITRE 3

Spatial and temporal variability of marginal abatement costs of agricultural greenhouse gas emissions in the European Union

Ce chapitre en anglais reprend les résultats du papier "*Spatial and temporal variability of marginal abatement costs of agricultural greenhouse gas emissions in the European Union*", écrit en collaboration avec Stéphane De Cara et Pierre-Alain Jayet. Le papier a été présenté en 2018 au Séminaire de l'*European Association of Agricultural Economists (EAAE)*, à Chania et à l'*International Scientific Agriculture Symposium "Agrosym 2018"*, à Sarajevo.

Abstract

We assess how agriculture may contribute to the mitigation of EU greenhouse gas emissions, and analyze how this contribution varies in both space and time. This assessment relies on a supply-side micro-economic model of the European agricultural sector for a set of farms representative of the diversity of conditions of production at the regional level in Europe. The model endogenously accounts for agricultural sources of methane and nitrous oxide emissions. We take advantage of the large variability in agricultural input and output prices between 2007 and 2012 to quantify how marginal abatement costs curves were impacted at both EU-wide, regional and farm levels. The results indicate that, on average over 2007-2012, EU agriculture may reduce its emissions by approximately 10, 20, and 30%, respectively for emission prices of 38, 112.5, and 205 EUR/tCO₂eq. These average results mask contrasted impacts on base emissions and the rate of abatement across space and time. Based on the simulation results, we estimate a simple yet flexible, non-linear reduced form of abatement supply curve for each EU region and each year.

Keywords : Marginal abatement costs; Greenhouse gas emissions; European Union; Supply-side agricultural model; Mathematical programming

3.1 Introduction

In line with the Paris Agreement objective to keep global temperature increase below 2°C, the European Union (EU) has set ambitious targets to reduce its greenhouse gas (GHG) emissions (-40% and -80% relative to 1990 by 2030 and 2050, respectively, [European Commission, 2018](#)). This will imply a substantial mitigation effort, and cost-effectiveness demands that all emitting sectors contribute to it. Non-CO₂ GHG emissions from agriculture represent approximately 14% of global emissions ([Smith et al., 2014](#)), and about 10% of EU emissions ([European Environment Agency, 2018](#)). In this context, GHG agricultural emissions have come under increasing scrutiny in the climate debate ([Wollenberg et al., 2016](#); [Frank et al., 2017](#)). Agriculture can contribute to mitigate GHG emissions through the deployment of technical measures, as well as structural changes on both the supply and demand side ([Frank et al., 2018b](#)). Yet, no policy instrument is currently in place to explicitly incentivize cost-effective reductions in GHG agricultural emissions within the EU ([De Cara & Jayet, 2018](#)).

The evaluation of the mitigation potential associated with a range of values of the social cost of carbon has given rise to a large body of empirical works. Marginal abatement cost (MAC) curves have become instrumental in this regard. Several studies have proposed evaluations of such curves for agricultural GHG emissions in various contexts and based on various modeling approaches (e.g. [McCarl & Schneider, 2001](#); [De Cara et al., 2005](#); [De Cara & Jayet, 2011](#); [Moran et al., 2010](#); [EPA, 2013](#); [Ragnauth et al., 2015](#); [Pellerin et al., 2017](#); [Garnache et al., 2017](#)). For surveys of the relevant literature, see e.g. [Vermont & De Cara \(2010\)](#), [OCDE \(2015\)](#), and [Eory et al. \(2018a\)](#).

One salient result from this body of literature is the large variability that characterizes available evaluations of the mitigation of agricultural GHG emissions achieved at a given emission price. This variability partly reflects the uncertainty associated with the complex biological and ecological processes underlying these emissions ([Smith et al., 2007](#); [Eory et al., 2018b](#)). Uncertainty and its implications for monitoring, reporting, and verification of agricultural GHG emissions has been put forth as one major hurdle in implementing first-best economic instruments aimed at curbing GHG emissions in this sector ([Grosjean et al., 2016](#); [Garnache et al., 2017](#)).

Yet, the variability of available evaluations of MAC of agricultural emissions goes beyond the reflection of the sole uncertainty surrounding the underlying biological and ecological processes. The meta-analysis conducted by [Vermont & De Cara \(2010\)](#) highlights the role of modeling choices. In particular, whether the evaluation relies on an equilibrium model, a micro-economic supply-side model, or a bottom-up engineering approach is shown to have a strong influence on the results. Beyond the methodological differences between the various modeling approaches, this may be partly explained by the different mitigation levers that each approach integrates.

The variability of MAC also results from the diversity of the conditions of production that determine both the allocation of agricultural activities responsible for GHG emissions and the mitigation strategies that may be adopted by farmers to reduce these emissions. This implies that marginal abatement costs vary by sources and gases. [Reisinger et al. \(2013\)](#) and [Garnache et al. \(2017\)](#) provide some empirical simulation results that illustrate this source of variability. This also implies that the mitigation that can be attained at a given emission price varies in space. The spatial variability of the mitigation associated with a given price has been extensively documented in the literature, notably in the European context at a regional and/or country resolution ([De Cara et al., 2005](#); [De Cara & Jayet, 2011](#); [Perez Dominguez et al., 2016](#)).

The question of how mitigation potential and costs vary in time has received much

less attention in the literature. Yet, agricultural markets are often subject to substantial year-to-year variations in input and output prices. These variations may be caused by supply (e.g. weather), demand, and/or policy shocks. Changes in prices are likely to impact both base GHG emissions and the cost of reducing them. As an illustration, higher crop prices tend to make *ceteris paribus* yield-increasing inputs such as nitrogen fertilizers more profitable, thus increasing the related nitrous oxide emissions, as well as the opportunity cost of reducing these emissions. At the same time, higher crop prices may also increase production costs in the livestock sector through e.g. higher feed costs, which may in turn reduce livestock-related emissions (enteric fermentation, manure management) as well as the costs of reducing those emissions. The net effect on total net emissions and marginal abatement costs is therefore *a priori* unclear.

Chakir et al. (2017) provide econometric estimates of the impact of changes in input and output prices on French GHG emissions levels from land-based sectors (agriculture, forestry, and other land uses). Their results highlight how differently various sources of agricultural GHG emissions respond to changes in prices. They also stress the importance of taking into account the spatial structure of the distribution of emissions. However, these results only inform about the influence of prices on actual emissions, not on the cost of reducing them. The impacts of the variations in agricultural input and output prices on MAC curves has been largely overlooked in the literature, as the vast majority of available evaluations of MAC curves are based on data from one single reference year.

The main objective of this paper is to assess the variability of marginal abatement costs in the European agricultural sector across both time and space. To this end, we use an updated version of a supply-side model of the European agricultural sector that represents farmers' economic choices regarding crop allocation and livestock management for a set of farms representative of the diversity of agricultural conditions of production in Europe. This model is calibrated against annual farm data over a six-year period (from 2007 to 2012), during which agricultural markets have experienced large variations in (input and output) prices. Such variations are illustrated in Figure 3.1 for the case of France, the largest agricultural GHG emitting country in the EU.

The model allows to simulate both base levels of agricultural emissions, as well as the cost-effective reductions in emissions associated with a given range of emission price. The simulation results can be discussed along three dimensions : space, time, and the social cost of carbon reflected in the emission price. These three dimensions are explored in the paper.

The contribution of this paper is threefold. First, it provides an updated assess-

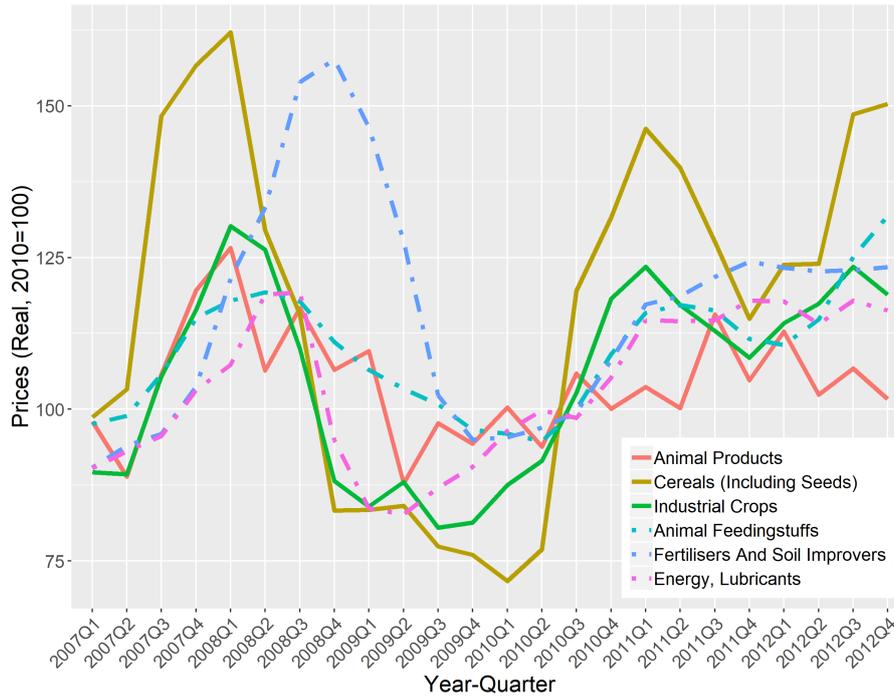


FIGURE 3.1. Quarterly real price index from 2007 to 2012 (2010=100) for some agricultural inputs and outputs in France. *Source : Eurostat.*

ment of the EU-wide cost-effective mitigation of non-CO₂ GHG agricultural emissions that can be achieved for a wide range of emission price. This assessment uses recent country-specific emission factors reported by all EU member states in their GHG inventory reports to the UNFCCC. As it relies on a data for a six-year time period characterized by large variability in input and output agricultural prices, it is likely to provide more robust evaluations than those based on a single reference year. Moreover, this provides a novel insight into the variability of MAC. Second, we analyze simultaneously the temporal and spatial variability of marginal abatement costs and potentials. In particular, we analyze how emissions and marginal abatement costs vary over time at various levels of spatial aggregation (representative farms, regions, and EU-wide). Third, we provide a set of simple yet flexible, non-linear reduced forms that summarize regional marginal abatement cost curves at the regional level and over time.

The remainder of the paper is organized as follows. In Section 2, we provide an overview of the model and the data used in the paper. In Section 3, we present and discuss the simulation results with regard to the spatial and temporal variability of base emissions, i.e. in the absence of an emission prices. Marginal abatement costs are presented in Section 4. Section 5 presents the estimation of the functional forms for the regional abatement supply over time. Section 6 concludes.

3.2 Model and data

The model used in this paper—AROPAj—is an annual, supply-side, micro-economic model of the European agricultural sector. Earlier versions of this model have been extensively used to assess the impacts of changes in EU agricultural and/or environmental policies (De Cara et al., 2005; Galko & Jayet, 2011; De Cara & Jayet, 2011, 2018).¹

The model covers the main annual crops and livestock categories currently produced in the EU. Crop area allocation, animal feeding, and animal numbers are endogenously determined through gross margin maximization subject to agronomic and policy constraints in a given economic, technical, and policy context. The main changes compared to previous versions of the model are an extended country coverage (27 member states, i.e. all current member states but Croatia), a calibration against data from six years (from 2007 to 2012), and an updated module to compute GHG emissions.

The basic modeling unit is the representative farm. Representative farms are clusters of actual real farms surveyed by the EU Farm Accountancy Data Network² (FADN). FADN is the primary source of data used in the model. Individual FADN data are obtained on an annual basis through surveys from almost 80,000 agricultural holdings across the EU. An important advantage of this data source with regard to the purpose of this paper is the consistency of the data collection process across member states and time. It informs about the economic and financial situation of agricultural holdings (e.g. output value, production costs, subsidies, stocks, etc.), farm productivity (yields) and structure (crop- and grassland area, livestock numbers, etc.). Surveyed farms are selected to be representative of the actual (professional) farm population and distribution of types of farming that exist at the regional level.

The first step consists in constructing a typology of the individual surveyed farms. The typology aims at reducing the number of modeled farms for both individual data protection and computing feasibility reasons, while still capturing the diversity of existing structures of the agricultural sector and conditions of production within and between EU regions. The model covers all farms specialized in the main annual crops and livestock activities, as well as mixed crop and livestock farming systems. Holdings specialized in permanent crops (vineyard, olive, orchards and fruits) are excluded. For each year, individual surveyed farms are thus aggregated into representative farms based on automatic

1. A general description of the model is given in De Cara & Jayet (2011) and a full documentation is available at [https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications](https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie%20publique/Publications).

2. For a general presentation of FADN : http://ec.europa.eu/agriculture/rica/concept_en.cfm.

hierarchical classification techniques. The variables used in this process are : region (130 regions in the EU), economic size (10 classes), main type of farming, and altitude class (3 classes : 0-300m, 300-600m, above 600m). The typology is constructed on a year-by-year basis to reflect the possible changes in farm structures over time. The number of representative farms varies between 1747 and 1993, depending on the year.

Each representative farm is then assumed to independently maximize gross margin subject to technical and policy constraints. Formally, each representative farm (indexed by k in year t) is associated with a mixed integer linear programming model :

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}_{kt}} \quad & \pi_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt}) \cdot \mathbf{x}_{kt} - p\gamma \cdot \mathbf{e}_{kt} & (3.1) \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{A}_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt}) \cdot \mathbf{x}_{kt} \leq \mathbf{b}_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt}), \\ & \mathbf{F}_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt}) \cdot \mathbf{x}_{kt} = \mathbf{e}_{kt}, \\ & \mathbf{x}_{kt} \geq \mathbf{0}. \end{aligned}$$

\mathbf{x}_{kt} is the vector of decision variables. It includes the area allocated to each crop represented in the model (24 annual crops, as well as pastures, grassland, and idle land), the number of animals in each livestock category (dairy and non-dairy cattle³, sheep, goats, swine and poultry), and quantity of purchased animal feed. The corresponding components of the vector $\pi_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt})$ are the per-hectare gross margin for each crop (yields times price minus variable costs), per-animal output value, and per-tonne cost of the respective type of animal feed products. Note that animals can also be fed using crop, forage, and/or grass produced on the farm. Input and output prices, which enter the computation of the components of $\pi_{kt}(\boldsymbol{\theta}_{kt})$, are derived from FADN data, and are therefore farm- and year-specific. Farmers are assumed to be price-takers. Input and output prices are thus treated as exogenous parameters in all subsequent simulations.

$\boldsymbol{\theta}_{kt}$ denotes the vector of parameters specific to each representative farm k and each year t that may influence the coefficients of both the objective function and the constraints in program (3.1). For a subset of those parameters, farm-level information is lacking in the FADN database (e.g. grass yields, feeding requirements by animal category, etc.). The corresponding parameter values are therefore calibrated for each representative farm k and each year t . The calibration process starts with initial values drawn from the technical literature or expert knowledge. The parameter values in $\boldsymbol{\theta}_{kt}$ are then varied within an predetermined admissible range around these initial values through an iterative Monte Carlo procedure. Model (3.1) (assuming $p = 0$) is run until the simulated solution

3. Cattle animal categories are further disaggregated into age and sex categories.

in terms of area allocation, gross margin, and structure of animal feeding is sufficiently close to the observed situation reported in the FADN database.

The matrix $\mathbf{A}_{kt}(\theta_{kt})$ and the vector of capacities $\mathbf{b}_{k,t}(\theta_{kt})$ define the set of constraints that condition the feasible production set. These constraints can be categorized into four main blocks. First, the solution must respect land area availability at the representative farm level. In any given year, total agricultural area in a given farm is assumed to be constant. In addition, crop rotation constraints are introduced through maximal area shares between various types of crops. A second set of constraints corresponds to the implementation of CAP provisions (e.g. quotas). Third, the variations of the number of animals in each livestock category are constrained. The demographic equilibrium of dairy and non-dairy cattle at the farm level imposes constraints on the distribution of animal numbers by age and sex (for a formal presentation, see [De Cara et al., 2005](#)). In addition, animal numbers in each livestock category are only allowed to vary within a given range around the initial values reported in the FADN database (plus or minus 15%, as in [De Cara & Jayet, 2011](#)) in order to reflect the inertia of capital and building that is necessary to accommodate animals at the farm level. The last set of constraints regards animal feeding. These constraints play an important role in the GHG emission accounting block of the model as the energy content and digestibility of animal feed enter the calculation of livestock-related GHG emissions. Each animal category is characterized by minimal energy and protein requirements, as well as maximal quantity of ingested matter.⁴ The energy and protein requirements must be met for each animal category without exceeding maximal quantity of ingested matter for the corresponding animal category. Feed can be produced on the farm (crops, forage, grass) and/or purchased (roughage and four types of purchased feedstuff : straight/compound, energy- or protein-rich).

One important change made in the current version of the model regards the updating of the GHG emissions accounting block. Emissions accounting follows closely the 2006 IPCC Inventory Guidelines ([IPCC, 2006](#)) as implemented by member states in annual inventory reports submitted to the UNFCCC. In program (3.1), the matrix $\mathbf{F}_{k,t}$ contains the emission factors that link the level of producing activities with that of GHG emissions. These emissions factors have been obtained through a systematic extraction of the data and parameters reported by each member state in the GHG inventories submitted to the UNFCCC in 2018 for the years 2007-2012.⁵

4. The initial values of energy and protein requirements and maximal quantity of ingested matter are taken from [INRA \(2010\)](#). The corresponding parameters are calibrated for each animal category, each representative farm, and each year

5. See <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/submissions/>

The model covers the main sources of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) caused by agricultural activities : N₂O emissions from agricultural soils, N₂O and CH₄ from manure management, CH₄ emissions from enteric fermentation and rice cultivation.⁶ The vector \mathbf{e}_{kt} gives the respective emissions (in tons of N₂O and CH₄). The components of the vector γ are the value of the Global Warming Potential for the gas associated to each respective emission source (298 for N₂O, 25 for CH₄, (IPCC, 2007) so that total emissions in tons of CO₂-equivalent (tCO₂eq) at the representative farm level are given by $\gamma \cdot \mathbf{e}_{kt}$.

Emissions in the absence of any emissions price policy ($p = 0$)—hereafter referred to as base emissions—for the k -th representative farm in year t are denoted by $e_{kt}(0)$. When faced with an emission price p , each representative farmer endogenously adjusts area allocation, animal numbers and/or animal feeding so that the marginal abatement cost is equal to p . The resulting emissions are denoted by $e_{kt}(p)$, and the corresponding abatement rate can be calculated as :

$$\alpha_{kt}(p) = 1 - \frac{e_{kt}(p)}{e_{kt}(0)}. \quad (3.2)$$

By running the model for a range of values for p , we thus obtain an evaluation of the (relative) abatement supply curve—or, equivalently, the MAC curve—for each representative farm and each calibration year.

Note that, for any given level of the emission price p , the model gives the corresponding cost-effective distribution of the abatement across all farmers. MAC curves can thus be obtained at higher levels of aggregation (region, country, EU-27) by summing $e_{kt}(0)$ and $e_{kt}(p)$ over the appropriate subset of representative farms. In particular, the abatement rate that can be cost-effectively achieved in region⁷ r at a marginal cost p is given by :

$$\alpha_{rt}(p) = 1 - \frac{\sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(p)}{\sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(0)}, \quad (3.3)$$

where K_{rt} denotes the set of representative farms located in region r at year t . Note that, as the typology is established independently for each calibration year, the set of representative farms in any given region is not necessarily identical from one year to the other. Therefore, Eq. (3.2) does not correspond to a balanced panel structure. By contrast, Eq. (3.3)

national-inventory-submissions-2018.

6. Note that the emission coverage of the model excludes CO₂ emissions from the use fossil energy and carbon-containing fertilizers, N₂O emissions due to the cultivation in histosols, as well as the potential changes in carbon stocks in soils and above ground biomass.

7. Eqs. (3.3), (3.4), and (3.5) have been defined at the regional level, but similar calculations can easily be performed at any higher level of geographic aggregation (country, EU).

does provide such a structure since each representative farm is based on a set of FADN-surveyed farms located in one and only one region.

Year-to-year changes in the economic and/or agronomic context may affect both the numerator and the denominator of the second term in Eq. (3.3). An alternative normalization of the abatement rate is :

$$\hat{\alpha}_{rt}(p) = 1 - T \frac{\sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(p)}{\sum_{t=1}^T \sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(0)}, \quad (3.4)$$

which has the advantage to neutralize year-to-year changes in base emissions. The intercept $\hat{\alpha}_{rt}(0)$ in Eq. (3.4) gives the change in emissions in year t relative to the time-averaged emissions.

For the purpose of the paper, it will also be also be useful to examine the time-averaged abatement rate :

$$\alpha_{r*}(p) = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(p)}{\sum_{t=1}^T \sum_{k \in K_{rt}} e_{kt}(0)}. \quad (3.5)$$

3.3 Spatial and temporal variability of base emissions

In this section, we present the model results in the absence of any emission price policy ($p = 0$, see program (3.1)) and focus on the distribution of base emissions.

Over the period 2007-2012, the total base emissions simulated by the model average approximately 369 MtCO₂eq per year. This represents about 92% of the combined emissions reported to the UNFCCC by the 27 member states represented in the model for the same GHG source coverage (about 401 MtCO₂eq per year). The relative weights of CH₄ and N₂O emissions in total EU emissions are approximately 59% and 41%, respectively. The model performs slightly better in reproducing emissions of N₂O (about 94% of reported emissions) than that of CH₄ (approximately 90% of reported emissions). The underestimation of total emissions is partly due to the exclusion of some farms from the scope of the model (very small farms underrepresented in FADN, exclusion of agricultural holdings specialized in perennial crops such as vineyards and orchards).

The simulated annual variations in EU base emissions relative to their 2007-2012 average levels are depicted in Figure 3.2. Over this period, simulated EU base emissions range from 355 MtCO₂ (in 2008, 3.8% below 2007-2012 average) to 385 MtCO₂ (in 2007, 4.5% above the 2007-2012 EU average emissions). Figure 3.2 also shows contrasted

annual variations by gas, with larger changes in N₂O emissions than in CH₄ emissions.

Although the model performs well in reproducing EU average base levels of emissions, it tends to overestimate the annual variations in emissions compared to those reported to the UNFCCC. This may be explained in part by the fact that the model does not account for the possibility on-farms stocks of inputs (e.g. fertilizer, feed), which may mitigate the impacts of year-to-year variations in prices on emissions. This may also be due in part to the underestimation of annual variations of some emission categories in the data reported by member states to the UNFCCC. For instance, the computation of N₂O emissions due to the use of synthetic fertilizers reported in the French emissions inventories is based on the use of a three-year moving average of the applied total quantity of nitrogen (CITEPA, 2018, p. 411), and thus does not fully reflect the influence of annual changes on total emissions.

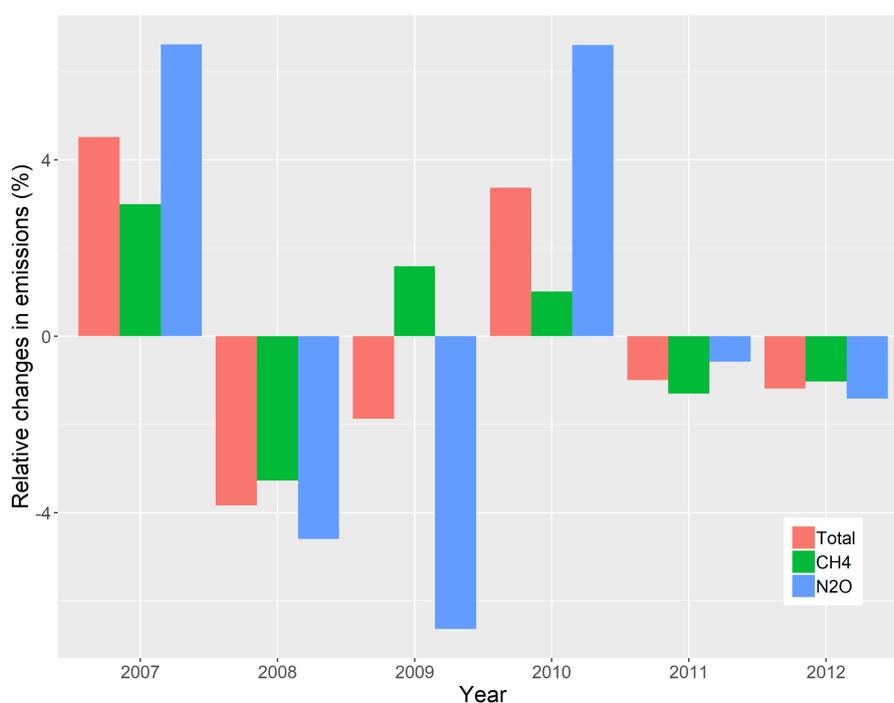


FIGURE 3.2. Annual change in simulated total EU emissions relative to 2007-2012 average levels.

As illustrated in Figure 3.3, the model reproduces well the distribution of emissions across countries. The figure compares the per-year average base emissions simulated by the model with those reported to the UNFCCC at the country resolution (the lowest available resolution in the UNFCCC inventory data). The ratio of simulated vs. reported emissions ranges from 63% (Cyprus) to 125% (Slovakia). The combined emissions of the three largest emitting countries (France, Germany, and the UK) represent approximately 43% of total EU agricultural GHG emissions. For those three countries altogether,

simulated emissions represent slightly more than 97% of the reported emissions.

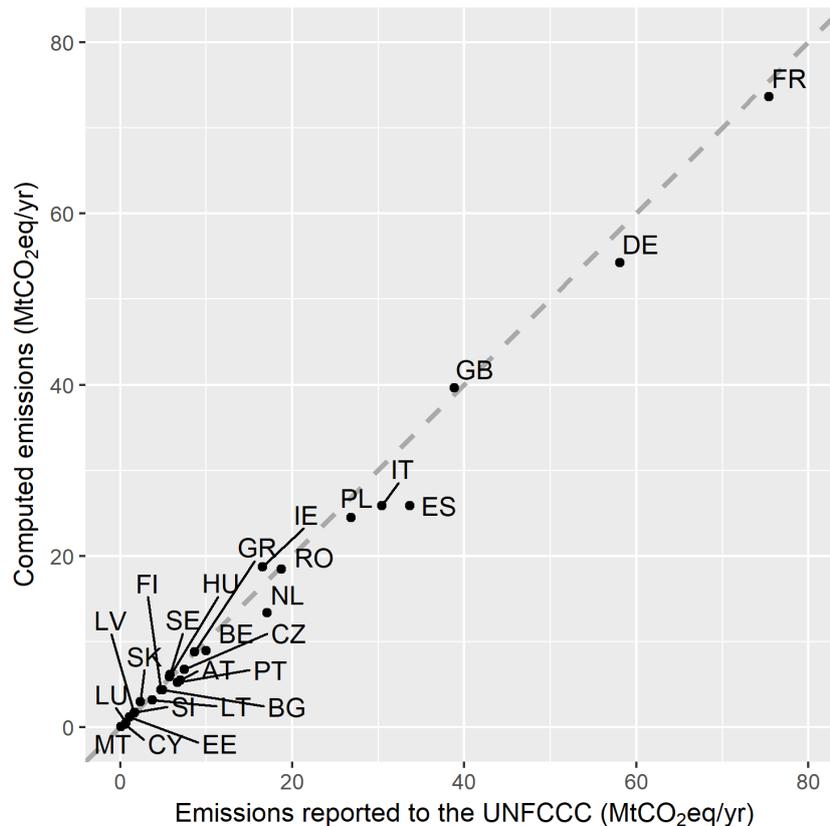


FIGURE 3.3. Computed vs. reported average annual GHG emissions by member state over 2007-2012

Figure 3.4 illustrates the spatial variability of 2007-2012 average base emissions across regions. Per-region 2007-2012 average initial emissions range from 0.05 (Liguria, Italy) to 18.7 MtCO₂eq per year (Ireland). Besides the differences in the size of the agricultural sector between regions, the distribution also reflects the diversity of agricultural practices, productivity, and emission intensity of agricultural activities that prevails between and within EU regions.

Figure 3.4 also underlines the importance of GHG emissions from the livestock sector. The largest emitting regions (e.g. Ireland, Netherlands, Western France, Eastern Poland, Southern Germany, etc...) are characterized by the dominance of livestock activities and large animal numbers.

The influence of the economic and agronomic context on base emissions is not uniform in space. This is illustrated in Figure 3.5, which depicts the deviations of base regional emissions relative to the average levels presented in Figure 3.4. Even in years with higher-than average EU emissions (as 2007 or 2010), base emissions in some regions

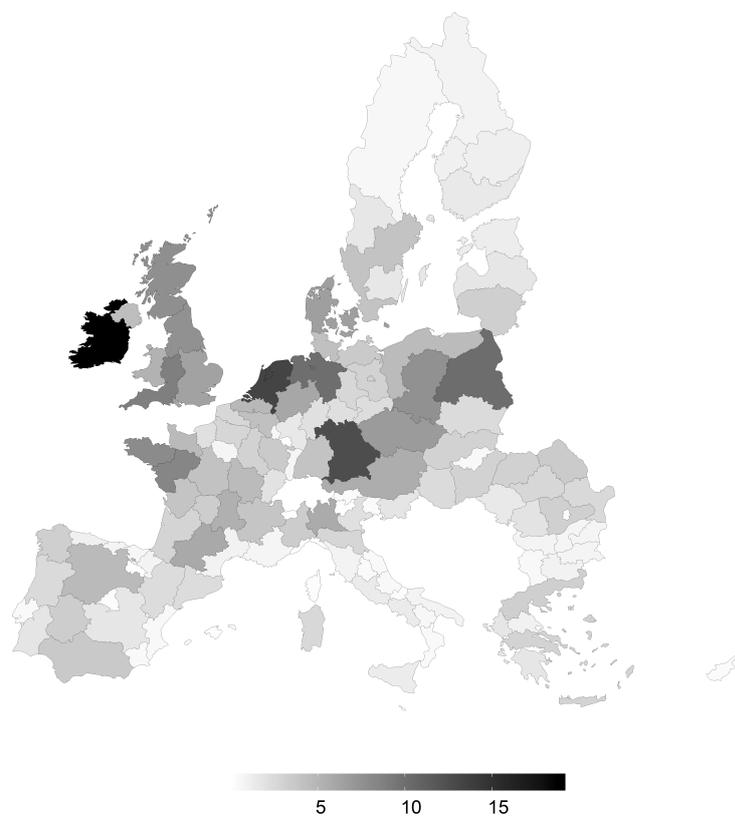


FIGURE 3.4. Average annual base emissions (2007-12) by region (MtCO₂eq).

are lower than their respective 2007-2012 average. The spatially contrasted evolution of base emissions is in line with the results found by [Chakir et al. \(2017\)](#), which underscore the importance of both the spatial structure and source composition of base emissions.

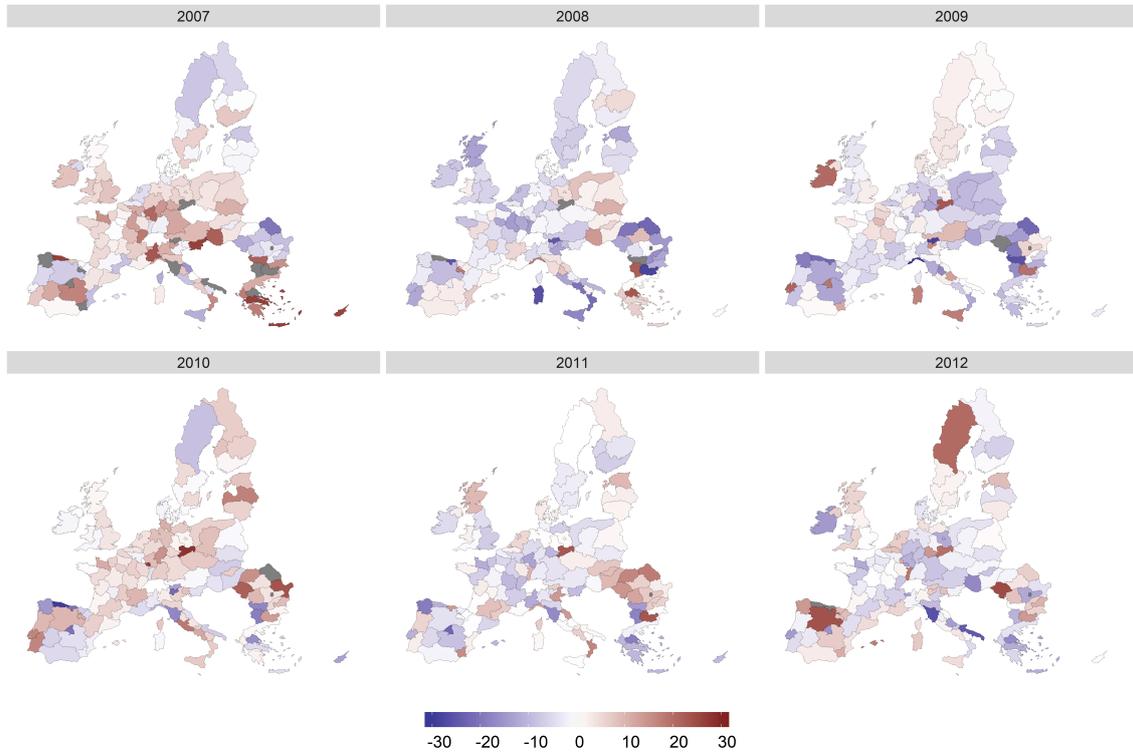


FIGURE 3.5. Deviations of regional base emissions relative to 2007-2012 average regional base emissions (%).

3.4 Spatial and temporal variability of marginal abatement costs

We now turn to the analysis of marginal abatement costs. We thus add the emission price dimension (p) to the time and space dimensions already discussed in the previous section. In the simulations, p is varied from 0 to 10,000 €/tCO₂eq⁸ by 200 steps of length increasing from 1 to 500 €/tCO₂eq.

For each value of p , all representative farms' emissions are aggregated to compute the corresponding EU-wide average abatement rate, or $\alpha_{EU}(p)$ in the notations of Eq. (3.5). The combinations of $\alpha_{EU}(p)$ (horizontal axis) and p (vertical axis) describe the EU-wide MAC curve for 2007-2012. The resulting curve is depicted with black squares in Figure 3.6.

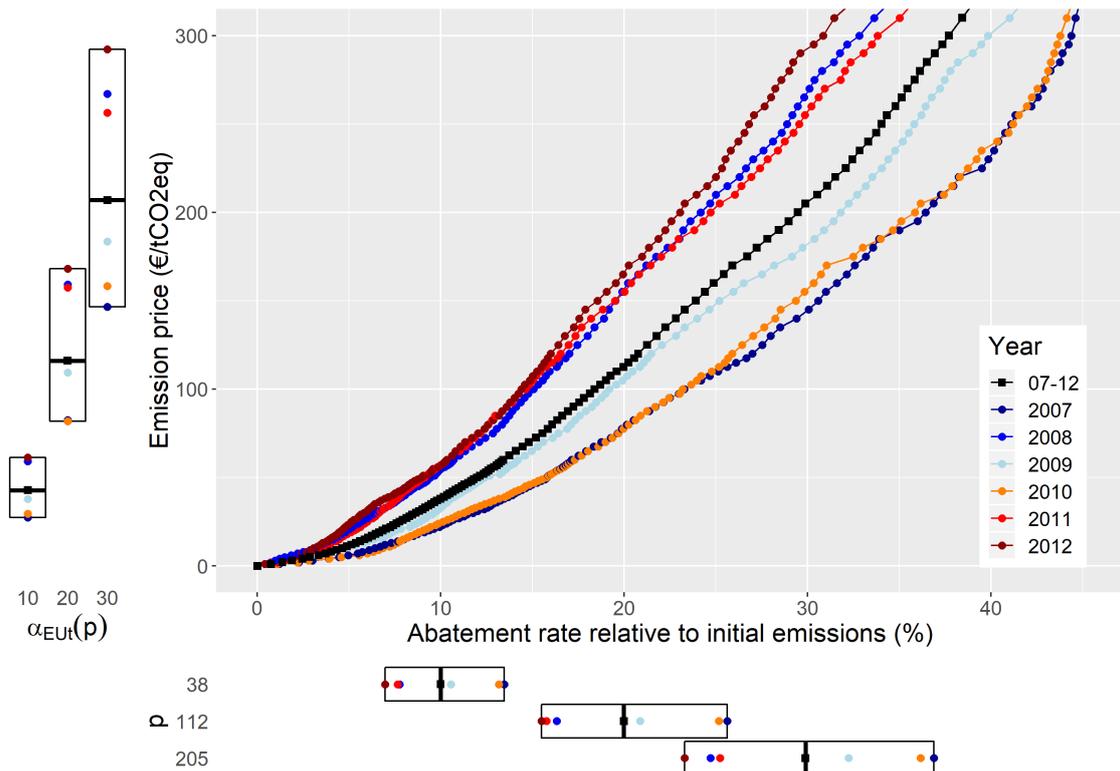


FIGURE 3.6. EU MAC curve for each calibration year (dots) and 2007-2012 average (black squares).

On average over 2007-2012, the emission price associated with a 10% reduction

8. The use of such a high value for the maximum emission price explored will be useful for numerical reasons when we turn to the estimation of reduced functional forms in Section 3.5. In practice for the purpose of this section, we will focus on a more policy-relevant range up to 300 €/tCO₂eq.

in total EU emissions is 38 €/tCO₂eq. This price rises to 112.5 and 205 €/tCO₂eq for a mitigation target of 20% and 30%, respectively. These figures are in line with previous results in the literature. They turn out to be very close to the emission prices implied by the meta-regression model estimated by Vermont & De Cara (2010) : 32, 104, and 206 €/tCO₂eq for a reduction in EU emissions of 10, 20, and 30%, respectively. They are slightly lower than those found by Jensen et al. (2019) in a recent study at the global level (50 and 150 USD/tCO₂eq for a reduction in global agricultural non-CO₂ emissions of 10 and 19%, respectively).

The average mitigation that can be achieved at these emission prices varies substantially from one calibration year to the other. The values of $\alpha_{EU,t}$ for $p = 38, 112.5,$ and 205 €/tCO_2 and $t = 2007, \dots, 2012$ are shown in the bottom panel of Figure 3.6 (dots). The abatement rate ranges from 7 to 13% relative to the respective base emissions for an emission price of 38 €/tCO₂, and from 23 to 37% for a price of 205 €/tCO₂. Because of the convexity of the MAC curves shown in Figure 3.6, the temporal variability of MAC is even more apparent when examining the prices required to reach a given abatement rate across the six reference years (left panel of Figure 3.6). For the same abatement rate, the emission price varies in a ratio of approximately 2 : 1 between the maximum and the minimum of each range. As an illustration, reducing emissions by 20% in 2010 is possible at an emission of 78 €/tCO₂ in 2012; for the same abatement rate in 2012, the emission price reaches 166 €/tCO₂. The simulated MAC are consistently lower in 2007 and 2010, the two years where base emissions were also the highest. Conversely, for calibration years 2008, 2011, and 2012 are characterized by higher-than-average MAC.

We now turn to the spatial variability of MAC. Figure 3.7 shows the 2007-2012 average abatement rate for all EU-27 regions ($\alpha_r(p)$) for $p = 38, 112.5,$ and 205 €/tCO_2 . As discussed above, the EU-wide abatement rates corresponding to these price values are 10, 20, and 30%, respectively. Overall, Mediterranean regions show higher-than-average marginal abatement costs, i.e. lower-than-average abatement rates at a given emission price. By contrast, regions in Western and Central Europe tend to show lower-than-average marginal abatement costs. As these regions are also among the largest emitting regions in the EU (see Figure 3.4), they are the ones contributing the most to the mitigation of agricultural emissions for any of the three examined emission prices.

How does the regional distribution of abatement rates change over time for various values of the emission price? To address this question, the three dimensions—space, time, and emission price—are explored simultaneously in Figure 3.8. For the three values of the emission price (columns) and all years (rows), this figure maps $\alpha_{rt}(p) - \alpha_r(p)$, i.e. the deviation in the regional abatement rate relative to the respective average regional

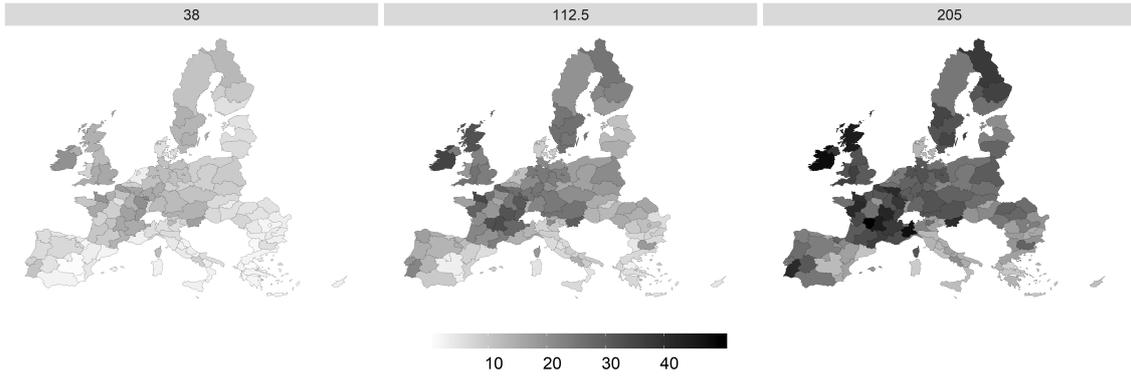


FIGURE 3.7. Cost-effective distribution of the 2007-2012 average regional abatement rate (in %) for three emission prices ($p = 38, 112.5,$ and 205 €/tCO_2) leading to an EU-wide 2007-2012 average abatement rate of 10, 20, and 30%, respectively.

abatement rate shown in Figure 3.7. The figure shows substantial spatial variability in the emission price allowing to reach the abatement target.



FIGURE 3.8. Deviation of the regional abatement rate (in %) for three emission prices ($p = 38, 112.5,$ and 205 €/tCO_2) with respect to the respective regional 2007-2012 average abatement rate.

3.5 Reduced forms of abatement supply curves

In this section, we make use of the full range of emission prices simulated by the model to further characterize the EU-wide and regional MAC curves. Following [De Cara & Jayet \(2011\)](#), we specify the abatement rate in any given region r at time t as a function of the emission price— $\alpha_{rt}(p)$ in Eq. (3.3)—with the following functional form :

$$\alpha_{rt}(p) = \bar{\alpha}_{rt} \left(1 - e^{-\left(\frac{p_{rt}}{\tau_{rt}}\right)^{\beta_{rt}}} \right). \quad (3.6)$$

The functional form in Eq. (3.6) offers a more flexible specification than the linear, log-linear, or polynomial forms often used in the literature. It ensures that the abatement supply is equal to 0 when $p = 0$, and positive and increasing for all values of $p > 0$, and that abatement does not exceed base emissions as long as $0 < \bar{\alpha}_{rt} \leq 1$, $\tau_{rt} > 0$, and $\beta_{rt} > 0$. It summarizes any abatement supply curve with three parameters that can be easily interpreted. $\bar{\alpha}_{rt}$ represents the maximal share of base emissions that can be technically reduced when the emission price tends to infinity. It thus corresponds to the vertical asymptote of the MAC curve. τ_{rt} represents the emission price (in €/tCO₂eq) necessary to attain an abatement rate of approximately 63% ($1 - e^{-1}$) of the maximal abatement rate. β_{rt} is a dimensionless parameter that controls the shape of the abatement supply curve. When $\beta_{rt} \leq 1$, the abatement supply curve is concave for all values of p . When $\beta_{rt} > 1$, the abatement supply curve has an inflection point.

How the abatement rate in Eq. (3.6) responds (locally) to a change in the emission price can be easily derived from the knowledge of $\bar{\alpha}_{rt}$, β_{rt} , and τ_{rt} . Denoting by μ_{rt} the price elasticity of α_{rt} , we have :

$$\mu_{rt}(p) = \frac{\partial \alpha_{rt}}{\partial p} / \frac{\alpha_{rt}}{p} = \frac{\beta_{rt} \left(\frac{p_{rt}}{\tau_{rt}}\right)^{\beta_{rt}}}{e^{\left(\frac{p_{rt}}{\tau_{rt}}\right)^{\beta_{rt}}} - 1}. \quad (3.7)$$

The corresponding price elasticity of emissions, evaluated at the emission price p , is given by $\eta_{rt} = -\mu_{rt}(p)\alpha_{rt}(p)/(1 - \alpha_{rt}(p))$.

The functional form of the MAC corresponding to the specification in Eq. (3.6) can be easily obtained by inverting Eq. (3.6). It can be integrated to compute the total abatement cost associated with any value of $\alpha_{rt}(p)$, which only depends on $\bar{\alpha}_{rt}$, τ_{rt} , β_{rt} , and $e_{rt}(0)$.

We use the full set of simulations for the explored range of emissions price to fit the functional form in Eq. (3.6) using non-linear least squares for all regions (including EU-aggregated results) and all years (including 2007-2012 averages).

The estimation results for the EU-27 are shown in Table 3.1. On average over the 2007-2012 period (first column in Table 3.1), the maximal share of emissions is estimated to be about 62%, and the estimated emission price necessary to attain a 39% $((1 - e^{-1}) \times 0.62)$ abatement rate is about 329 €/tCO₂eq. The fitted abatement supply curve does not have an inflection point. The combination of the estimated parameters leads to an estimated emission price elasticity of the abatement rate of approximately 0.71 if evaluated at $p = 38$ €/tCO₂eq, decreasing to 0.53 if evaluated at $p = 205$ €/tCO₂eq. These figures are in line with the meta-model estimated by Vermont & De Cara (2010), who report a central estimate of 0.59 based on an isoelastic specification.

	2007-2012	2007	2008	2009	2010	2011	2012
$\bar{\alpha}$	0.62 *** (0.00)	0.64 *** (0.00)	0.61 *** (0.00)	0.62 *** (0.00)	0.64 *** (0.00)	0.62 *** (0.00)	0.61 *** (0.00)
τ	329.25 *** (2.42)	266.59 *** (2.61)	373.94 *** (3.71)	274.43 *** (3.19)	270.18 *** (2.40)	381.97 *** (3.61)	425.90 *** (4.09)
β	0.83 *** (0.00)	0.74 *** (0.01)	0.94 *** (0.01)	0.90 *** (0.01)	0.75 *** (0.00)	0.93 *** (0.01)	0.90 *** (0.01)
N	201	201	201	201	201	201	201
logLik	701.13	658.66	626.30	586.28	673.22	634.83	646.68
AIC	-1394.26	-1309.31	-1244.59	-1164.57	-1338.45	-1261.66	-1285.36

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

TABLE 3.1. Estimation results for EU-aggregated relative abatement supply curve for each calibration year and the 2007-2012 average.

The estimated values for $\bar{\alpha}_{EU,t}$ is relatively stable during the 2007-2012 period, ranging from 0.61 to 0.64. The same remark holds, although to a lesser extent, for the estimated values of $\beta_{EU,t}$, which remain lower than unity throughout the considered time period. The main changes in the parameters with respect to the calibration year regard the estimated values of $\tau_{EU,t}$, which varies from 267 (in 2007) to 426 €/tCO₂eq (in 2012). The combination of low values for $\tau_{EU,t}$ and $\beta_{EU,t}$ in 2007 and 2010 implies a relatively low price elasticity of the abatement rate in those years, with e.g. $\mu_{EU,2007}(38) = 0.56$ and $\mu_{EU,2010}(38) = 0.58$. The simulated EU emissions for those two years were the highest during that period. The implied value of $\mu_{EU,2008}(38)$ reaches 0.93 in 2008, a year in which base emissions were evaluated at their lowest level during the examined time period.

Figure 3.9 shows the estimated values of $\bar{\alpha}_{rt}$, β_{rt} , and τ_{rt} for all calibration years.

The variations of the maximal share of abatement are limited both in time and in space. The spatial distribution of the estimated values of β_{rt} is more contrasted. Most of the variability of marginal abatement costs over time and space is captured by captured by the variations in the estimated values of τ_{rt} .

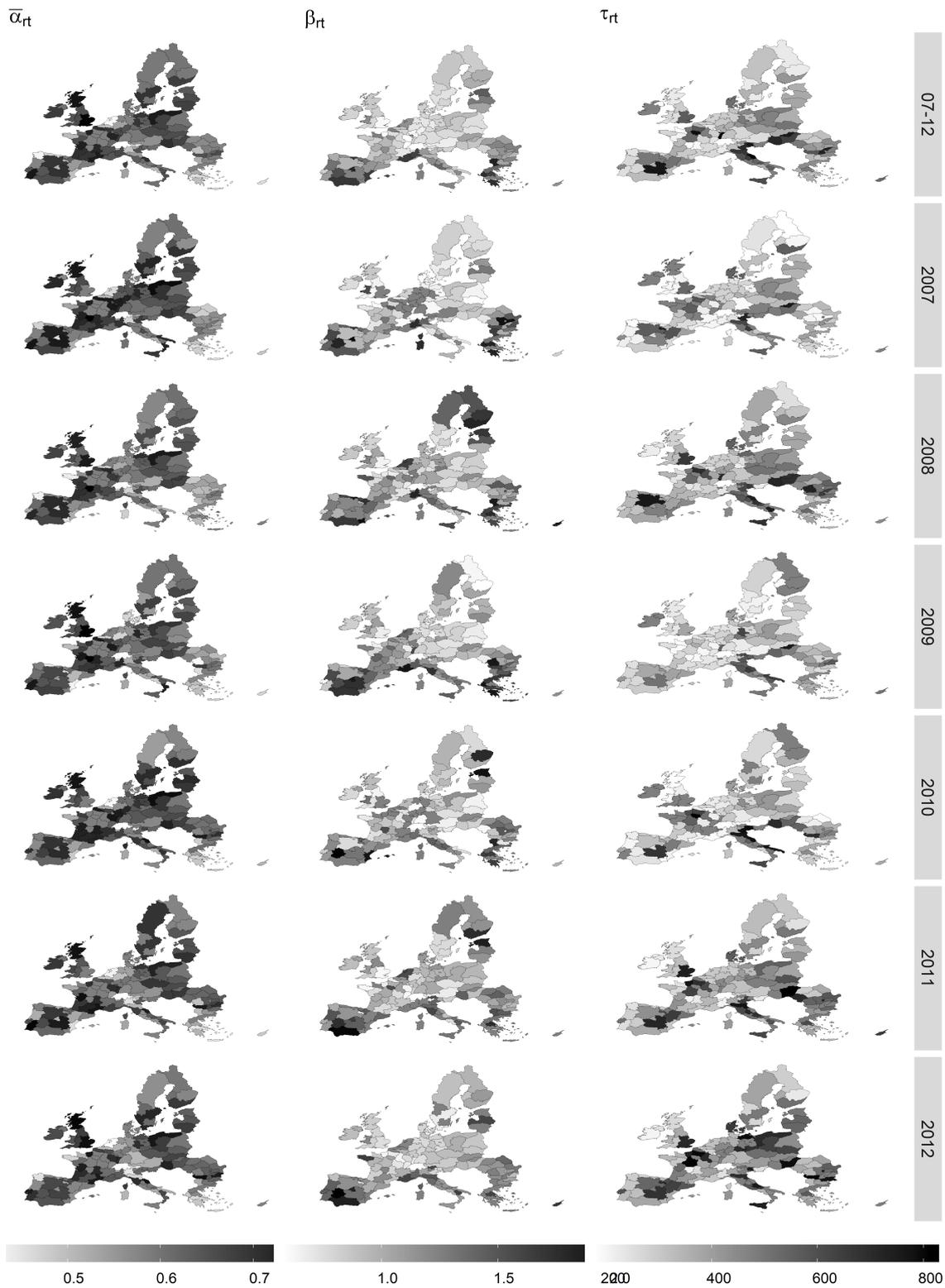


FIGURE 3.9. Reduced functional form : parameter estimates for each region and each calibration year.

3.6 Concluding remarks

We have proposed an updated assessment of the possible contribution of the agricultural sector to the mitigation of EU GHG emissions, along with the associated marginal abatement costs. This assessment rests on the use of supply-side model of the EU agricultural sector that has the advantage (i) to cover the main agricultural sources of non-CO₂ GHG emissions, (ii) to represent the wide diversity of the conditions of production in Europe both between regions and within regions, and (iii) to be calibrated on a set of years characterized by large variations in agricultural input and output prices.

Our results indicate a substantial mitigation potential of non-CO₂ emissions in the EU agricultural sector. For an emission price of 38 €/tCO₂, which lies in the lower range of current estimates of the social cost of carbon compatible with the objective of keeping the global temperature increase below 2°C, we find that the agricultural sector may cost-effectively reduce its emissions by 10% on average. This reduction may reach 30% of agricultural EU emissions for a social cost of carbon is 205 €/tCO₂. Harnessing this potential may be particularly important for agriculture itself, but also for other emission-intensive sectors which face high marginal costs of abatement. The mobilization of the mitigation potential offered by the agricultural sector in a cost-effective manner could thus contribute to lower the overall social cost to limit European GHG emissions.

This average mitigation potential masks important variability both across space and over time. Our results confirm those from previous studies that have found that the mitigation that can be achieved at a given emission price within the European agricultural sector varies markedly across regions. They also unveil the temporal variability, a dimension that has been overlooked in the empirical literature to date. Annual changes in the economic context, through in particular the variations of input and output prices, affect both base emissions and the marginal cost of reducing these emissions. Our results indicate a substantial variability of the emission price associated with a given reduction in EU-wide emissions.

This may have important consequences for the design of the policy instrument best suited to incentivize cost-effective reductions in this sector. The set of reduced functional forms estimated in the paper for each EU region and each year provide an interesting to further investigate this issue.

CHAPITRE 4

Increasing food production and mitigating agricultural greenhouse gas emissions in the European Union : a mathematical programming approach

Ce chapitre en anglais reprend les résultats du papier "*Increasing food production and mitigating agricultural greenhouse gas emissions in the European Union : a mathematical programming approach*", écrit en collaboration avec Pierre-Alain Jayet et Stéphane De Cara. En 2017, j'ai présenté le papier à la Conférence FAERE "French Association of Environmental and Resource Economists", à Nancy, au Congrès EAAE "European Association of Agricultural Economists", à l'Université de Parme, et à la Conférence EAERE "European Association of Environmental and Resource Economists", à Athènes.

Abstract

This paper focuses on the trade-offs between and within agricultural productions and greenhouse gas emissions at the European Union (EU) level. By using the European agro-economic AROPAj model, two perspectives of analysis are brought forward, one in which we introduce the pricing of GHG emissions (primal approach) and the second one in which we introduce a food calorie threshold (dual approach). Firstly, we introduce a carbon price, by taking into consideration the direct emissions of nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) sourced from the EU agriculture. The results show that crop and animal productions would be impacted in a contrasted way by the introduction of a carbon price. There is an increase to some extent of the crop production - especially cereals and oilseeds - for a moderate rise in carbon price, according to the products and the Member States. This increase in the simulations concerns both the areas and the quantities of crop products, whether these products are marketed or used on farm as animal feed. On the other hand, animal production - milk and meat - decreases with the carbon price over the entire range explored. Secondly, if we introduce in the sector different targets of calorie quantities of 300, 350 and 400 Mt of soft wheat equivalent, the dual price varies between [20 €,36 €], [27 €,52 €] and [36 €,94 €] respectively. These effects of either a carbon pricing or a calorie targeting, arise as a consequence of complex substitutions regarding crops, grasslands and fodders, being linked to the issue of animal feeding (on-farm recycled grain cereals, concentrates and grasslands and fodders). The regional based mapping of results reflects the specialization of farming systems. Marketed crops areas are kept almost homogeneous on the entire European agricultural system, while meadows are strongly affected. The abandonment of grasslands being largely compensated by fallow land, the agricultural landscape could be strongly modified and this, in a contrasted way across the regions of Europe.

Keywords : Environmental policies, greenhouse gas emissions, food production, European Union, agriculture, climate change, carbon price ;

4.1 Introduction

Nowadays, humankind is confronted with one of the major force challenges of the 21st century, namely ensuring an appropriate and viable food system¹ while simultaneously reducing negative impacts on the environment². For this reason, the complex relationships between agriculture, climate change and the environment continue to generate numerous debates in the scientific literature (Foley et al., 2011; Godfray, 2014; Meijl et al., 2018; Rööß et al., 2017; Gregory et al., 2005; Ludi, 2009; Deering, 2014; Frank et al., 2017; Devereux & Edwards, 2004; Beddington et al., 2012; Wilkes et al., 2013). Agriculture is one of the productive activities most affected by climate change and must be an integral part of any strategy to mitigate global anthropogenic GHG emissions. In order to achieve the objective set by the Paris Agreement of limiting global warming to 2°C, the analysis of the mutual relationship between climate change and agricultural production has become of major interest. The dynamics of agricultural development is a result of the growing demand for food at the global level, Europe being one of the main producers and suppliers of food in the world. At the European level, a critical issue that needs to be taken into consideration in order to increase agricultural production while preserving natural and environmental resources, is represented by the sustainability of agricultural activity (European Commission, 2009, 2013d, 2017b; HLPE, 2012).

This paper brings forward and extends the current vision of the trade-off between agricultural production and GHG emissions at the European Union level, through two different perspectives of analysis. In the beginning, we are using a primal approach targeting a reduction of GHG emissions through the introduction of a carbon price. The second perspective of analysis rests on a dual approach, through the introduction of a minimum supply of food calorie constraint imposed to the European agriculture as a whole. A strong point of our approach in terms of methodology consists in the application of the principle "simulate and average", which is recommended by statisticians, whereas many other models are based on average values of parameters used for simulations. In addition, we take into consideration the economic context variability that characterizes the EU agriculture, being based on six years 2007-2012 described by a strong variation of input and output prices.

Agriculture, through its activity, emits substantial quantities of methane (CH₄)

1. Ending starvation and ensuring food security is one of the Sustainable Development Goals adopted by the United Nations (2015) within the implementation of its 2030 Agenda.

2. The food system has a substantial contribution to global greenhouse gas emissions (Garnett, 2011).

and nitrous oxide (N₂O) into the atmosphere, of which approximately 45% comes from enteric fermentation; 37% are from agricultural soils; 15% are linked to manure management; and, 3% are from rice cultivation, field burning of agricultural residues, and other sources. In 2016, the GHG emissions from European agriculture accounted for 431 MtCO₂eq (European Environment Agency, 2018). An essential and indispensable role to achieve substantial greenhouse gas emissions mitigation belongs to the carbon pricing, whose initiative aims both at addressing multiple environmental and social objectives, as well as fostering the effective reduction of costs in obtaining them (World Bank Group, 2018; Aldy & Stavins, 2012; FAO, 2013; OECD, 2015; Vojtech, 2010). The Directive 2003/87/EC established the European Union Emission Trading Scheme (EU-ETS), seen as the first major carbon market in the world (Ellerman et al., 2016). There are two main options that make it possible to introduce a carbon pricing, which are carbon taxes and cap-and-trade systems. Thus, both carbon pricing instruments have been presented as an important factor to incentivize the mitigation of GHG emissions and promote investment in low emission technologies and practices (OECD & WBG, 2015; Kossoy et al., 2015; The Grantham Research Institute, 2011). Nevertheless, these options are characterized by different modes of application. A carbon price assumes setting a tax on GHG emissions, method that allows a certain variation of emissions levels, while cap-and-trade systems suppose limiting the emissions level and permitting changes in emissions allowances, the economic actors being capable to trade their emission rights (Report of the High-Level Commission on Carbon Prices, 2017).

Other relevant factors for policy-makers in order to support the mitigation of greenhouse gas emissions in the agricultural sector are the characteristics of farming systems, the crop quality and production, the agricultural technology, the land and soils use, as well as the animal production (Leip et al., 2010; Olesen & Bindi, 2002). Given that livestock represents one of the major sources of emissions, and, at the same time it accounts for one-third of the protein in human food, climate mitigation policies involving livestock play an essential role. Animal rearing consists of the use of 30% of the global land surface, a land saving can be realized by increasing livestock productivity using feeding practices that require among other things, an improved grassland management, less grazing as well as better quality feeds. Conforming to Havlik et al. (2014), mitigation policies targeting emissions from land-use change seem to be more effective than those targeting emissions from livestock only. On the other hand, Darwin (2001) and Thornton (2012) highlight the importance of keeping a balance between a growing crop productivity while improving environmental quality combined with an effective utilization of resources. As specified by Valin et al. (2013b), crop yield rising would have a major significance in increasing food supply, while livestock productivity increase would provide

the best method to reduce GHG emissions. [Berners-Lee et al. \(2018\)](#) argue that industrial meat and milk production accounts for 34% of global human calories but is highly inefficient in supplying energy, proteins, iron and zinc, indispensable to humans and that is incompatible with a sustainable food system.

The supply of agricultural products will have to increase in order to satisfy the growing population and this could bring on a conversion of natural land to farmland ([Ewers et al., 2009](#)). As stated by [Havlík et al. \(2012\)](#) and [Burney et al. \(2010\)](#), land use dynamics (e.g. additional cropland, grassland expansion) will be strongly influenced in time by the crop production evolution, which could contribute to combating food insecurity while contributing to climate change mitigation. According to [West et al. \(2014\)](#), crops used for animal feed could produce a substantial gain of calories (about 70%) if they would be intended to direct consumption without being used in animal feed in order to produce animal products, meat and milk.

The trade-off between mitigation and food security leads to the need for an assessment that accounts for the impact of GHG emission pricing on food production in the European Union, the interactions between crop and livestock production activities, as well as the evaluation of existing CAP policy instruments. In order to minimize the trade-offs that may arise, [FAO \(2003b, 2009\)](#) highlights the importance of the costs needed to achieve food production and climate change mitigation.

A quantitative evaluation of marginal abatement costs in the EU agricultural sector was realized by [De Cara & Jayet \(2011\)](#), underlining the effects of the EU burden-sharing agreement (BSA) on this sector. A 10% EU GHG abatement target can be achieved at an emission price range of 32–42 €/tCO₂, showing that the agricultural sector may represent an important share to its reduction in a cost-effective way. Nevertheless, when BSA targets are considered the base for allocating allowances in the framework of a cap-and-trade system in agriculture, a significant relocation of “hot air” can be produced and directed to the last entered EU Members States. [Frank et al. \(2017\)](#) highlight the substantial impacts that a global uniform carbon price can have on food security and its inequitable effects across sectors of the economy and regions, showing that food security is more strongly affected in countries that do not engage in mitigation actions, the costs of agricultural production rising with an inefficient mitigation.

The multiple effects of climate change on agriculture emphasize the necessity of the decision-making process to reduce the risks in order to maintain appropriate standards of crops and promote sustainable agriculture. Long-run climate policies should care of not disrupting a strongly changing agricultural economy beyond respect to the environmental

target, and they need to be designed as much as possible by taking into consideration the economic context. Years 2007-2012, on which our study is based, show how much the context may fast change in terms of prices and productions, and model-based analysis would be improved when allowing to reflect this change.

By using the European agro-economic AROPAj model, we analyze the compatibility of environmental objectives and food production, through two different approaches (primal and dual), but the same methodological framework. The accurate analysis of the GHG emission reduction and implicitly the marginal abatement cost curves will be explored in a separated paper. Thereby, the objectives of this study are twofold : (i) to assess the consequences of a carbon price introduction on the crop and livestock production in the European Union (EU); (ii) to assess the effects of introducing a food production threshold on the reduction of EU agricultural GHG emissions. In the model, the GHG price is based on Global Warming Potential of GHG evaluated in CO₂ equivalent (with ratios provided by IPCC when time-horizon is 100 years). We account for direct N₂O and CH₄ emissions sourced by agriculture. In addition, the model allows us to introduce a livestock adjustment. For ruminants (cattle, in particular), reducing GHG emissions involves the improvement of the efficiency of animals husbandry through the use of fodder and better feed formulation that can reduce CH₄ generated during digestion and CH₄ and N₂O by manure decomposition. Grasslands play an important role when mitigating GHG emissions and achieving food security, given the fact that meat and milk production depends on ruminants feeding. The climatic conditions, rainfall and temperature distribution and soil characteristics are among the main factors influencing the grassland spatial distribution and productivity (O'Mara, 2012; Huyghe et al., 2014). Methane emissions are conditioned by animal numbers, as well as by the composition of animal feeding. CH₄ resulting from enteric fermentation depends directly on animal feeding, which must meet all the requirements in terms of energy and proteins. This is possible due to the inclusion in the model of various types of feeds : concentrated feeds, crops products and raw feeds. A certain intake of energy and proteins is necessary for each animal species, depending on different factors, as the age, the daily activity, the physical condition, the potential production, etc. In the model, the animal feeding is endogenous, farmers having the possibility to use either fodder feed from their own crops or purchased concentrates. The reduction of N₂O emissions from agriculture is mainly the result of improving the efficiency of agricultural techniques related to the manure application, storage and management, as well as the techniques related to soil and crop use (Smith et al., 2008, 2013). On the production side, we focus on cereals. Let us recall that in 2013 (European Commission, 2014b), one-third of the EU agricultural area was cultivated with cereals, whose value was representing one-eighth of the total value of EU agricultural products. The annual EU cereal

production varied significantly in time, between [266 Mt,321 Mt] over 2007-2012, as a result of both the economic and meteorological context, having a peak in 2008³.

The rest of the article is organized as follows. Section 2 begins with a brief presentation of the AROPAj model, being followed by the description of the two angles of analysis undertaken in the paper, the primal and dual approach. The results obtained by introducing a carbon pricing and a food calorie threshold, respectively, as well as the synthesis concerning the two approaches, are examined in Section 3. Concluding remarks are presented in Section 4.

4.2 Methodological elements

4.2.1 General framework - AROPAj model

Our analysis is based on the use of a supply-side model capable of integrating both the economic and technical connections between the agricultural sector, climate and GHG emissions, as a tool for strategic decision-making. The European agro-economic model AROPAj is based on linear programming. It aims to simulate the EU agricultural supply, by taking into consideration the production derived from main crops and livestock⁴. The model has been widely presented in [De Cara et al. \(2005\)](#); [Galko & Jayet \(2011\)](#); [De Cara & Jayet \(2011, 2018\)](#), articles in which it was used to analyse agri-environmental issues, in particular, greenhouse gas emissions.

The model parameters are estimated from the Farm Accountancy Data Network (FADN), which makes possible the use of the model for all EU Member States. FADN possesses accounting information about approximately 80.000 agricultural holdings, totaling around 5.000.000 farms at the EU level. It covers approximately 90% of the total utilised agricultural area (UAA) and the EU total agricultural production.⁵ One of the strengths of AROPAj model is represented by its capacity of incorporating simultaneously the crops, the livestock, the grassland and the feed (both on-farm and marketed feed). In order to form a unit of modeling for AROPAj, a clustering method⁶ is employed allowing to group the sampled farms in *representative farms*.

3. World Bank data <https://data.worldbank.org>

4. An entire technical presentation of the model is available at https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie_publique/Media/fichiers/ArticlAROPAj

5. For a detailed description of FADN data, see : <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/>

6. Four key variables are used : main types of farming, altitude, irrigation and economic size.

In the model, each representative farm k has as objective to maximize the total gross margin (π_k). The model is of the form :

$$\begin{aligned} \max_{x_k} \quad & \pi_k(x_k, \theta_k, \phi) \\ \text{s.t.} \quad & x_k \in A_k(\theta_k, \phi) \end{aligned}$$

where x_k represents the vector of activities, including variables such as the area of each crop, the number of animals in each category, the production of meat and milk, etc. The production set A_k is bounded by x_k -linear economic and technical constraints including quasi-fixed factor limits such as utilized agricultural area and livestock. The vector θ_k refers to k -specific parameters and the vector ϕ refers to common parameters such as GHG price.

Among potential constraints, we mention the crop rotation constraints, animal feed requirements (for example, on-farm produced vs. purchased feed, forage vs. concentrates), the implementation of the Common Agricultural Policy instruments, the availability of utilized agricultural area (UAA) being limited to each representative farm.

In AROPAj, are included no less than 32 crop productions and 28 animal productions. The crop producing activities cover a large part of the EU agricultural land, the crops being divided into three categories : (i) crops that can be either sold or on-farm consumed (i.e. cereals), (ii) crops that can only be on-farm-consumed (e.g. fodder, pastures) and (iii) crops which are intended to be sold. From the point of view of animal production, the model includes a large variety of animals (24 categories of cattle and other 4 categories : sheep, pigs, goats and poultry).

In the model, emissions are accounted according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines (IPCC, 2001), allowing inter-country comparisons. In particular, it relies on country-specific activity data and emission factors. The IPCC parameters for each EU Member State can be found in the respective National Report of GHG Inventories, submitted on a yearly basis to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). AROPAj relies on the following agricultural emission sources : N_2O emissions from agricultural soils and manure management ; CH_4 emissions from manure management, enteric fermentation and rice cultivation (refining and updating De Cara et al. (2005)). N_2O emissions from agricultural soils are subdivided into : (i) *direct emissions* : use of synthetic fertilisers, manure application, biological N fixation, crop residues and animal production ; (ii) *indirect emissions* : atmospheric depo-

sition and leaching and run-off. Our calculations depend on these 11 emission sources, which are directly associated with the IPCC data.

Our results are based on the V5 version of the model, for the 2007-2012 FADN years with a focus on EU-27. Each FADN year refers to a specific farm clustering into representative farms, which allows the representation of six economic situations of European agriculture. The 6-year period on which our study is based, is very contrasted having at the base agricultural and energy prices that have undergone very strong variations.

4.2.2 Implementation of carbon price - a primal approach

When a carbon tax is introduced, farming systems have the possibility to behave in various ways in order to reduce their emissions, by reducing the animal number, doing modifications of area allocation among crops or in animal feeding.

In our study, we introduce the pricing of GHG emissions weighted accordingly to GHG Global Warming Potential, considering the direct emissions of N₂O and CH₄ sourced from agriculture. In AROPAj, the carbon price introduced widely ranges from 0 to 10.000 €/tCO₂eq, in gradual steps, the simulations being realized by using 200 explored values.

In order to have a relatively large view of the impacts of emission taxing on the production system and obtain realistic conclusions, we have decided to introduce a carbon price (expressed in €/tCO₂ equivalent) that ranges in the interval [0, 200], a relatively wide price range, but "realistic" at the same time. We took into consideration that a price of 50 €/tCO₂ refers to previous studies (De Cara et al., 2005; De Cara & Jayet, 2011) and a price superior to 100 €/tCO₂ is relevant when referring to climate policies. Since 1991, in Sweden, the carbon tax represents the most powerful instrument of the Swedish climate policy, currently having a level of 120 €/tCO₂ eq (Adelphi, 2018).

From this angle of analysis, more precisely, what we call the primal approach, the study aims at finding out what might be the complex impacts of an emission tax on agricultural commodities brought to the market, when the modeling is applied in very diverse economic conditions, given the context of strongly changing 2007-2012 prices regarding inputs and outputs. By using the European agro-economic AROPAj model, we therefore assess the effects that can occur in the crop and livestock production in the EU, when introducing a carbon price and analyze the trade-off between and within productions at the European level and the environment as results of policies targeting

GHG emissions.

4.2.3 Implementation of food calorie threshold - a dual approach

The dual approach refers to the integration of a food calorie production threshold, expressed in tonnes of soft wheat equivalent. Calculation needs change in our programming tools, due to the fact that the threshold affects the European farming system as a whole. The kernel of the model has been improved to integrate and parameterize this threshold. We start from a minimum unsaturable threshold to the maximum possible threshold that allows obtaining a solution.

From a technical point of view, the indexation of the representative farms was automatically modified. All these are based on a script and codes work, starting from a sub-aggregation of AROPAj representative farms, by country and with a reindexation of representative farms in order to be able to deal directly with the solution.⁷

There has been a preliminary work dedicated to script writing and a coding preparation to actually prepare this work, with very large files calculated in reasonable time, which allows the exploitation of the full results. The constraint binding jointly all representative farms refers to the calorie balance, including the calorie content of different crops and livestock productions. In doing so, the estimation of the food parameters was done by using the data base provided by [FAO \(2003a\)](#). For better readability, the threshold introduced is based on calorie quantities expressed in tonnes of soft wheat equivalent.

4.3 Results

4.3.1 Carbon pricing impact

The AROPAj model is used to assess the effects of introducing a carbon price on the main crop and livestock productions at the EU level. We focus on cereal area and production while distinguishing the marketed and on-farm used parts of the production, oilseeds production and area, livestock, feed quantity, nitrogen fertilizer consumption, grasslands and fallows. Simulations are realized for the 6 FADN years for which AROPAj

7. For detailed information, see : https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie_publicue/Media/fichiers/ArticlAROPAj

V5 version operates (2007-2012), when livestock adjustment ratio is bounded by a +/- 15% amplitude compared to the year-reference level. Strong differences between year-based results reflect the strong variation of agricultural prices and climatic conditions over the period. Moderate carbon price leads to strong variation in abatement rate (from 9 till 16% when price is 50 € and from 14 to 23% when price is 100 €) but emissions are estimated between a narrowed spread (15 Mt CO₂eq from the interval [317,332] when price is 50 €, 20 Mt from [292,312] when price is 100 €). The spread of abatement rate over years is from 23 till 36%, emission spread being of 35 Mt when price is 200 €/tCO₂eq (See Table 4.1).

Year hierarchy of changes in priced emissions should be explained by complex differentiated annual sets of agricultural input and output prices, when quasi-fixed factors (utilized agricultural area (UAA) and livestock) are relatively stable (initial livestock spread being less than 3% of the six-year average and UAA spread being around 1% of the six-year average).

TABLE 4.1. EU aggregate values (initial emission level, emissions, abatement level and rate), for each of the six years (2007-2012) and for different emission tax levels 0, 50, 100 and 200 €.

Carbon price (€)		2007	2008	2009	2010	2011	2012
0	Initial emission level [MtCO ₂ eq]	385.4	354.7	361.9	381.1	365.1	364.4
	Emissions [MtCO ₂ eq]	324.7	321.2	317.1	321.2	331.9	331.9
50	Abatement [MtCO ₂ eq]	60.7	33.5	44.8	60	33.2	32.5
	Abatement rate (%)	16%	9%	12%	16%	9%	9%
	Emissions [MtCO ₂ eq]	295.8	301.2	292.5	292.8	311.8	311.9
100	Abatement [MtCO ₂ eq]	89.6	53.4	69.4	88.3	53.4	52.5
	Abatement rate (%)	23%	15%	19%	23%	15%	14%
	Emissions [MtCO ₂ eq]	245	268.9	246.8	244.6	274.9	280.5
200	Abatement [MtCO ₂ eq]	140.4	85.7	115	136.6	90.2	83.9
	Abatement rate (%)	36%	24%	32%	36%	25%	23%

At the European Union level, the variation of the main crop and livestock productions when carbon price changes, as well as the envelope curve drawn for each of these agricultural productions, are illustrated in Figure 4.1. Each year-based series of simulations accounting for GHG price change are realized when keeping stable global economic and climatic conditions, respectively, referring to each of FADN year's conditions. The carbon price increase expectedly leads to decreasing GHG emissions and impacts agricultural supply in a contrasting manner.

The marketed cereal production varies differently with carbon price increasing when FADN year changes, showing a notable peak often appearing in the retained carbon

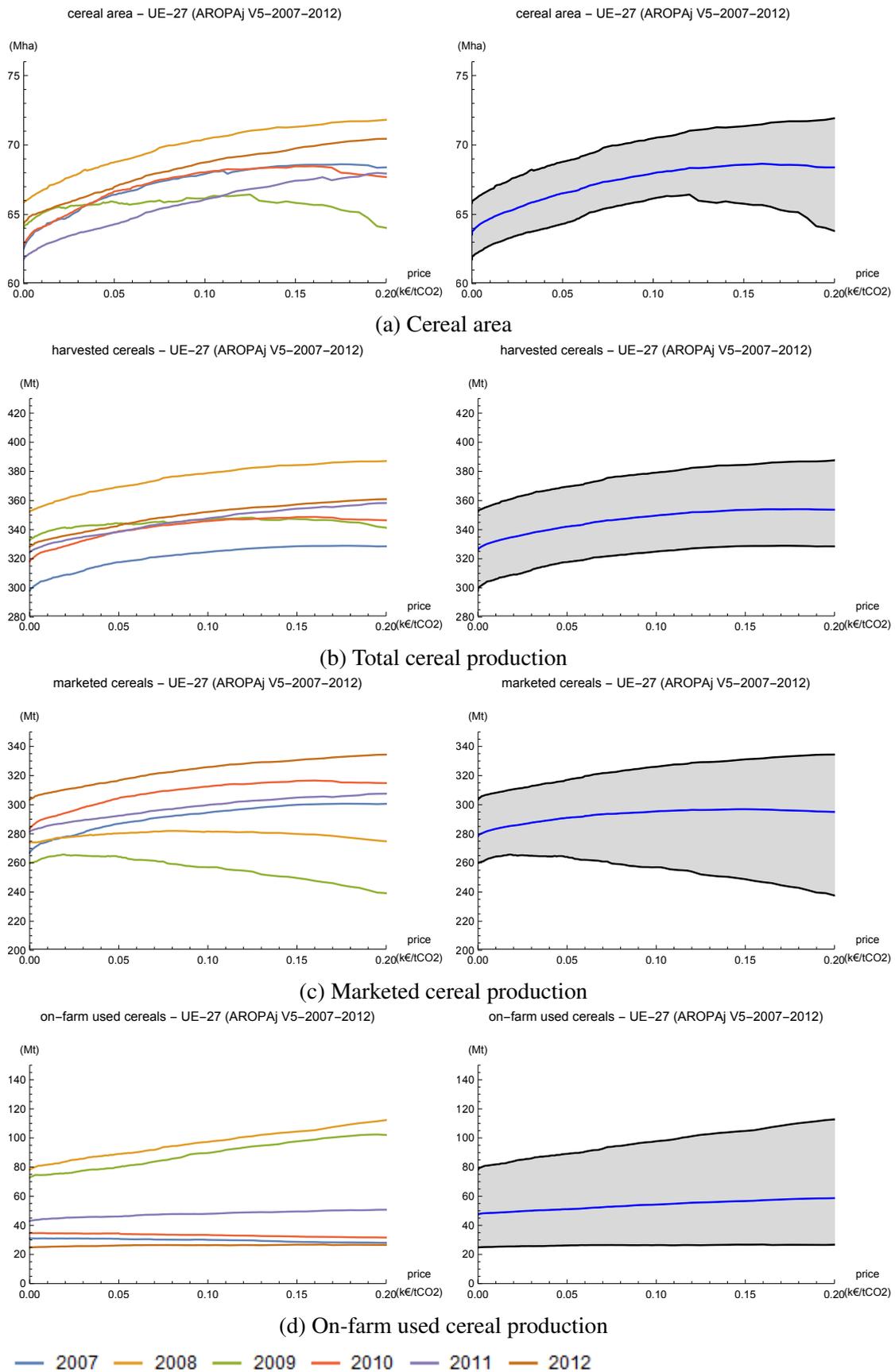
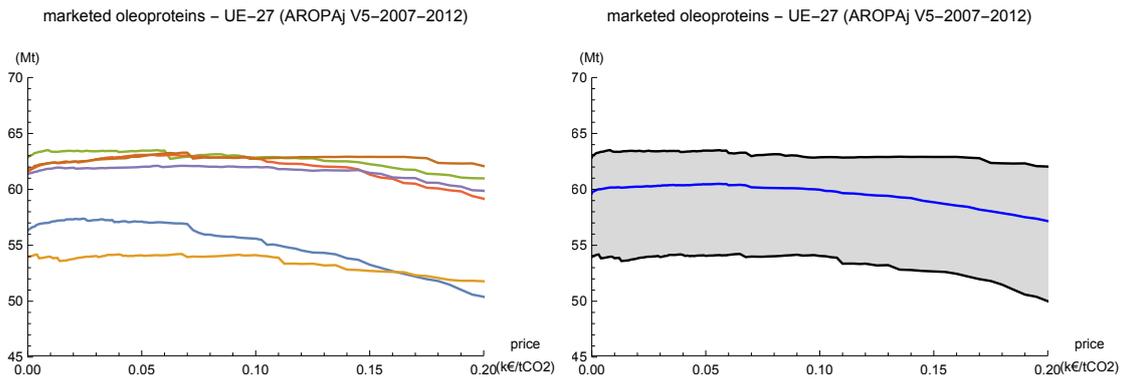
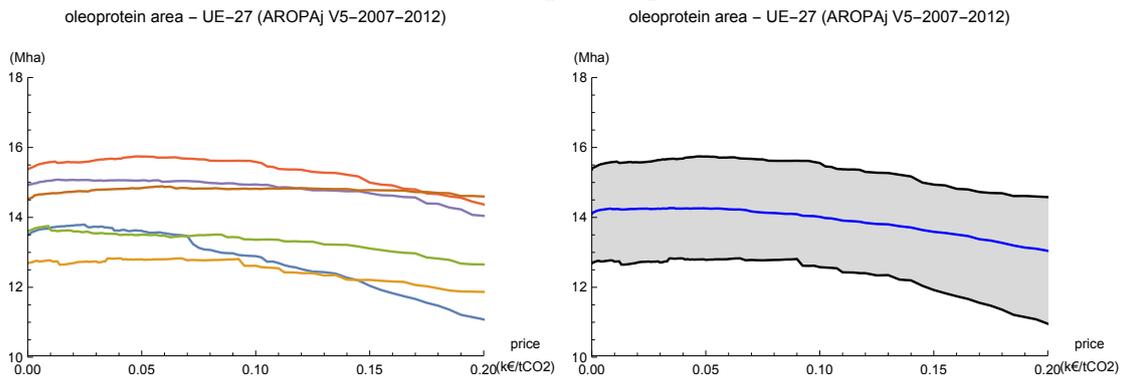


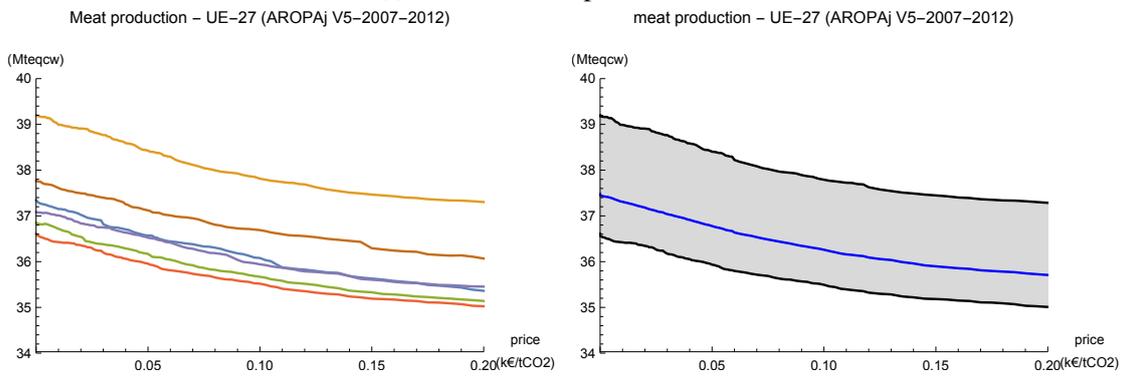
FIGURE 4.1. Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).



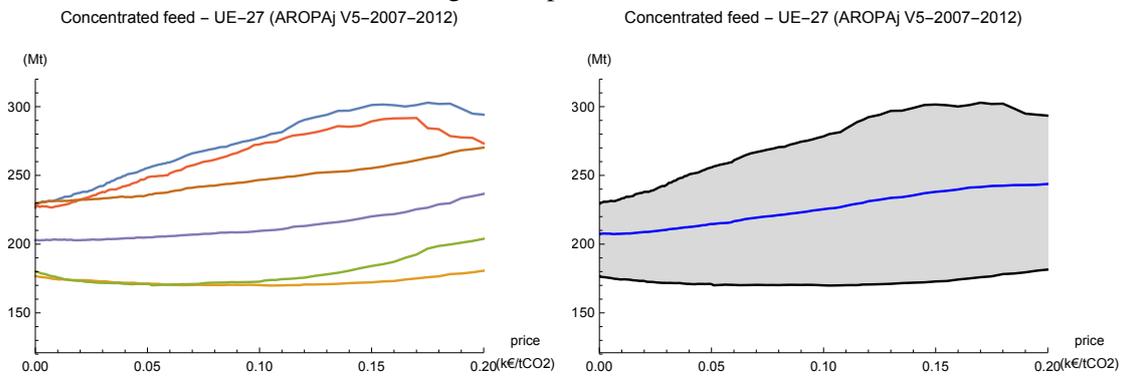
(e) Marketed oleoproteins production



(f) Marketed oleoproteins area



(g) Meat production



(h) Concentrated feed

— 2007 — 2008 — 2009 — 2010 — 2011 — 2012

price interval (Figure 4.1c). The peak strongly changes in cereal quantity as well as in price limit, from one year to the other. The most significant results refer to the fact that there is a peak for each of the six years (although out of the price scope for three of them : 2007, 2011 and 2012). In 2009 for example, the marketed cereal production increases smoothly till a price limit augmentation (29 €/tCO₂) and then strongly decreases when carbon price overcomes this limit.

By extending the analysis to cereal area⁸, we can observe that the peak's price limit in area can strongly differ with the peak's price limit in marketed production, from year to year (see Figure 4.1a). This result combines the effect of the relative change in use of production (on-farm vs market), the effect of the substantial change in the global price system and cross-price effect between feed sources, and the effect of the year-based change in meteorological conditions. Figure 4.1a also provides the envelope interval referring to the six year-based curves. Given the carbon price, when the six year-based general conditions are supposed to occur with the same probability, the peak in area is obtained at a price around 160 €/tCO₂ (see the blue curve). This is far above the price observed for CO₂ market over the past years. The price level at which this change occurs depends on each year.

The key-point here is that, in average, a peak in cereal land allocation as well as in the marketed part of production is got when carbon price is around 150 €/tCO₂eq, given the fact that livestock adjustment is substantial but moderate (+/- 15%). The peak shifts toward higher carbon price regarding on-farm re-use of cereals for feed. That reflects complex relationships between cropping and breeding activities through feed and different parts of feed, typically on-farm cereals (Figure 4.1d), fodders and meadows, and concentrated feed (Figure 4.1h). Oleoproteins area and production (Figures 4.1f and Figure 4.1g) reinforce the statement according to which the interference with animal feed represents one of the aspects of the arbitration between crop and animal productions.

As shown above, the EU-27 harvested cereal production, representing the sum of marketed and on-farm used cereal productions, had a strong variation during 2007-2012, with a peak recorded in 2008. If we introduce a carbon tax, the harvested cereal production increases until a certain price level, after which it starts to decrease. This price level ranges between [125 €, 175 €], in 2007, 2009 and 2010 (see Figure 4.1b). In 2008, 2011 and 2012, this change occurs outside the price scope.

The animal production, even if regulated by the adjustment of +/- 15%, suffers a

8. The cereal area in AROPAj includes the main cereal crops : durum wheat, soft wheat, barley, maize, oats, rye and other cereals.

decrease correlated with the carbon price, with an impact on the demand for food (fodder, concentrated feed and on-farm cereals). Therefore, in contrast to the increase in the crop production, the animal production continuously decreases, when the carbon price increases. Figure 4.1g illustrates the decline in the EU meat supply (expressed in carcass weight equivalent), with a decreasing slope equal for each of the six years. Figure 4.1g reveals that the reduction of meat production is characterized by an average decrease of about 2Mteqcw over the entire carbon price range.

Figure 4.2 shows the effects of introducing a GHG emission tax of 200 €/tCO₂, on the marketed feed, marketed cereals and on-farm use of cereals quantities, at the EU-27 level, for a livestock adjustment of 15%, over 6 years 2007-2012. The quantity of on-farm use cereals, whatever the carbon tax, which had a positive but insignificant influence, had a peak in 2008 (78 Mt for a 0 €-price level; 112 Mt for a 200 €-price level), after which it fell sharply to more than two-thirds in 2012 (25 Mt for 0 € tax and 27 Mt for a 200 € tax). By contrast, the quantities of marketed cereals and marketed feed had a strong decline in 2009, after which they started to increase again. This can be explained by the fluctuation of world cereal prices (strong decline in 2009 as a result of the 2008 crisis), a drop in animal numbers and the water scarcity in 2008.

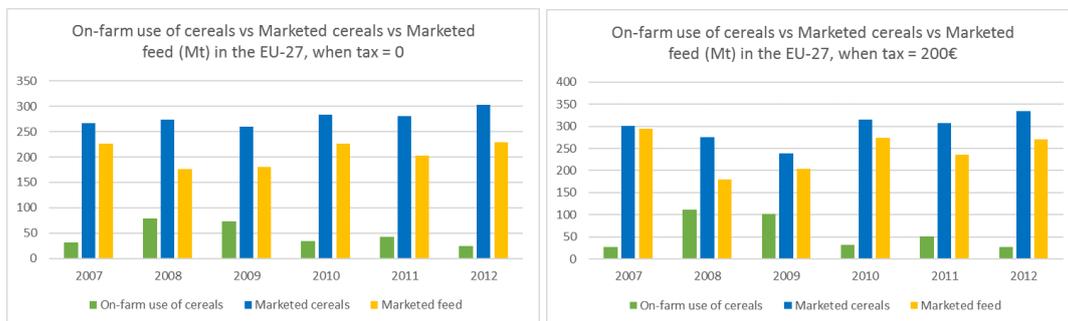


FIGURE 4.2. Marketed feed vs Marketed cereals vs On-farm use of cereals (expressed in Mt), for a 0-carbon price situation and for a 200 € emission tax.

Change in area dedicated to major crops and related to change in carbon price is illustrated in Figure 4.3 over the 6 years (2007-2012). The tax increase implies a decrease of grasslands and fodders area at the EU level and to a strong increase of fallows area. Even if land allocation differ from year to year, "grandes cultures" resist to carbon pricing to some extent, when fodders and more strongly permanent meadows are dramatically affected. Animal production suffer from strong penalty on fermentation sourced CH₄ emission regarding ruminants as well as manure sourced N₂O emission regarding cattle as a whole.

The spatial distribution of the surfaces cultivated with different crops is illustra-

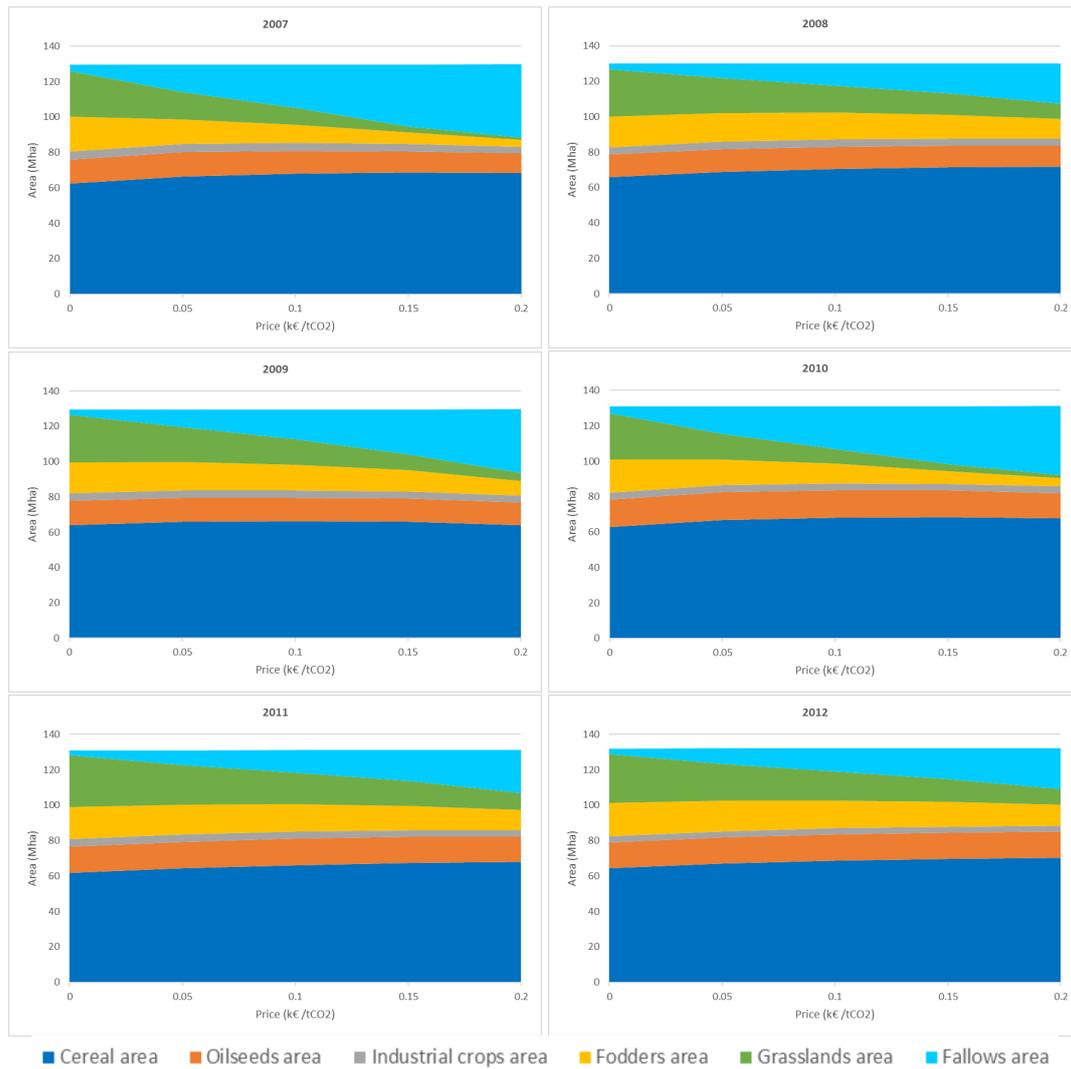


FIGURE 4.3. Areas evolution of major crops depending on CO₂ price in the EU-27 (2007-2012 FADN years based on the V5 version of AROPAj).

ted by the maps of area proportions among all crops considered in AROPAj, for different emission tax levels. Figures 4.4 and 4.5 illustrate the proportion of the areas cultivated with cereals, as well as the permanent meadows, reported to the AROPAj utilized agricultural area.

Marketed crops areas, and mainly cereals, resist almost homogenous on the entire European agricultural system when carbon price increases, while meadows are strongly affected, in connection to animal productions, especially cattle. This would mainly affect the most western part of Europe as well as Central Europe. The abandonment of grasslands being largely compensated by fallow land, the agricultural landscape could be strongly modified and this, in a contrasted way between the regions of Europe.

The analysis of the carbon price impact over the six years, highlight a form of ro-

bustness in the allocation of land from one year to another, although the AROPAj typology is carried out in a completely independent way from one year to another.

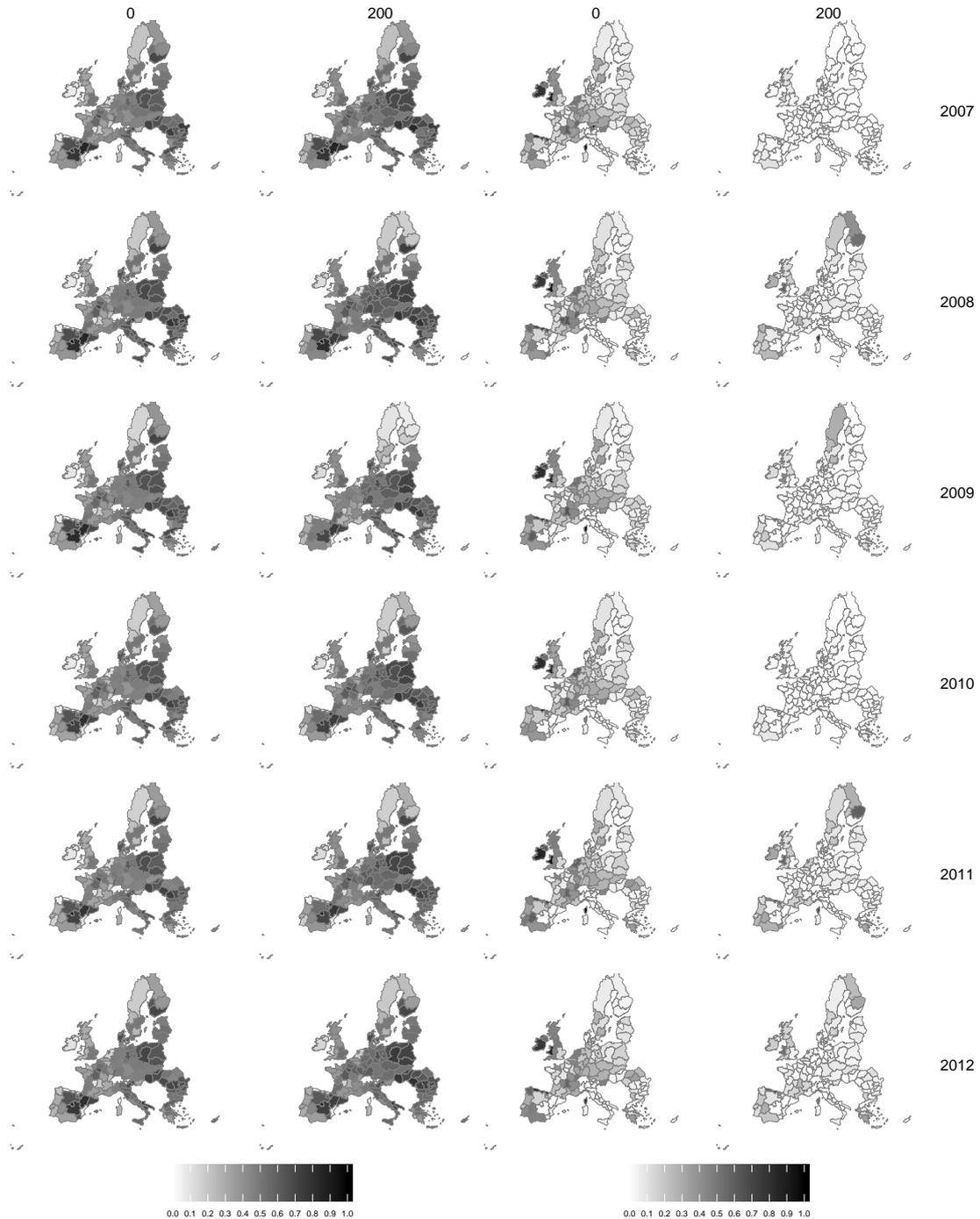


FIGURE 4.4. Proportion of total straw ce- **FIGURE 4.5.** Proportion of permanent reals area in the EU (2007-2012) for two meadows area in the EU (2007-2012) for carbon taxes, 0 and 200 €. two carbon taxes, 0 and 200 €.

4.3.2 Food calorie threshold impact

We have introduced different calorie quantity thresholds, ranging from 165 Mt to 555 Mt soft wheat eq, and conducted the calculation for the 6 years against which the model is calibrated. As expected, the feasible solution of the mathematical programming model depends on the year. The 0-dual price quantities of calories from 2007 to 2012 vary between 166 Mt and 227 Mt (see Table 4.2). Applying an increasing threshold of calories leads the dual price to increase. If we introduce different targets of calorie quantities of 300, 350 and 400 Mtsweq, the dual price varies between [20 €,36 €], [27 €,52 €] and [36 €,94 €] respectively. The dual price goes up to a maximum value corresponding to the maximum production thresholds beyond which the solution obtained is no longer feasible. Figure 4.6 illustrates the net quantity of food, as the dual price rises to 250 €. These dual prices can be compared to marketed soft wheat prices, which are, in average for French representative farms in cereal regions, of 170 €, 140 €, 110 €, 170 €, 180 €, 210 € per tonne respectively in 2007 until 2012. Discrepancies between years reflect the heterogeneous economic and meteorological conditions prevailing over the 6 years 2007-2012.

TABLE 4.2. Quantities of calories (Mt soft wheat eq), as well as other calorie indicators over the six FADN years (2007-2012).

* reference price averaging soft wheat prices in French Centre region.

FADN year	2007	2008	2009	2010	2011	2012
unconstrained estimate (Mtsweq)	166	227	219	183	218	204
feasibility limit (Mtsweq)	450	530	550	500	505	505
limit dual price (€/tsweq)	1920	1244	1889	1284	1525	1974
dual price for 300 Mtsweq threshold	25	26	20	25	29	36
dual price for 350 Mtsweq threshold	52	32	27	30	34	44
dual price for 400 Mtsweq threshold	94	49	36	51	72	83
reference soft wheat price* (€/t)	170	140	110	170	180	210
ratio limit/reference	2.6	3.8	5	2.9	2.8	2.4

In Figure 4.7, we illustrate simultaneously how vary the quantities of human calories provided by the EU farming system (on the x-axis) and how vary the land sharing among groups of crops (on the y-axis) over the 6 years. Results significantly differ among years, when considering gaps between unbounded case and feasibility limit case on the one hand, and between years in terms of quantity shift from left to right (on the x-axis) on the other hand. But the land allocation evolution considered when changing the calorie quantity limit appears robust over years. It has to be noticed that the EU potential calorie

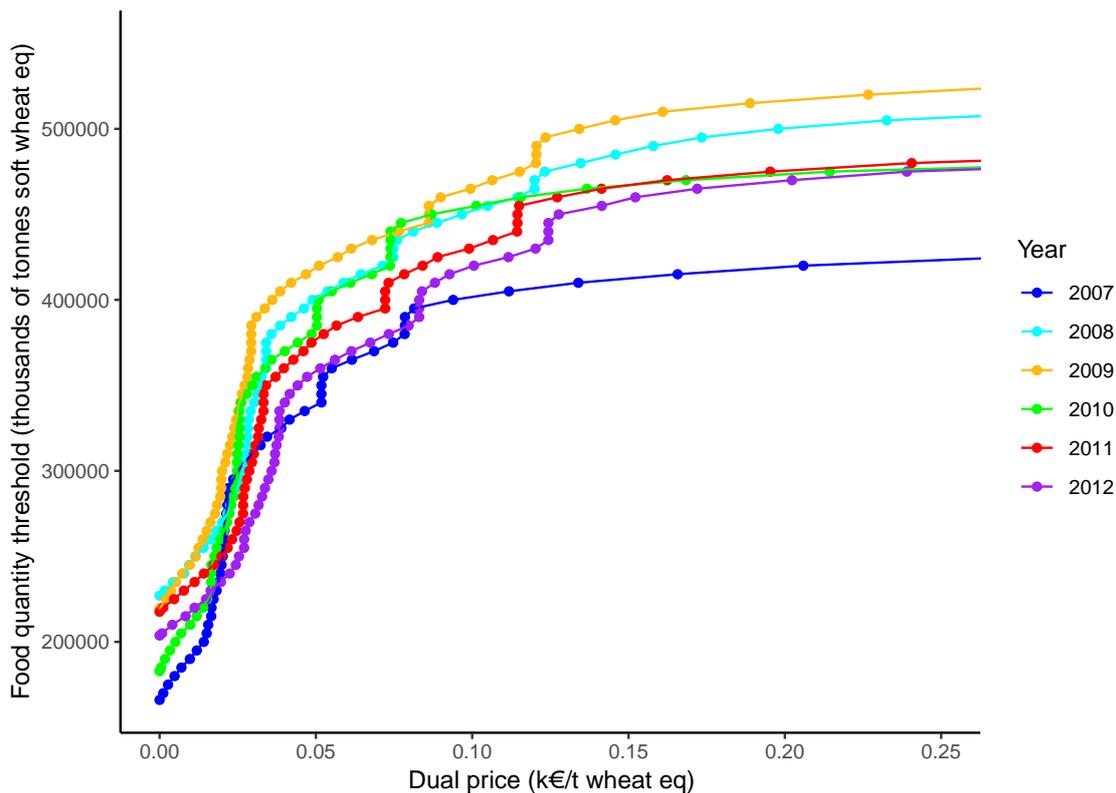


FIGURE 4.6. Dual value corresponding to the net quantity of food.

limit estimated by the AROPAJ model varies from 450 up to 550 Mt expressed in equivalent soft wheat over years, going up from 2.5 to 5 times the level referring to the basic calibrated case.

The gain of calorie production is mainly due to transfers from animal sources (milk and meat) toward cereals, oilseeds and protein crops. Another key aspect emerges through change in animal diet, remembering that in the model on-farm cereals, concentrate feed and pasture account for feeding.

We detail the analysis regarding livestock (see Figures 4.8 and 4.9). In our simulations, livestock is authorized to adjust within a limit of +/-15% referring to the basic case. Considering that unchanged prices may be in favor of some animal categories in the unbounded calorie threshold case, the gap of concerned livestock categories may reach 50% over the interval of the calorie threshold from the unbounded case to the upper limit case. We illustrate changes for two emblematic categories, namely beef cows and milk cows. When the number of beef cows regularly varies with change in the calorie threshold, the number of milk cows follows a different path of weaker amplitude and of irregularly decreasing. The milk quota system applying for the years 2007-2012 matters strongly.

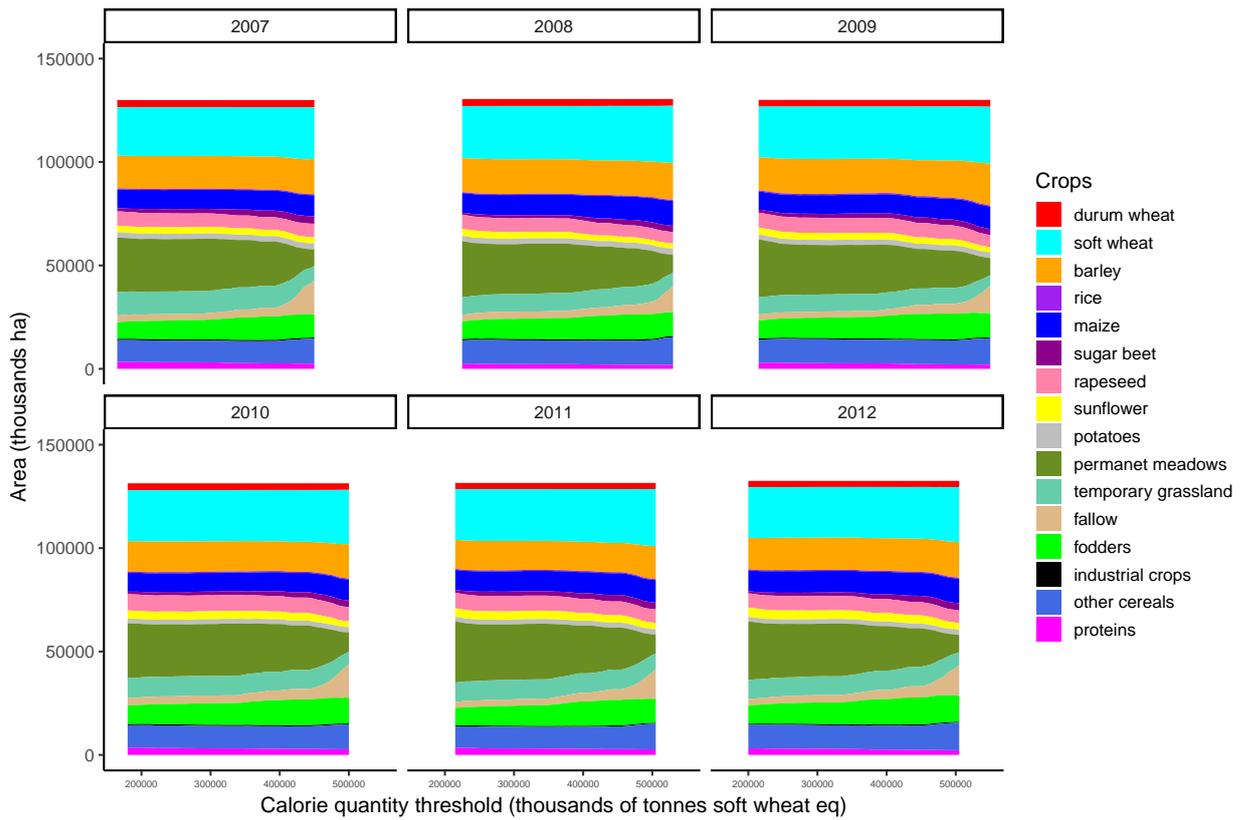


FIGURE 4.7. Areas evolution of major crops depending on calorie quantity threshold.

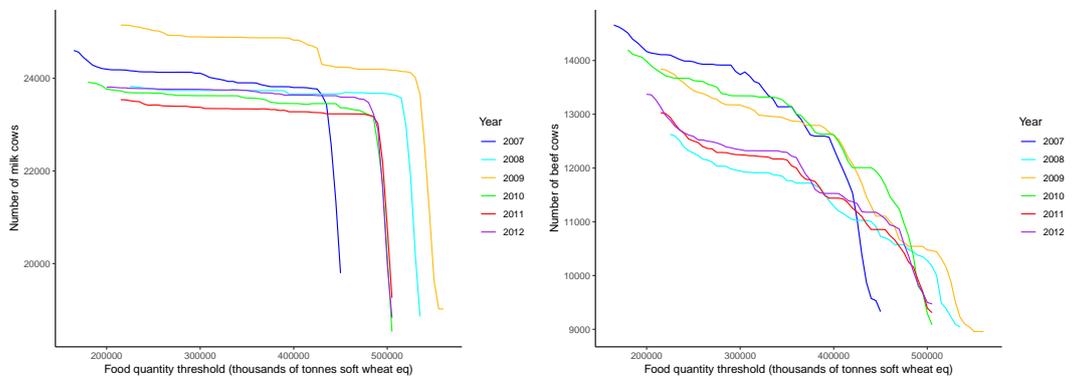


FIGURE 4.8. The variation of the number of milk cows depending on the calorie threshold. **FIGURE 4.9.** The variation of the number of beef cows depending on the calorie threshold.

Given the diversity of farming systems across the EU, we investigate the results at the regional level. To this end, we consider areas dedicated to straw cereals on the one hand and to permanent meadows on the other hand. Proportions in area sharing for these two categories are mapped for each of the 6 years and for two cases referring to the reference and to a calorie threshold of 435 millions of tonnes of equivalent soft wheat (Figure 4.10 refers to cereals and 4.11 refers to meadows).

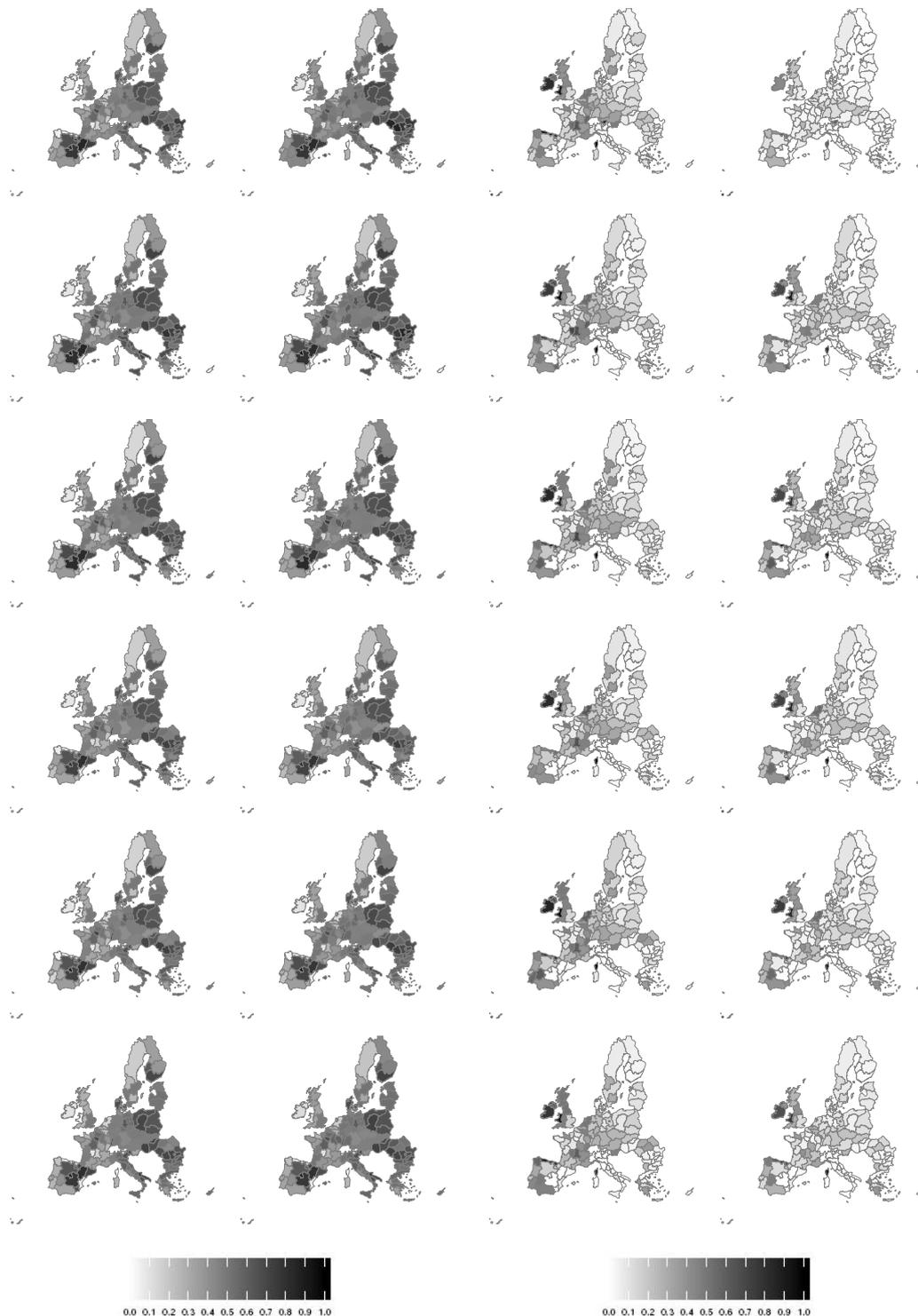


FIGURE 4.10. Proportion of total straw **FIGURE 4.11.** Proportion of permanent cereals area in the EU (2007-2012) for no meadows area in the EU (2007-2012) for threshold and after the introduction of a no threshold and after the introduction of threshold of 435 Mtsweq. a threshold of 435 Mtsweq.

Supporting the aggregated land sharing illustrated in Figure 4.7, there is no apparent contrast between the regions over the EU in terms of land dedicated to straw cereals (Figure 4.10). None or almost none of the regions lessen land dedicated to cereals. But pointing out the land occupied by meadows reveals that regions significantly differ in terms of land sharing when calorie targets are ambitious. Some of western and central European regions may suffer with cattle decline revealed through grassland decrease (e.g. north-west France and south-east England, south Germany and Austria). Knowing that fallows should replace grasslands (as shown in Figure 4.7), increasing target of net calorie production may affect activity in some rich agricultural regions.

4.4 Discussion and conclusion

We investigated the compatibility of two goals frequently backed by policy-makers, underlined in European Commission guidelines and boosted as general common objectives. The goals, namely increasing food production and decreasing agricultural impact on the environment are expressed in our analysis via the net supply of calories with regard to the human diet on the one hand and via the abatement of greenhouse gas emissions on the other hand.

A supply side economic model, AROPAj, representing a large part of the EU agricultural sector is used for simulating the effect of carbon pricing as well as of calorie targeting. This linear programming model is based on technical and economical characteristics detailed at the representative farm level over the EU. It is calibrated against 6 sets of annual data (FADN data for the period 2007-2012), and, for each of the years, delineated into more than 1700 up to more than 1900 representative farms. Carbon pricing is introduced as a "primal" approach when agricultural sourced GHG emissions are explicitly affected by a price expressed in € per tonne of equivalent CO₂ over a wide interval of values ([0,200]). The calorie target is introduced as a bound affecting the net sum of calories emanating from marketed crops, milk and meat related to sold animal, and bought concentrated feed in all representative farms together. Calories are computed against FAO references and expressed in tonnes of equivalent soft wheat. In this "dual" approach, the target varies from the unbounded case up to the feasibility limit. Our methodological framework presents the advantage of relying on the principle "simulate and average", unlike the vast majority of models, whose simulations assume the use of the average values of the parameters.

This supply side analysis is conducted for 6-year contrasted economic and meteo-

rological contexts, as an example remarkably characterized by doubling the cereal price over the period. That does not prevent against the lack of all feedbacks effects which could enrich (and complexify) the analysis, first of them would be prices change resulting of market clearing, other would be climate feedback and technical progress induced by strong change in European agricultural supply. Nevertheless, amplitude of observed economic changes for which the model accounts, makes valuable our analysis. The point here is that results are provided in technically and economically viable (observed) conditions.

At the European Union level, a carbon price of 200 € would reduce GHG emissions from 245 Mt to 281 Mt, and the abatement rates from 23 % to 36 %, depending on the years, knowing that the annual base emissions also vary significantly (355 Mt to 386 Mt). By making this price vary across the entire interval considered [0,200], crop productions increases to some extent, and ends up decreasing but much less than animal productions, which, they regularly decline when the CO₂ price increases.

This result is reinforced when we assign to the sector a growing production of food calories (for human diet). The food objective can be achieved while decreasing (to some extent) GHG emissions, but this is done to the detriment of animal productions, which would become "stumble" on the level of adjustment (15 %) retained for the simulations. These effects are reflected in a strong decrease in grassland areas, partly offset by an increase in marketed crops areas, but also by a significant increase in fallows areas. It could be more expensive (to achieve the objective) to maintain animal productions that consume plants than to suppress these productions, at least in certain regions, including livestock-dominated regions. The regional analysis (mapping) made above (see Figure 4.10 and 4.11), explains this result.

Without compensation (cash transfers) and under the given economic conditions, the objectives of reducing emissions or satisfying the production of calories result in a 30% (40 Mld €) decrease in the gross margin. In a 200 € price situation, the gross margin decrease in amplitude is of 51 % (37 Mld €). Despite the strong effort required, of the order of magnitude of 37-40 Mld €, these values are situated in the order of magnitude of the European Union spending on agriculture for the first pillar, which is of 46 Mld € in average over the six years 2007-2012⁹.

As the EU is a major economic player in the world arena, a larger scale analysis should take into consideration the "leakage effect". This is due to the fact that changing relative product prices including environmental externalities can lead to production

9. <https://agriculture.gouv.fr/>.

relocating outside the EU, possibly realized in worse environment-friendly conditions (Domínguez & Fellmann, 2015; Aldy & Stavins, 2012; European Commission, 2011a).

Climate change mitigation policies in the agriculture sector play a crucial role in mitigating GHG emissions, but they must be designed so as to minimize trade-offs that can appear with food production and other sustainable development targets. Within the European Union, both for national reasons and in order to respect the framework of European economic regulation, environmental policies are always on the agenda and will probably end up by being implemented. Simultaneously, these policies should not lead to a reduction in agricultural production in a global way when accounting for food security. In that sense, any European policy should incorporate possible cross-effects between the EU Member States, and with the rest of the world.

CHAPITRE 5

Interest in promoting a 2-price system regarding efficient abatement of CH₄ and N₂O emissions sourced by agriculture in the European Union

Ce chapitre en anglais reprend les résultats du papier "*Interest in promoting a 2-price system regarding efficient abatement of CH₄ and N₂O emissions sourced by agriculture in the European Union*", écrit en collaboration avec Pierre-Alain Jayet et Stéphane De Cara.

Abstract

The implementation of public policies designed to support agricultural greenhouse gas (GHG) emissions mitigation needs an in-depth study of a cost-effectiveness analysis of mitigation opportunities. This paper addresses the reduction of GHG emissions in the European Union from an innovative and interesting perspective that involves the dissociation of the prices of the two main gases emitted in the agricultural sector, methane and nitrous oxide, respectively. The objective is to examine the impacts of a multi-gas approach within the framework of climate policies. The starting point refers to change in relative radiative powers of the gas when considering a change in time horizon. A system of differentiated prices of the two GHGs could redefine the climate policy, offering flexibility in reducing the cost of emission abatement and taking into account the "climate urgency" which consists of being projected on a time horizon much shorter than the horizon generally used to measure the equivalence of the radiative power of gases, 100 years. The European agro-economic model AROPAj is used, given its ability to take into account all sources of agricultural GHG emissions and to conduct abatement cost estimates. Using simulations results, we estimate a 2-dimension abatement function depending on two GHG prices. We analyze the price elasticities of abatement around different levels of GHG prices. We study the combination of prices allowing an effective reduction of GHG emissions. We show that given the significant variation of the Global Warming Potential from the 100-year reference horizon to a 20-year horizon, the weight of methane will become more important in the agricultural sector, which means that its weight will increase for the entire economy with a GWP multiplied by about 3 times. Results indicate that the change of GWP according to the "climate emergency" modifies in a significant manner the abatement rate for a set of given differentiated gas prices.

Keywords : Climate policies, greenhouse gas emissions, differentiated GHG prices, European Union, agriculture sourced GHG emissions ;

5.1 Introduction

The issue of climate change is becoming more and more felt in Europe and around the world. Faced with "climate emergency", major efforts are being made to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. In the framework of climate policies, one of the elements that must be taken into account is that these greenhouse gases have different impacts on global warming, being differentiated by both their radiative efficiency and lifetime. The Global

Warming Potential (GWP) represents one of the possible emission metrics and time horizons, being introduced in the IPCC First Assessment Report and updated in successive IPCC reports. IPCC (2014) defines the Global Warming Potential as "*An index measuring the radiative forcing following an emission of a unit mass of a given substance, accumulated over a chosen time horizon, relative to that of the reference substance, carbon dioxide (CO₂)*". The CO₂-equivalent emissions are therefore obtained by multiplying the emissions of a greenhouse gas by its GWP for the given time horizon. The default metric is considered to be the GWP calculated over 100 years, with carbon dioxide as the reference gas (IPCC, 2013, 2014). But we need to take into account that "climate emergency" increases the weight of a greenhouse gas with higher GWP on a shorter horizon.

The in-depth analysis of differentiating the two major non-CO₂ greenhouse gases may open new opportunities to develop cost-effective policies capable of coping with climate change. Addressing global warming has focused more on the reduction of CO₂ emissions, given that carbon dioxide is the principal greenhouse gas participating in climate change. However, numerous studies show that gases other than CO₂ can play a significant role in this issue. Dessus et al. (2008, 2017) claim that low-life but high-radiative gases such as methane are more harmful to the climate than carbon dioxide because of their potentially more important short-term impacts. In the European Union, the agricultural sector is the second biggest contributor to greenhouse gas emissions, which are mainly produced by non-CO₂ gases, namely CH₄ (55.1%), N₂O (42.4%), CO₂ having a minor contribution (2.5%) (European Environment Agency, 2018).

We address the issue of reducing greenhouse gas emissions by dissociating the prices for the two main non-CO₂ agricultural GHG gases (methane and nitrous oxide). We take into account that there is a metric in the equivalence of GHGs in CO₂ (the GWP over a 100-year horizon), and that the differentiation of prices (by limiting to the price ratio CH₄/N₂O and "making abstraction" of the CO₂"), allows to treat the "climate urgency" by focusing on prices (which are easier to handle than GWPs) without modifying the metric for accounting. At the beginning, the analysis is based on the 100-year reference horizon, after which we open a new analytical path of analysis by taking into account a 20-year horizon, given the "climate urgency", as well as the significant variation of the Global Warming Potential (GWP) (which for methane, compared to nitrous oxide, varies in a report 3 to 1 when we go from a 100-year horizon to a 20-year horizon).

Quantitative modeling is useful for addressing a complex sectoral problem (such as the complexity of the agricultural sector in relation with the environment and in particular the climate). A sectoral supply model centered on the relationship between the agriculture and the environment is also needed. AROPAj is one of the models that can be

used for this purpose. The AROPAj model is adapted to our problem because of its ability to take into account all sources of emissions in the agricultural sector and to conduct emission reduction analyzes. We estimate the emission abatement rates of the two gases (CH₄ and N₂O) through specific functional forms that allow us to easily trace the marginal abatement cost curves, when we simultaneously tax the two gases.

5.2 Non CO₂ GHG at stake

The abatement of greenhouse gas emissions has become a central issue in order to formulate effective public policies that involve several gases and not only CO₂. The Article 2 of the UNFCCC ([United Nations, 1992](#)) highlights the need for a "*stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner*".

[Michaelis \(1999\)](#) draws attention to the importance of an analysis CO₂ versus non-CO₂ gases in formulating effective policies, showing that the use of a single cost function is not sufficient for an efficient allocation of abatement effort between the different gases. [van Vuuren et al. \(2006\)](#) highlight that the inclusion of non-CO₂ gases in the mitigation analysis as well as an improvement in knowledge about a potential future reduction of non-CO₂ gases play an important role. A contribution of non-CO₂ gases in order to reduce greenhouse gas emissions appears to be higher if less stringent targets are set, decreasing when targets increase. A multi-gas approach would lead to a cost reduction of 40% compared to a CO₂-only approach for a stabilization of greenhouse gas radiative forcing in 2150 at 4.5 W/m². [Bernard et al. \(2006\)](#) resort to a multi-sector and multi-country dynamic general equilibrium model (GEMINI-E3) and show that the inclusion of non-CO₂ gases in the mitigation strategy could lead to an important reduction in economic costs in terms of a long-term stabilization of global greenhouse gas emissions. The advantages of a multi-gas strategy vary across regions around the globe, depending on various factors such as differences in mitigation costs or differences in greenhouse gas contributions due to diverse economic elements, such as the fuels combination in the electricity sector, the share of the agricultural sector, etc. [Manne & Richels \(2010\)](#) used the intertemporal general equilibrium model MERGE to analyze the effects of a multi-gas approach in the case of short-term and long-term climate policy and showed that a multi-gas approach would be an advantage for the regions in Annex B of the Kyoto Protocol,

except for the former Soviet Union and the countries of Eastern Europe. At the same time, the optimal mix of mitigation options seems to be highly dependent on the time horizon used in the GWP calculation.

The issue of regulation in the case of multi-pollutants is treated from a different perspective by other authors. [Meunier \(2017\)](#) addresses a situation in which two goods simultaneously contribute to an externality (only one good is regulated) and studies the influence of the unregulated good in choosing a policy instrument (price or quantity). If the two goods are complementary, the quantity instrument is favorable, while if the two goods are substitutes, the tax instrument is recommended. Adapting the situation in the case of a climate policy, the author shows that none of the two instruments (tax or cap-and-trade) is able to provide an adequate environmental framework mainly because of the uncertainty that characterizes the foreign emissions, but highlights that a potential environmental benefit could be brought by using a tax instrument, if domestic and foreign emissions are weak substitutes. [Ambec & Coria \(2013\)](#) take into consideration two regulated pollutants in order to study the choice of policy instruments (price, quantity or a combination of the two), showing that the complementarity or substitutability of reduction efforts play an important role. Applying a tax on a polluter and a quota on the other polluter seems to be particularly favorable when the pollutants are complementary.

Public climate policies are more and more stressed by faster forecast changes in carbon oxide concentration and related phenomena like temperature and rainfalls ([IPCC, 2013, 2014](#); [Kandlikar, 1996](#)). There is a need to perform cost-effective policies taking account of relative multi-GHG contributions when GHG differ in cumulated Global Warming Power (GWP) measured at a given time horizon and differ in dynamics of presence time in the atmosphere. After CO₂, methane has an important influence among GHG that participate in climate change, offering attractive short-term emission abatement opportunities.

According to [UN \(1998\)](#), the global warming potentials had to be accepted by the Intergovernmental Panel on Climate Change and settled by the Conference of the Parties. Different tools allow the comparison of the contributions of emissions to climate change, but all these methods of measurement have limits and present a certain level of uncertainty.

When taking into account several greenhouse gases, [Aaheim \(1997, 1999\)](#) draw attention to the issue raised by the aggregation of emissions of different gases. The standard method represented by the Global Warming Potential is characterized by an imprecision that could negatively influence the decisions of the optimal control policy. Another issue

that raises questions is related to the choice of time horizon which may be significant for countries where short lifetime methane has a large share in the composition of gas emissions. At the same time, extending the period in GWP calculation, from 20 to 500 years, for example, can lead to a significant reduction in emissions. [Shackley & Wynne \(1997\)](#) consider that the ambiguity that characterizes the GWP, is the main reason why the indicator continues to be developed and used as a scientific policy tool.

One of the most widely used policy tools in assessing the mitigation of climate change is represented by the marginal abatement cost (MAC) curves. MACCs were first applied in the early 1980s, over time being used in vast areas (e.g. electricity, transport, industry, air pollution), and then used in climate change issues, given their performance of associating the potential reduction of a good with the cost of its last unit, i.e. its marginal cost ([Kesicki & Strachan, 2011](#)). The costs of GHG mitigation efforts should not exceed the social benefits of emissions reduction. [Vermont & De Cara \(2010\)](#) and [OCDE \(2015\)](#) identify three different methodologies used to determine and develop the mitigation costs of GHG emissions : (i) bottom-up cost-engineering ; (ii) micro-economic supply-side models ; (iii) partial or general equilibrium models.

According to [Kuik et al. \(2009\)](#), there are various factors that influence MAC evolution, the most significant being the stringency of the stabilization target of greenhouse gases in the atmosphere, the choice of the control variable (only CO₂ versus multi-gas), the time profile of the emissions reductions (intertemporal dynamic optimisation), as well as the number of regions in the model.

When dealing with multiple gases, the difficulty that arises is primarily due to gas incompatibility, each of them being characterized by a specific radioactive force and its own lifetime. Keys elements are the discount rate and the time horizon relevant for economic valuation of GHG abatement, which interfere with GWPs as a measure of equivalence of any GHG compared to CO₂. A low discount rate is preferred to take better account of future generations and long-term effects. The economics of GHG emissions recommends the use of a discount rate below 3%, showing that discount rates of about 6-9% proved to be inappropriate in assessing greenhouse warming ([Michaelis, 1999](#)). By using an optimal control methodology, [Kandlikar \(1996\)](#) shows that trace gas indices depend critically on the choice of the discount rate, which is associated with two essential determinants of climate change policy decisions (expectations of future economic growth and the degree of optimism on future outcomes). In our analysis we follow a different perspective, by privileging the short-term, given the fact that in order to let options/choices/leeway to future generations, it is necessary to preserve the immediate future.

At the same time, to design a cost-effective climate policy, flexibility plays an important role. Compared to a CO₂ only policy, a "what" flexibility can lead to a strong decrease of the marginal abatement costs. [Hyman et al. \(2003\)](#) focus on a "what" flexibility to estimate the costs of reaching various targets of reducing the emissions of the non-CO₂ greenhouse gases identified in the Kyoto Protocol (CH₄, N₂O, SF₆, PFCs, HFCs), showing that non-CO₂ gases represent a key element in designing a cost-effective policy, by having an important contribution to effectively limit climate change, through their significant share to emissions reduction due to their high GWPs. However, it must remain linked to "where" and "when" flexibility, as well as flexibility with respect to the timing of policy ([De Cara et al., 2008](#); [Aaheim, 1999](#); [Kuik et al., 2009](#)).

5.3 Method - Model and simulations

5.3.1 The model

Our analysis is sustained by the AROPAj model, in its version V5 fed by 2007-2012 FADN data. With its detailed GHG block, this agro-economic model suits well to provide GHG abatement cost estimates, as well using the "primal" approach through GHG prices, as using the "dual" approach through GHG quotas (see [De Cara et al., 2005](#) and [De Cara & Jayet, 2011](#) among other papers)¹.

Simulations based on AROPAj integrate the 2-GHG prices. Scenarios refer to 30 price steps ranging from 0 up to 10 k€/tCO₂eq applying to each of the GHG. The huge upper value aims at better estimating the asymptotic rate of abatement. The grid of the 2-dimension price interval is made of variable steps aiming at better capturing the form of the curve.

5.3.2 Methodological elements

In this paper, two prices are considered for the two main non-CO₂ greenhouse gases (CH₄ and N₂O). There is no theoretical problem to fix the price of each of the GHG when pricing the quantity unit in ton of CO₂ equivalent when time horizon is fixed (at 100 years). In fact, differentiated prices between the 2 GHGs reflect the change of GWP measured at different time horizon.

1. Detailed features of the model are described and open to access on [AROPAJ documentation](#)

The economic behavior of the agricultural sector is assumed to be summarized by the following optimization program :

$$\begin{aligned} \max_x \pi(x) \\ \text{s.t. } x \in \mathcal{A} \end{aligned}$$

where x refers to the activity vector, \mathcal{A} the production set, and π the profit as the objective function of the program. Let us denote the i -GHG emission function by $E_i(x)$, for $i = 1, 2$ representing the i GHG (namely CH₄ and N₂O, respectively). At the same time, let us denote related prices by p_i . When prices apply, the optimization program becomes :

$$\begin{aligned} \max_x V(x) = \pi(x) - p \cdot E(x) \\ \text{s.t. } x \in \mathcal{A} \end{aligned} \tag{P}$$

Let us consider the solution of the (P) program, denoted by x^* , and the related emission functions, denoted by E_i^* , such that $E_i^*(p) = E_i(x^*(p))$. Let us focus on the value function of the program, which is $V^*(p) = V(x^*(p))$. Applying envelop theorems, we have the usual mathematical and economic results :

$$\frac{\partial V^*}{\partial p_i} = -E_i^*$$

which immediately lead to the symmetry property :

$$\frac{\partial E_1^*}{\partial p_2} = \frac{\partial E_2^*}{\partial p_1} \tag{5.1}$$

and to the symmetry of the derivative matrix symbolically represented by $\frac{\partial E^*}{\partial p}$.

As a corollary, any analytic function based on MP modeling results should satisfy this symmetry property. Let us consider such functions, denoted by $f_i(p)$, so that $\frac{\partial f_1}{\partial p_2} = \frac{\partial f_2}{\partial p_1}$. An important consequence of this result is that any variation of the change in emission abatement cost ΔC does not depend of the price path, i.e. the price vector changing from p^0 up to p^1 (in other words, the curve integral is well defined) :

$$\Delta C = \int_{p^0}^{p^1} -f(u) \cdot du \tag{5.2}$$

Let us define the abatement rates as it follows :

$$\alpha_i(p) = 1 - \frac{f_i(p)}{E_i^0}$$

where E_i^0 refers to the base-year i -GHG emission. The term $\bar{\alpha}_i$ will refer to the i -asymptotic level of emission rate ($\bar{\alpha}_i = \lim_{p \rightarrow \infty} 1 - f_i(p)/E_i^0$). Applied to the abatement rate function, the previous property of symmetry is transformed as :

$$E_1^0 \frac{\partial \alpha_1}{\partial p_2} = E_2^0 \frac{\partial \alpha_2}{\partial p_1}$$

Let remark that an increase of one GHG price may lead to an increase of the other GHG emission (and a decrease of the other GHG abatement rate), but the impact of any price increasing should negatively impact the value function V^* , as far as the π profit function is strictly concave with respect to the 2 prices.

Inspired by the analytical framework proposed by [De Cara & Jayet \(2011\)](#), we propose the following specification of the abatement rates :

$$i = 1, 2: \quad \alpha_i(p) = \bar{\alpha}_i \left[1 - (1 - \delta_i) e^{-\sum_{j=1}^2 \theta_{ij} p_j} - \delta_i e^{-\left(\frac{p_i}{\tau_i}\right)^{\beta_i}} \right] \quad (5.3)$$

with respect to the symmetry condition transformed into $(1 - \delta_1 \theta_{12}) \bar{\alpha}_1 E_1^0 = (1 - \delta_2 \theta_{21}) \bar{\alpha}_2 E_2^0$. The specification satisfies the two limit conditions, i.e. $\lim_{p \rightarrow 0} \alpha_i(p) = 0$ and $\lim_{p \rightarrow \infty} \alpha_i(p) = \bar{\alpha}_i$.

5.3.3 Model implementation

The general model is delineated into K farm-group models, each k -farm-group referring to one MP model. The basic structure of MP models is linear programming (LP), meaning that, referring to the generic program P , the π_k profit functions are linear against all variables and that the \mathcal{A}_k sets of production are bound by linear constraints.

Thereafter, the k index will denote alternatively a farm-group or a set of farm-groups up to a country. When there will be need to differentiation (e.g. between countries), the parameters related to the abatement rate curves will be indexed by k (for instance, β_{ik} , θ_{ijk}). The number K will refer to the number of entities taken into account as a subdivision of the EU and k varies from 1 to K . When rate curve estimates will refer to the EU as whole, index will be denoted by ‘‘EU’’. Aggregation bias against the rate curves at the EU

scale leads to compare the two following expressions (respectively for each of the two GHG i) :

$$\begin{aligned} \alpha_{iEU}(p) &= \bar{\alpha}_{iEU} \left[1 - (1 - \delta_{iEU})e^{-\sum_j \theta_{iEUj} p_j} - \delta_{iEU} e^{-\left(\frac{p_i}{\tau_{iEU}}\right)^{\beta_{iEU}}} \right] \\ \alpha_{iAG}(p) &= \frac{1}{E_{iEU}^0} \sum_{k=1}^K \bar{\alpha}_{ik} E_{ik}^0 \left[1 - (1 - \delta_{ik})e^{-\sum_j \theta_{ijk} p_j} - \delta_{ik} e^{-\left(\frac{p_i}{\tau_{ik}}\right)^{\beta_{ik}}} \right] \end{aligned} \quad (5.4)$$

The first expression refers to the estimation of the EU rate curve parameters based on aggregated emissions ($\alpha_{iEU}(p) = 1 - \frac{\sum_k f_{ik}(p)}{E_{iEU}}$). The second expression refers to the set of K series of "national" rate curve parameters ($\forall k : \alpha_{ik}(p) = 1 - \frac{f_{ik}(p)}{E_{ik}}$).

Estimations of rate curve parameters are provided by a non-linear method implemented through the R software. Parameter values of the equation (5.3), for each of the six years of analysis can be found in Table 5.1.

TABLE 5.1. Estimated parameter values.

Gas	Parameter	2007	2008	2009	2010	2011	2012
N ₂ O	$\bar{\alpha}_1$	0.66	0.61	0.60	0.66	0.63	0.62
	δ_1	0.71	0.79	0.74	0.72	0.78	0.77
	θ_{11}	4.05	1.36	1.71	3.74	1.58	1.88
	θ_{12}	9.19	9.28	8.49	10.35	8.56	7.71
	τ_1	0.97	0.86	0.63	0.85	0.99	1.13
	β_1	1.24	1.18	0.99	1.35	1.30	1.57
CH ₄	$\bar{\alpha}_2$	0.63	0.61	0.63	0.63	0.62	0.61
	δ_2	0.51	0.62	0.55	0.52	0.59	0.61
	θ_{21}	10.51	8.99	7.95	11.97	8.79	7.56
	θ_{22}	5.37	3.22	4.26	5.59	3.31	3.18
	τ_2	0.19	0.30	0.27	0.19	0.29	0.30
	β_2	1.22	1.42	1.31	1.28	1.66	1.48

5.4 Context on GWP and the consideration of two time horizons

Corresponding to the Fourth Assessment Report (AR4), for a 100 year, GWP for methane equals 25, while nitrous oxide presents a GWP of 298. Methane is extremely sensitive to the time horizon due to its relatively short lifetime. Compared to a 100-year horizon, for a 20-year horizon, its weight almost triples, as can be seen from Table 5.2.

TABLE 5.2. Global Warming Potential values reported to CO₂, for 20 and 100-year time horizon. *Source : IPCC, 2007, 2013*

<i>Greenhouse (GHG) gas</i>	GWP values for 20 and 100-year time horizon					
	<i>Second Assessment Report (SAR)</i>		<i>Fourth Assessment Report (AR4)</i>		<i>Fifth Assessment Report (AR5)</i>	
	20 years	100 years	20 years	100 years	20 years	100 years
<i>Carbon dioxide (CO₂)</i>	1	1	1	1	1	1
<i>Methane (CH₄)</i>	56	21	72	25	84	28
<i>Nitrous oxide (N₂O)</i>	280	310	289	298	264	265

Let us define by g_i^{H100} and g_i^{H20} the values of Global Warming Potential (according to the IPCC Fourth Assessment Report (AR4)) in the case of two time horizons, 100 years and 20 years respectively, for $i = 1, 2$ representing the i GHG (CH₄ and N₂O, respectively).

We consider g_i the ratio between GWP at the 20-year horizon and GWP at the 100-year horizon :

$$g_i = \frac{g_i^{H20}}{g_i^{H100}}$$

$$\text{CH}_4 : g_1 = \frac{72}{25} \quad \text{and} \quad \text{N}_2\text{O} : g_2 = \frac{289}{298}$$

In the framework of a "climate emergency"², the relative weight of methane compared to N₂O will increase, by a ratio of approximately 3 ($\frac{g_1}{g_2} = \frac{72}{25} \cdot \frac{298}{289} = 2.97$).

We then take into consideration the change of GWP and we move from the reference horizon of 100 years to a 20-year horizon. When emissions are calculated for a time horizon of 100 years, the function of the (P) program can be written as it follows :

$$V(x) = \pi(x) - \sum p_i \cdot g_i \cdot E_i^{H100}(x)$$

By switching to a GWP on a 20-year horizon, the emission level for this horizon is calcu-

2. "Climate emergency" consists to be projected on a time horizon much shorter than the reference time horizon, usually 100 years.

lated as follows :

$$E_i^{H20}(x) = g_i \cdot E_i^{H100}(x)$$

We consider the abatement rates as it follows :

$$\alpha_i(p) = \frac{E_i^0 - E_i^*(p)}{E_i^0}$$

where E_i^0 refers to the base-year i -GHG emission and $E_i^*(p)$ refers to the i -GHG emission after applying the tax.

The new price of the two gases due to the shift to a 20-year horizon can be calculated as follows :

$$q_i^{H20} = p_i^{H100} \cdot g_i$$

Given the radiative power and the time horizon, we can say that changing the prices of the two gases, we change the radiative value of the gases. Moving from a 100-year horizon to a 20-year horizon, will give to methane a greater weight in the economy. The difficulty lies in the fact that the reduction is calculated on the basis of emission quantities that are calculated by using a GWP of 100 years. In the AROPAj model, methane already takes a heavier weight than N₂O. The prices of the two gases are always expressed in CO₂ equivalent, with a reference GWP of 100 year-horizon.

5.5 Analysis of results

For the European agricultural sector, in 2009, the initial quantity of methane emissions calculated using a GWP on a 100 year-horizon (217 MtCO₂eq) would be of about 651 MtCO₂eq (GWP on a 20-year horizon), the quantity of N₂O emissions would be kept at 145 MtCO₂eq, which would mean a variation from 362 MtCO₂eq to 796 MtCO₂eq of total EU agricultural emissions.

The graphs illustrated in Figures 5.1, 5.2 and 5.3 represent the abatement rate of CH₄ and N₂O emissions (expressed as a percentage), in the framework of a double price system in which the prices of the two gases largely range from 0 to 500 €/tCO₂eq (the

tonne of CO₂eq being calculated based on a GWP over a 100-year horizon). Four iso-abatement levels were introduced (10%, 20%, 30% and 40%, respectively). For a certain target, we have an entire price system that allows us to reach this target, that means that there is a substitution between the two gases. We need to mention that in the AROPAj model, initial methane emissions, calculated using a GWP at the 100-year horizon, are higher than those of N₂O.

When applying a tax on the two gases, whatever the tax level, the methane abatement rate is usually higher than the N₂O abatement rate. If the tax we apply to methane is superior to the N₂O tax, we obtain a methane reduction rate which is much higher than the N₂O reduction rate. For example, in 2009, if we tax the methane emissions with 400 €/tCO₂eq and the N₂O emissions with 100 €/tCO₂eq, the methane emissions will decrease with 54% and the N₂O emissions with 22%. If we apply a 200 €/tCO₂eq tax on both gases, we get a reduction of CH₄ emissions with 43% and of N₂O emissions with 26%.

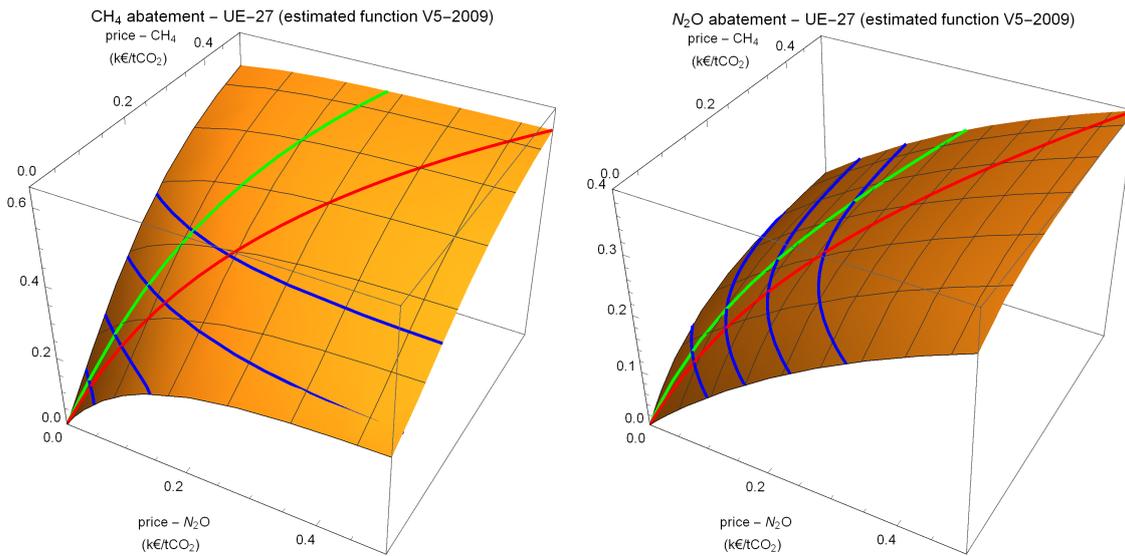


FIGURE 5.1. CH₄ and N₂O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO₂eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N₂O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 2009 FADN year-based version of the AROPAj model.

The abatement rate of CH₄ emissions increases sharply at the beginning so that a tax of 200 €/tCO₂eq allows to reach 50% of abatement potential level, after which it grows asymptotically to the level of the 500 €/tCO₂eq. If we set a 40% methane reduction

target, we have a set of combinations of CH₄ and N₂O prices that allow us to achieve this goal, starting with a methane price of 250 €/tCO₂eq. For N₂O, if we double the methane price reported to the N₂O price and we give more importance to the methane for the same reduction level, we need a higher price, the methane price being less powerful than that of N₂O.

As we have seen, a shift from the 100-year reference horizon to the 20-year horizon, both emission levels and the price of the two gases will almost triple. By switching from an equivalent price system to a price system in a ratio CH₄/N₂O of 3, the abatement rate levels will change substantially. For a GWP calculated over the 100-year horizon, when applying a tax of 150 €/tCO₂eq on methane and 100 €/tCO₂eq on N₂O emissions, the abatement rates of the two gases are 35% and 19%, respectively. If we consider a 20-year horizon, the abatement rates of methane and N₂O respectively will be of 56% and 22%, respectively.

If we put a price on methane emissions, without taxing N₂O emissions, we get a reduction in methane emissions, but also a reduction in N₂O emissions. Conversely, if we tax N₂O emissions without taxing methane emissions, we get a reduction of both N₂O and CH₄ emissions. For 2009, if we fix a price on methane emissions of up to 500 €/tCO₂eq, without taxing the N₂O emissions at all, we get a reduction in CH₄ emissions by up to 56%, but also a reduction in N₂O emissions by up to 16%. If we only tax N₂O emissions without taxing methane emissions, we get a reduction of N₂O emissions by up to 33%, but we also get a reduction of methane emissions by up to 28% (see Figure 5.1).

Given that the 6 years of the analysis 2007-2012 are characterized by different economic contexts, based on agricultural prices and climatic conditions that vary significantly, results indicate that from one year to another there is an interesting variability in the emission abatement curves (see Figure 5.1, and in the Annexes Figures 5.2 and 5.3). During the period 2007-2012, if we tax the CH₄ and N₂O emissions with 200 €/tCO₂eq, we obtain a reduction in methane emissions ranging from 37% to 51%, depending on the year, and a reduction in N₂O emissions varying from 15% to 26%.

5.6 Concluding remarks

Among regulation policies, a system of differentiated prices of the 2 GHGs provides flexibility aiming at reducing the cost of emission abatement. Agriculture supplies a higher quantity of CH₄ emissions than for N₂O at the European Union level, when time

horizon used for measuring equivalence to CO₂ is 100 years. It is known that a shorter duration time of GHG concentration in the atmosphere strongly impact GWPs, and more importantly, strongly impact the GWP ratio when comparing the two GHGs. In our analysis, we use a 100-year horizon and then we retain a 20-year horizon, given the "climate urgency" and the significant variation in the Global Warming Potential.

By using a multi-gas approach in the framework of a supply-side model (ARO-PAj), we show that by dissociating the CH₄ and N₂O prices allows refining the climate policy and better adapt it according to the time horizon on which we are projected. We provided a 2-dimension emission function depending on two GHG prices and we estimated the abatement rates of these gases through specific functional forms. When applying a tax on the two gases, whatever the tax level, results show that the methane abatement rate is usually higher than the N₂O abatement rate. Based on the 2009 FADN year, if we tax the CH₄ and N₂O emissions with 100 €/tCO₂eq, the CH₄ abatement rate is 28% and the N₂O abatement rate is 17%. If we double the methane tax to 200 €/tCO₂eq and we tax N₂O emissions with 100 €/tCO₂eq, the methane abatement rate becomes 40% and N₂O will be of 20%. If we triple the methane price to 300 €/tCO₂eq and we keep a tax of 100 €/tCO₂eq on N₂O, the abatement rates for CH₄ and N₂O are 49% and 21%, respectively. If we tax the emissions of the two gases with 100, 200 and 300 €/tCO₂eq, respectively, the methane abatement rates corresponding to these taxes are 28%, 45%, 51% and the N₂O abatement rates are 17%, 26% and 32%, respectively.

Given the important weight of methane in the agricultural sector and the whole economy, an effective climate policy should focus more on the livestock sector, the main CH₄ emitter in Europe. We have shown that a price differentiation of the two GHGs can play a significant role in reducing greenhouse gas emissions (mainly methane). There could be a major interest in accelerating the "change of the human diet" towards less consumption of animal products. In the previous chapter, we have shown that we can reduce greenhouse gas emissions and change agricultural supply while increasing the quantity of food calories. The food objective can be achieved while decreasing emissions to some extent, the livestock production decreasing continuously, which would lead to a significant decrease in methane emissions.

5.7 Appendix

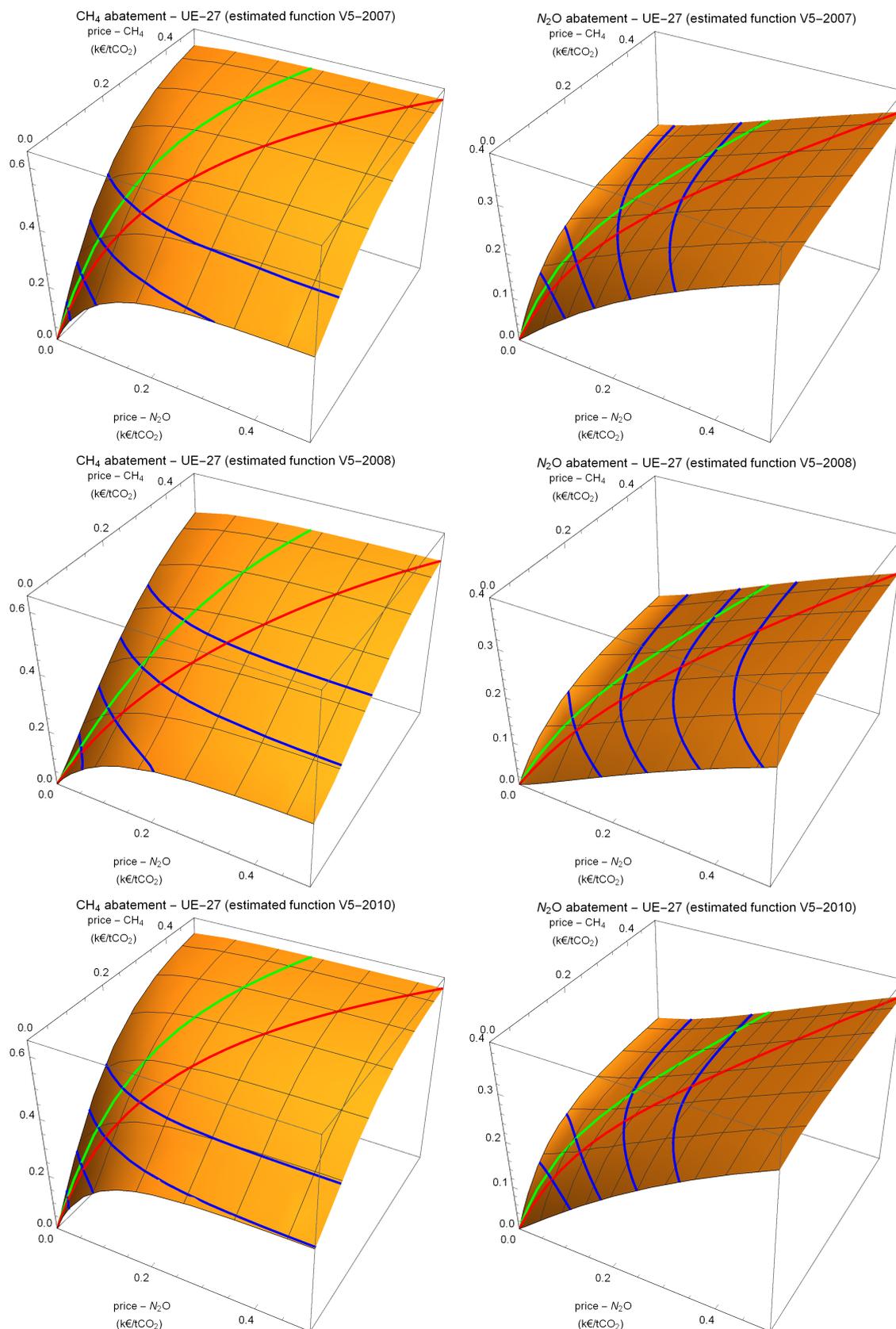


FIGURE 5.2. CH₄ and N₂O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO₂eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N₂O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).

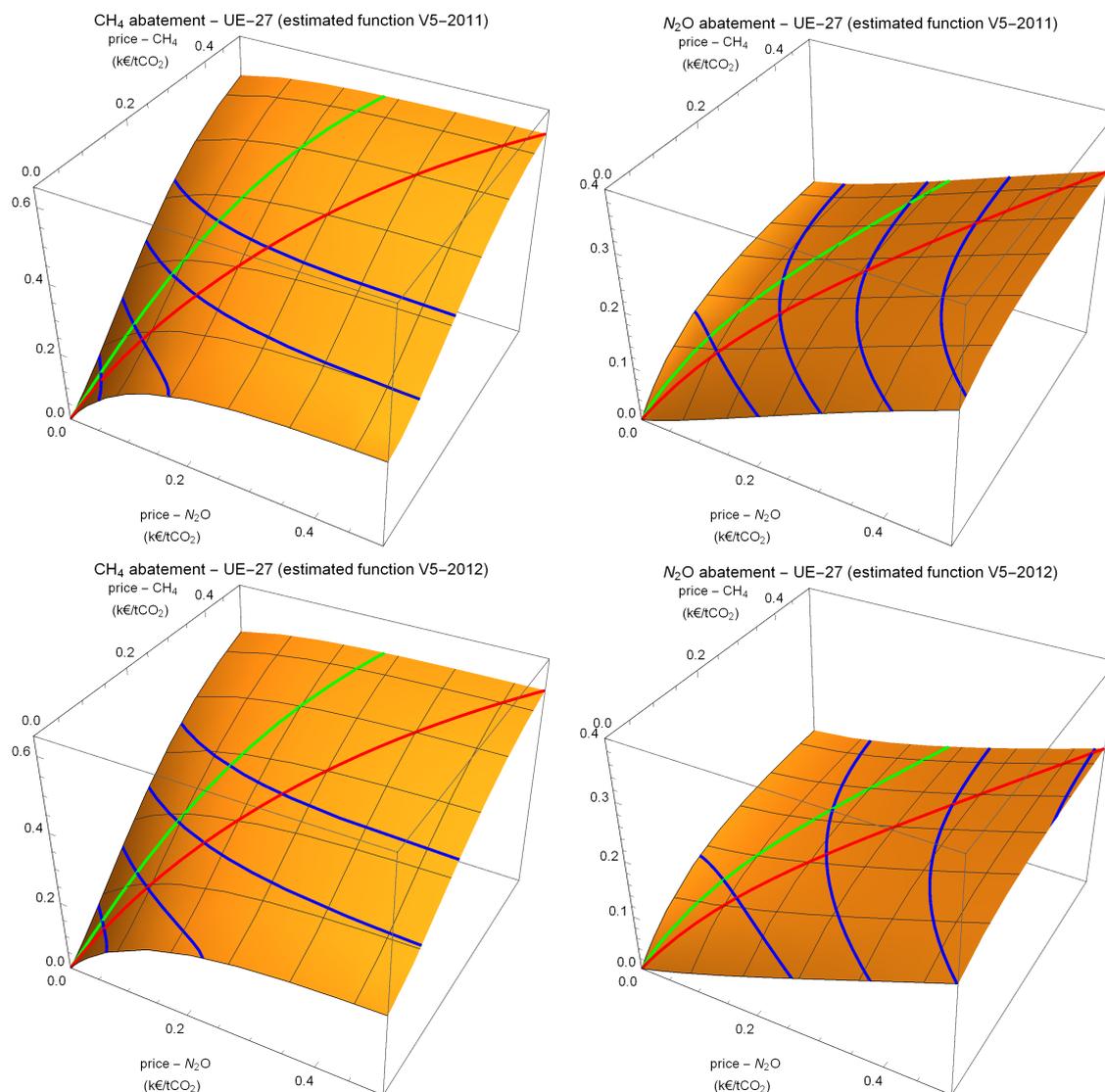


FIGURE 5.3. CH₄ and N₂O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO₂eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N₂O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).

CHAPITRE 6

Conclusion générale

Dans le processus de prise de décision au niveau européen, la coordination des politiques publiques a toujours constitué une préoccupation majeure pour les institutions européennes et pour les gouvernements des États membres. L'élaboration de toutes les politiques communautaires devrait être réalisée de manière à ce que ces politiques produisent des synergies et engendrent des bénéfices nets, si possibles des bénéfices plus élevés que ce que la somme des avantages attendus par chacune des politiques dans leur domaine propre, ou de manière à atteindre des objectifs importants à moindre coût pour l'Union Européenne dans son ensemble.

Dans cette thèse, on s'intéresse à l'Union Européenne et aux politiques européennes. Nous avons d'abord défini un cadre permettant de mieux comprendre les incidences des politiques publiques européennes sur le secteur agricole. L'agriculture est une activité économique essentielle, raison pour laquelle elle fait l'objet d'une politique publique (PAC), tout en représentant une cible des politiques environnementales. Compte tenu de la forte interdépendance existante entre le secteur agricole, le changement climatique, l'environnement et la sécurité alimentaire, a nécessité une analyse approfondie des politiques qui les ciblent, pour étudier les problématiques de cette thèse, articulées, d'une part, autour de la contribution de l'agriculture à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et d'autre part, la compatibilité entre l'augmentation de la production agricole et la diminution de l'impact de l'agriculture sur l'environnement.

Nous nous sommes appuyés sur le modèle de l'offre agricole européenne ARO-

PAj, qui a permis d'atteindre l'objectif de la thèse et d'enrichir l'analyse économique sur les questions étudiées, sous un angle quantitatif. Nous avons mis à jour tous les paramètres du GIEC sur la base desquels le modèle AROPAj fonctionne, ce qui permet au modèle de restituer une évaluation des émissions proches de celles de l'CCNUCC, sachant que les estimations de l'CCNUCC sont fondées sur un calcul des activités sources de ces émissions très différent du modèle AROPAj qui est de facture micro-économique. Une décomposition détaillée des émissions par an et par gaz (CH₄ et N₂O) renforce l'affirmation selon laquelle les émissions initiales sont bien représentées dans la fonction d'émission du modèle, tout en étant bien rapportées face aux émissions de la CCNUCC.

Cette thèse présente également la contribution d'une analyse basée sur différents niveaux d'agrégation spatiale (fermes représentatives, régions, pays, UE), ainsi que sur six années très contrastées sur les plans économiques et météorologiques, avec des variations importantes de prix et de rendements d'une année à l'autre.

* * *

La première problématique abordée dans cette thèse est la réduction des émissions de gaz à effet de serre, une priorité dans l'agenda de l'Union Européenne, qui a fixé des objectifs très ambitieux. La réalisation de ces objectifs à moindre coût suppose l'implication de tous les secteurs émetteurs, l'agriculture représentant un poids important dans les émissions sans être fortement impliquée dans l'effort de réduction. L'absence des instruments politiques pour stimuler la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole a suscité de nombreuses études visant à évaluer le potentiel d'atténuation au moyen de courbes des coûts marginaux d'abattement. Cependant, la variabilité des coûts et du potentiel d'atténuation a été très peu étudiée jusqu'à présent.

Trois aspects ont été traités autour de l'évaluation des coûts de réduction des émissions. Dans un premier temps, on a offert une évaluation actualisée et détaillée de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre provenant du secteur agricole européen, pour un large intervalle du prix carbone [0,200 €/tCO₂eq]. Ainsi, la variabilité des courbes de coûts marginaux d'abattement a été analysée par la mise en œuvre dans le modèle d'une taxe sur les émissions. Dans un deuxième temps, on a fourni une analyse détaillée sur la manière dont cette variabilité des coûts marginaux d'abattement varie à la fois dans le temps et dans l'espace. En calibrant le modèle sur six années (2007-2012), on a pu quantifier (aux niveaux européen, régional et infra-régional), la façon dont les courbes de coûts marginaux sont influencées par la variabilité des prix agricoles. Dans un troisième temps, on a estimé un ensemble de formes fonctionnelles réduites qui représentent de façon analytique au niveau régional les courbes de coûts marginaux de d'abattement.

Tout d'abord, nos résultats répondent à la question "De combien les émissions de GES agricoles peuvent être réduites pour un prix donné?", montrant qu'en moyenne, sur la période 2007-2012, l'agriculture européenne peut réduire ses émissions d'environ 10%, 20% et 30% respectivement, pour les prix des émissions de 38, 112 et 210 €/tCO₂eq. Ces résultats moyens masquent une variabilité spatiale et temporelle significative, raison pour laquelle la deuxième question à laquelle nous avons répondu était "Comment les coûts marginaux d'abattement varient-ils dans le temps et dans l'espace?". Pour un prix de 100 € par exemple, le taux de réduction à l'échelle de l'UE varie de 16 à 25% selon les années, indépendamment de la variabilité spatiale.

Trois messages clés dérivent de cette analyse : (i) l'agriculture peut offrir une atténuation substantielle des émissions de gaz à effet de serre ; (ii) le potentiel et les coûts d'atténuation varient dans l'espace géographique et (iii) le potentiel et les coûts d'atténuation varient avec le contexte économique pris en compte principalement par les prix des produits et des intrants agricoles.

* * *

La deuxième problématique étudiée dans cette thèse porte sur la compatibilité entre l'augmentation de la production agricole et la diminution de l'impact de l'agriculture sur l'environnement, deux objectifs fréquemment mis en discussion par les décideurs des politiques publiques. Dans notre analyse, ces objectifs sont définis d'une part par l'offre nette de calories liée à l'alimentation humaine et d'autre part par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Nous avons opté pour deux angles d'analyse, par une approche "primale" en donnant un prix au carbone et par une approche "duale" via un seuil minimal de calories à produire.

On montre qu'il est possible de réduire les émissions de GES et de maintenir, voire augmenter, la quantité nette de calories alimentaires en modifiant l'offre de produits de l'agriculture et de l'élevage. Lors de l'introduction d'un prix du carbone, les productions végétales et animales sont affectées de manière contrastée. En faisant varier ce prix sur un intervalle conséquent (de 0 à 200 €/tCO₂eq), les productions végétales augmentent avec le prix sur une partie de l'intervalle avant de décroître, tandis que les productions animales diminuent lorsque le prix augmente sur tout l'intervalle. Les résultats montrent que, même si l'allocation des terres varie d'une année à l'autre, les «grandes cultures» résistent dans une certaine mesure à la tarification du carbone, lorsque les fourrages et plus fortement les prairies permanentes sont considérablement affectés.

Lorsque nous demandons (via le modèle) au secteur agricole une production croissante de calories alimentaires pour l'alimentation humaine (que nous évaluons en équi-

valent blé tendre), l'objectif alimentaire peut être atteint tout en diminuant dans une certaine mesure les émissions de GES, mais cela se fait au détriment des productions animales. Parmi les autres éléments, les surfaces des prairies décroissent de façon importante, baisse compensée par une augmentation des surfaces des cultures commercialisées et des friches. On notera que pour les seuils respectifs de 300, 350 et 400 millions de tonnes de blé équivalent, le prix dual se situe dans les intervalles de variation interannuelle [20, 36], [27, 52] et [36, 94] €/t blé équivalent.

Compte tenu de la diversité des systèmes agricoles dans l'UE, nous avons exploré la distribution spatiale des surfaces cultivées avec différentes cultures, avec des variations robustes ou contrastées selon les régions et le type de production. Lorsque le prix du carbone augmente, les surfaces de cultures commerciales (céréales) se caractérisent par une résistance presque homogène sur l'ensemble du système agricole européen, contrairement aux prairies qui sont fortement touchées, en lien avec la production animale, principalement la production de viande. L'est et le centre de l'Europe sont les zones les plus affectées par ces variations. Dans le cas de l'introduction d'un objectif calorique de 435 Mt équivalent blé tendre, peu de régions réduisent leur surface en céréales, mais dans le cas des prairies, les régions diffèrent fortement dans le cas d'objectifs élevés de calories alimentaires à produire.

Ces résultats traduisent la complexité des relations, au sein des systèmes de productions, entre les assolements, l'utilisation des productions végétales en particulier vers l'alimentation animale (à la ferme ou via l'alimentation concentrée industrielle).

Étant donné que l'Union Européenne représente un acteur économique majeur sur la scène mondiale, une analyse à plus grande échelle devrait prendre en considération «l'effet de fuite», pour ne pas conduire à une délocalisation de la production en dehors de l'UE. Dans le même temps, ces politiques ne devraient pas conduire à une réduction de la production agricole de manière globale quand on parle de sécurité alimentaire, raison pour laquelle les politiques européennes devraient intégrer les effets des échanges entre les États membres de l'UE et avec le reste du monde.

* * *

Une troisième question examinée revient à la problématique des émissions de gaz à effet de serre, abordée sous un autre angle d'analyse, celle d'une approche multi-gaz, en dissociant les prix des gaz non-CO₂ émis directement par le secteur agricole (CH₄ et N₂O). Un système de prix différenciés pour les deux GES pourrait redéfinir la politique climatique, offrant une flexibilité dans la réduction des coûts d'émission et prenant en compte "l'urgence climatique" qui consisterait à se projeter sur un horizon de temps

beaucoup plus court que l'horizon pris en compte dans la mesure de l'équivalence du pouvoir radiatif des gaz, en général 100 ans.

Le modèle AROPAj est adapté à notre problématique en raison de sa capacité à comptabiliser toutes les sources d'émissions dans le secteur agricole, à effectuer des analyses de réduction des émissions. Tout d'abord, nous avons estimé les taux d'abattement des émissions de CH₄ et de N₂O à travers des formes fonctionnelles spécifiques. L'analyse de référence repose sur un horizon de 100 ans pris en compte pour évaluer les émissions ("équivalent CO₂") pour l'équivalence entre les gaz. Puis nous avons retenu un horizon de 20 ans, compte tenu de "l'urgence climatique" et la variation significative du Pouvoir radiatif global (PRG) (qui pour le méthane, rapporté au protoxyde d'azote, varie dans un rapport 3 quand on passe d'un horizon de 100 à un horizon de 20 ans).

Si on met un prix sur les émissions d'un gaz, sans taxer les émissions de l'autre gaz, nous obtenons une réduction des émissions des deux gaz. Lorsque nous appliquons une taxe sur les deux gaz, quel que soit le niveau de taxe, le taux d'abattement du méthane est généralement supérieur au taux d'abattement du protoxyde d'azote. Étant donné que la période 2007-2012 se caractérise par une large variabilité des prix agricoles et des conditions climatiques, les coûts d'abattement des émissions présentent une variabilité intéressante d'une année à l'autre. Selon les années, une taxe de 200 €/tCO₂eq appliquée aux émissions de CH₄ et de N₂O, conduit à une réduction des émissions de méthane allant de 37% à 51% et une réduction des émissions de protoxyde d'azote variant de 15% à 26%.

Un changement de PRG pour l'urgence climatique, en passant d'un système de prix équivalent à un système de prix dans un rapport 3 CH₄/N₂O, modifie considérablement le taux d'abattement obtenu pour un jeu de prix donnés. Quand on passe d'un horizon de 100 à un horizon de 20 ans, nous montrons que, compte tenu de la variation significative du Potentiel de réchauffement global, le poids du méthane deviendra plus important dans le secteur agricole, ce qui signifie que son poids augmentera pour l'ensemble de l'économie, avec un PRG multiplié par environ 3 fois.

Un système de prix différenciés permet de redéfinir et de mieux adapter la politique de régulation climatique en fonction de l'horizon de temps sur lequel on se projette, offrant une flexibilité dans la réduction des coûts d'abattement des émissions de gaz à effet de serre dans l'Union Européenne.

Liste des tableaux

1.1	Courte description des Programmes d'action pour l'environnement (PAE). <i>Source : http://www.hiz.hr/icttrain/en/trainings/01/01.html</i>	19
2.1	Les différentes catégories de données contenues dans la fiche d'exploitation du RICA. <i>Source : http://ec.europa.eu/agriculture/rica/ et Official Journal of the European Communities (2000a).</i>	82
2.2	Nombre de fermes-types et surface agricole utilisée (en milliers d'hectares) par pays associé à la version V5 d'AROPAj 2007-2012.	87
2.3	Les différents blocs du modèle AROPAj (les lettres capitales font référence au document sur le modèle accessible en ligne https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications).	87
2.4	Résumé des sources des émissions de GES prises en compte dans AROPAj. <i>Source : https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie publique/Publications</i>	108
2.5	Prix des engrais pour l'année 2009 (€/tonne). <i>Source : Calculs personnels basés sur les données DairyCo.</i>	116
2.6	Prix des engrais par cultures inclus dans AROPAj. <i>Source : Calculs personnels basés sur les données DairyCo et British Survey of Fertiliser Practice 2009.</i>	117
3.1	Estimation results for EU-aggregated relative abatement supply curve for each calibration year and the 2007-2012 average.	139
4.1	EU aggregate values (initial emission level, emissions, abatement level and rate), for each of the six years (2007-2012) and for different emission tax levels 0, 50, 100 and 200 €.	153

4.2	Quantities of calories (Mt soft wheat eq), as well as other calorie indicators over the six FADN years (2007-2012). * reference price averaging soft wheat prices in French Centre region.	160
5.1	Estimated parameter values.	176
5.2	Global Warming Potential values reported to CO ₂ , for 20 and 100-year time horizon. <i>Source : IPCC, 2007, 2013</i>	177

Table des figures

1.1	Priorités et mesures d'action pour la réalisation des objectifs à long terme du développement durable.	22
1.2	Les principaux objectifs de la Directive-cadre sur l'eau. <i>Source</i> : Official Journal of the European Communities (2000b)	27
1.3	Bref historique de la Politique Agricole Commune.	31
1.4	Réforme PAC 2014-2020 : Défis et objectifs de réforme. <i>Source</i> : <i>European Commission - DG Agriculture and Rural Development</i>	34
1.5	Composantes des paiements directs de la PAC. <i>Source</i> : European Commission (2017a)	37
1.6	La répartition annuelle des paiements directs pour chaque État membre (en milliards €, prix courants), avant et après le transfert entre les deux piliers.	39
1.7	Les dépenses agricoles de l'UE pour la période 2007-2013. <i>Source</i> : https://agriculture.gouv.fr/	45
1.8	Budget de la PAC pour le cadre financier pluriannuel 2014-2020. <i>Source</i> : <i>Fiches techniques sur l'Union Européenne - 2018 "Le financement de la PAC"</i> www.europarl.europa.eu/factsheets/fr	46
1.9	Le poids (%) de l'agriculture dans les émissions couvertes par la Décision de partage des efforts dans l'UE en 2015. Les États membres dont le PIB est supérieur à la moyenne européenne sont représentés par les barres bleues et les États membres dont le PIB est inférieur sont représentés par les barres jaunes. <i>Source</i> : European Parliament (2017)	51
1.10	La quantité d'émissions (en MtCO ₂ eq et en pourcentage %) par source en 2016, excluant LULUCF, dans l'UE28 et l'Islande. <i>Source</i> : <i>Calculs personnels, données provenant de European Environment Agency</i> (2018)	59

1.11	Aperçu des émissions de GES provenant de l'agriculture, dans l'UE28 et l'Islande (en MtCO ₂ eq) pour la période 1990-2016. <i>Source : Calculs personnels, données provenant de European Environment Agency (2018)</i>	60
1.12	Quantité des émissions de GES provenant de l'agriculture (en MtCO ₂ eq), pour chaque État Membre de l'UE28, en 1990 et 2016. <i>Source : Calculs personnels, données provenant de UNFCCC - GHG Data Interface</i>	61
1.13	Les principales sources et les parts des émissions de GES dans le secteur agricole de l'UE-28 en 2016. <i>Source : Calculs personnels, données provenant des inventaires nationaux soumis en 2018 à UNFCCC par chaque État membre</i>	62
1.14	Les impacts projetés du changement climatique dans différentes parties de l'Europe.	65
1.15	La nouvelle architecture des instruments de la PAC liés à l'environnement. <i>Source : European Commission - DG AGRI</i>	69
1.16	Caractéristiques auxquelles doivent répondre les pratiques obligatoires de la composante écologique introduite dans le premier pilon de la PAC.	71
2.1	Codes des régions RICA pour UE-27. <i>Source : FADN, European Commission.</i>	83
2.2	Les valeurs des paramètres liés aux prix des engrais et à la teneur en azote pour chaque culture AROPAj. <i>Source : Calculs personnels basés sur les données DairyCo et British Survey of Fertiliser Practice 2009.</i>	118
3.1	Quarterly real price index from 2007 to 2012 (2010=100) for some agricultural inputs and outputs in France. <i>Source : Eurostat.</i>	124
3.2	Annual change in simulated total EU emissions relative to 2007-2012 average levels.	130
3.3	Computed vs. reported average annual GHG emissions by member state over 2007-2012	131
3.4	Average annual base emissions (2007-12) by region (MtCO ₂ eq).	132
3.5	Deviations of regional base emissions relative to 2007-2012 average regional base emissions (%).	133
3.6	EU MAC curve for each calibration year (dots) and 2007-2012 average (black squares).	134
3.7	Cost-effective distribution of the 2007-2012 average regional abatement rate (in %) for three emission prices ($p = 38, 112.5, \text{ and } 205 \text{ €/tCO}_2$) leading to an EU-wide 2007-2012 average abatement rate of 10, 20, and 30%, respectively.	136

3.8	Deviation of the regional abatement rate (in %) for three emission prices ($p = 38, 112.5, \text{ and } 205 \text{ €/tCO}_2$) with respect to the respective regional 2007-2012 average abatement rate.	137
3.9	Reduced functional form : parameter estimates for each region and each calibration year.	141
4.1	Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).	154
4.2	Marketed feed vs Marketed cereals vs On-farm use of cereals (expressed in Mt), for a 0-carbon price situation and for a 200 € emission tax.	157
4.3	Areas evolution of major crops depending on CO ₂ price in the EU-27 (2007-2012 FADN years based on the V5 version of AROPAj).	158
4.4	Proportion of total straw cereals area in the EU (2007-2012) for two carbon taxes, 0 and 200 €.	159
4.5	Proportion of permanent meadows area in the EU (2007-2012) for two carbon taxes, 0 and 200 €.	159
4.6	Dual value corresponding to the net quantity of food.	161
4.7	Areas evolution of major crops depending on calorie quantity threshold.	162
4.8	The variation of the number of milk cows depending on the calorie threshold.	162
4.9	The variation of the number of beef cows depending on the calorie threshold.	162
4.10	Proportion of total straw cereals area in the EU (2007-2012) for no threshold and after the introduction of a threshold of 435 Mtsweq.	163
4.11	Proportion of permanent meadows area in the EU (2007-2012) for no threshold and after the introduction of a threshold of 435 Mtsweq.	163
5.1	CH ₄ and N ₂ O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO ₂ eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N ₂ O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 2009 FADN year-based version of the AROPAj model.	179

5.2	CH ₄ and N ₂ O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO ₂ eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N ₂ O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).	182
5.3	CH ₄ and N ₂ O abatement rates, when we simultaneously tax the 2 gases (expressed in k€/tCO ₂ eq, converted by using a GWP at 100 years). The red curve in each graph represents a reference curve, which means an equality of prices for the two gases, corresponding to the marginal abatement cost curves for each of the two gases. The green curve corresponds to the situation when the methane price is double the N ₂ O price. The blue curves are associated with the different reduction targets fixed for the two gases. Results obtained from the 6 FADN years-based version of the AROPAj model (2007-2012).	183
.1	Mécanismes utilisés dans la politique de régulation du climat, les secteurs et les gaz couverts, ainsi que la pertinence pour l'agriculture. <i>Source</i> : European Parliament (2017)	197
.2	Pays et régions couverts par le modèle AGLINK-COSIMO. <i>Source</i> : OCDE (2015)	198
.3	Produits pris en compte dans le modèle AGLINK-COSIMO. <i>Source</i> : OCDE (2015)	199

Liste des abréviations, sigles et acronymes

EU	European Union
UE	Union Européenne
EC	European Commission
DG AGRI	Directorate-General for Agriculture and Rural Development - EC
DG REGIO	Directorate-General for Regional and Urban Policy - European Commission
DG Environment	Directorate-General for Environment - European Commission
EU ETS	EU Emissions Trading System
SEQUE-UE	Système d'échange de quotas d'émission de l'UE
MAC	Marginal abatement cost
GES	Gaz à effet de serre
GES	Greenhouse gas
CO ₂	Carbon dioxide
CO ₂	Dioxyde de carbone
CH ₄	Méthane
CH ₄	Methane
N ₂ O	Protoxyde d'azote
N ₂ O	Nitrous oxide
RICA	Réseau d'Information Comptable Agricole
FADN	Farm Accountancy Data Network
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PAC	Politique Agricole Commune
CAP	Common Agricultural Policy
FEADER	Fonds Européen Agricole pour le développement rural
FEAGA	Fonds Européen Agricole de Garantie
FED	Fonds Européen de Développement
MGG	Matrix Generator Generator
MIP	Mixed integer programming
SAU	Superficie agricole utilisée
UAA	Utilised agricultural area
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
LULUCF	Land use, land-use change, and forestry

PAE	Programme d'action pour l'environnement
PDR	Programmes de développement rural
PRG	Potentiel de réchauffement global
GWP	Global Warming Potential
OTEX	Orientation technico-économique des exploitations selon la nomenclature RICA
FAO	Food and Agriculture Organization
AGLINK	Worldwide Agribusiness Linkage Program
PIB	Produit intérieur brut
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OMC	Organisation mondiale du commerce
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
AGMEMOD	Agricultural Member State Modelling
BCAE	Les bonnes conditions agricoles et environnementales
CAPRI	Common Agricultural Policy Regionalised Impact
CECA	Communauté Européenne du charbon et de l'acier
CEE	Communauté Économique Européenne
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
COSIMO	Commodity Simulation Model
ERMG	Les exigences réglementaires en matière de gestion
EURATOM	Communauté européenne de l'énergie atomique
GAMS	General Algebraic Modeling System
GATT	Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce
GLOBIOM	Global Biosphere Management Model
ICD	Instrument de Coopération au Développement
IEVP	Instrument Européen de Voisinage Partenariat
ILUC	Indirect land use change
JRC	Joint Research Centre

Annexes

MECHANISM	GHGS COVERED	SECTORS	RELEVANCE TO AGRICULTURE
Effort Sharing Decision (ESD)	All GHGs covered by Kyoto (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs and SF ₆) with targets based on CO ₂ equivalence. NF ₃ not included in ESD despite introduction under Kyoto second commitment period.	<ul style="list-style-type: none"> • Energy supply (not generation) • Industrial energy use and processes • Transport energy use (excluding international maritime shipping and aviation) • Buildings (household energy use) • Services and small industrial installations • Agriculture (non-CO₂ only) • Waste 	<p>Non-CO₂ emissions from agriculture</p> <p><i>Explicitly excludes emissions from land use, land use change and forestry (LULUCF)</i></p>
Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) Decision	Reporting and accounting on selected GHG emissions relevant to Kyoto reporting requirements - CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O.	<ul style="list-style-type: none"> • For each accounting period: emissions from afforestation, reforestation, deforestation and forest management (since 1990). Member States may also prepare and maintain accounts to reflect emissions and removals resulting from re-vegetation and wetland drainage and rewetting. Reporting only on cropland & grazing land management and preparation for accounting from 2021. • From 2021: Cropland & grazing land management accounting 	CO ₂ emissions from cropland and grazing land management.
Emissions Trading System (ETS)	<ul style="list-style-type: none"> • Carbon dioxide (CO₂) • Nitrous oxide (N₂O) • Perfluorocarbons (PFCs) 	<ul style="list-style-type: none"> • Power and heat generation • Energy-intensive industry sectors including oil refineries, steel works and production of iron, aluminium, metals, cement, lime, glass, ceramics, pulp, paper, cardboard, acids and bulk organic chemicals • Civil aviation 	<ul style="list-style-type: none"> • N₂O emissions from the production of nitric, adipic, glyoxal and glyoxalic acids used in the manufacture of fertilisers. • Bioenergy facilities with potential to use agriculturally produced biomass. • Zero carbon rating of biomass at point of collection

FIGURE 1. Mécanismes utilisés dans la politique de régulation du climat, les secteurs et les gaz couverts, ainsi que la pertinence pour l’agriculture. *Source* : [European Parliament \(2017\)](#)

Regions and countries covered by Aglink Cosimo

<i>Countries in Aglink</i>		Peru	PER
OECD countries		Philippines	PHL
Australia	AUS	Paraguay	PRY
Canada	CAN	Saudi Arabia	SAU
Switzerland	CHE	Sudan	SDN
Japan	JPN	Thailand	THA
Korea	KOR	United Republic of Tanzania	TZA
Mexico	MEX	Ukraine	UKR
Norway	NOR	Uruguay	URY
New Zealand	NZL	Viet Nam	VNM
United States	USA	South Africa	ZAF
OECD aggregates		Zambia	ZMB
European Union	EUN	Haiti	HTI
- 15 older Member States	E15		
- New Member States after 2004	NMS	<i>Cosimo aggregates</i>	
Non-OECD countries		LDC Oceania	OCL
Argentina	ARG	Other Oceania	OCE
Brazil	BRA	Other South America and Caribbean	SAC
People's Republic of China	CHN	LDC Sub-Saharan Africa	AFL
Russian Federation	RUS	Other Sub-Saharan Africa	AFS
		Other North Africa	AFN
		LDC Asia	ASL
		Other Asia Developing	ASA
		Other Asia Developed	ASD
		Other Middle East	MLE
		Other Eastern Europe	EUE
		Other Western Europe	EUW
<i>Countries in Cosimo</i>			
OECD countries			
Chile	CHL		
Israel	ISR		
Turkey	TUR		
Non-OECD countries			
Algeria	DZA		
Bangladesh	BGD		
Colombia	COL		
Egypt	EGY		
Ethiopia	ETH		
Ghana	GHA		
Indonesia	IDN		
India	IND		
Iran (Islamic Republic of)	IRN		
Kazakhstan	KAZ		
Mozambique	MOZ		
Malaysia	MYS		
Nigeria	NGA		
Pakistan	PAK		

FIGURE .2. Pays et régions couverts par le modèle AGLINK-COSIMO. *Source* : OCDE (2015)

Bibliographie

- Aaheim, H. (1997). *Many Gases and Many Measures : Choice of Targets and Selection of Measures in Climate Policy*. Technical report, CICERO Report 2, Oslo : UiO.
- Aaheim, H. (1999). Climate Policy with Multiple Sources and Sinks of Greenhouse Gases. *Environmental and Resource Economics*, 14(413–429).
- Ackrill, R. (2000a). CAP reform 1999 : a crisis in the making? *Journal of Common Market Studies*, 38(2), 343–353.
- Ackrill, R. (2000b). The European Union Budget, the Balanced Budget Rule and the Development of Common European Policies. *Journal of Public Policy*, 20(1), 1–19.
- Ackrill, R., Kay, A., & Morgan, W. (2008). The common agricultural policy and its reform : The problem of reconciling budget and trade concerns. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, (pp. 393–411).
- Adelphi (2018). *The Carbon Tax in Sweden*. Technical report, Fact sheet for : Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU).
- AGMEMOD Partnership (2008). *Impact Analysis of CAP Reform on the Main Agricultural Commodities. Report III AGMEMOD – Model Description*. Technical report, European Commission-Joint Research Centre.
- Aldy, J. & Stavins, R. (2012). The promise and problems of pricing carbon : theory and experience. *The Journal of Environment and Development*.
- Alons, G. (2017). Environmental policy integration in the EU's common agricultural

- policy : greening or greenwashing? *Journal of European Public Policy*, 24(11), 1604–1622.
- Ambec, S. & Coria, J. (2013). Prices vs quantities with multiple pollutants. *Journal of Environmental Economics and Management*, 66, 123–140.
- Anania, G. & Pupo, D. M. R. (2015). The 2013 Reform of the Common Agricultural Policy. In Swinnen, J. (ed.) *The Political Economy of the 2013 CAP Reform (Brussels : CEPS)*, 33–86.
- Ancev, T. (2011). Policy considerations for mandating agriculture in a greenhouse gas emissions trading scheme. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 33(1), 99–115.
- Aydinalp, C. & Cresser, M. (2008). The Effects of Global Climate Change on Agriculture. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 3(5), 672–676.
- Balkhausen, O., Banse, M., & Grethe, H. (2007). Modelling CAP Decoupling in the EU : A Comparison of Selected Simulation Models and Results. *Journal of Agricultural Economics*.
- Barnes, A., Sutherland, L.-A., Toma, L., Matthews, K., & Thomson, S. (2016). The effect of the Common Agricultural Policy reforms on intentions towards food production : Evidence from livestock farmers. *Land Use Policy*, 50, 548–558.
- Bateman, I. J., Brouwer, R., Davies, H., Day, B. H., Deflandre, A., Falco, S. D., Georgiou, S., Hadley, D., Hutchins, M., Jones, A. P., Kay, D., Leeks, G., Lewis, M., Lovett, A. A., Neal, C., Posen, P., Rigby, D., & Turner, R. K. (2006). Analysing the Agricultural Costs and Non-market Benefits of Implementing the Water Framework Directive. *Journal of Agricultural Economics*, 57(2), 221–237.
- Battisti, D. & Naylor, R. (2009). Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, 323, 240–244.
- Baulcombe, D., Crute, I., Dunwell, J., Gale, M., Jones, J., Pretty, J., Sutherland, W., & Toulmin, C. (2009). Reaping the benefits : Science and the sustainable intensification of global agriculture. *The Royal Society, London, UK*.
- Bäckstrand, K. & Elgström, O. (2013). The EU's role in climate change negotiations : from leader to 'leadiator'. *Journal of European Public Policy*, 20(10), 1369–1386.

- Beddington, J., Asaduzzaman, M., Clark, M., Fernández, A., Guillou, M., Jahn, M., Erda, L., Mamo, T., Van Bo, N., Nobre, C., Scholes, R., Sharma, R., & Wakhungu, J. (2012). *Achieving food security in the face of climate change : Final report from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change*. Technical report, CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark.
- Bell, S., McGillivray, D., & Pedersen, O. (2013). *Environmental Law. 8th edn*, Oxford University Press.
- Benson, D. & Jordan, A. (2015). Environmental Policy. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences, Second Edition*, 7, 778–783.
- Bernard, A., Vielle, M., & Viguier, L. (2006). Burden Sharing Within a Multi-Gas Strategy. *The Energy Journal*, Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, 289–304.
- Berners-Lee, M., Kennelly, C., Watson, R., & Hewitt, C. N. (2018). Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. *Elem Sci Anth*, 6(52).
- Bodiguel, L. (2014). Lutter contre le changement climatique : le nouveau leitmotiv de la politique agricole commune. *Revue de l'Union Européenne, Dalloz*.
- Bowyer, C. & Kretschmer, B. (2011). *Anticipated Indirect Land Use Change Associated with Expanded Use of Biofuels and Bioliquids in the EU - An Analysis of the National Renewable Energy Action Plans (updated version)*. Technical report, Institute for European Environmental Policy, London.
- Britz, W., Verburg, P., & Leip, A. (2011). Modelling of land cover and agricultural change in Europe : combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 142, 40–50.
- Britz, W. & Witzke, H.-P. (2008). *CAPRI Model Documentation 2008 : Version 2 p*. Technical report, Institute for Food and Resource Economics, University of Bonn, Bonn, http://www.capri-model.org/docs/capri_documentation.pdf.
- Britz, W. & Witzke, H.-P. (2014). *CAPRI model documentation 2014*. Technical report, University of Bonn.

- Buller, H. (2002). *Integrating European Union environmental and agricultural policy*, chapter Part III, (pp. 103–126). London : Earthscan Publications.
- Bureau, J.-C., Tangermann, S., Matthews, A., Viaggi, D., Crombez, C., Knops, L., & Swinnen, J. (2012). The Common Agricultural Policy after 2013. *Intereconomics*, 47(6), 316–342.
- Burney, J., Davis, S., & Lobell, D. (2010). Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) Early Edition*.
- Burrell, A. (2009). The CAP : Looking Back, Looking Ahead. *Journal of European Integration*, 31(3), 271–289.
- Chakir, R., De Cara, S., & Vermont, B. (2017). Price-induced changes in greenhouse gas emissions from agriculture, forestry, and other land use : A spatial panel econometric analysis. *Revue Economique*, 68(3), 471–490.
- Chantreuil, F., Hanrahan, K. F., & van Leeuwen, M., Eds. (2012). *The Future of EU Agricultural Markets by AGMEMOD*. Springer Science+Business Media B.V. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Chantreuil, F., Levert, F., & Hanrahan, K. (2005). The Luxembourg Agreement Reform of the CAP : an Analysis Using the AG-MEMOD Composite Model. *Contribution appeared in Arfini, F. (Ed.) (2005) "Modelling Agricultural Policies : State of the Art and New Challenges", proceedings of the 89th EAAE Seminar*.
- Ciaian, P., Kancs, A., & Swinnen, J. (2008). Static and Dynamic Distributional Effects of Decoupled Payments : Single Farm Payments in the European Union. *LICOS Discussion Paper Series 207/2008*. Leuven : Katholieke Universiteit Leuven.
- CITEPA (2018). *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Format UNFCCC-CRF, CITEPA - Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Paris, France.
- Coleman, W., Grace, S., & Michael, A. (1996). Paradigm Shifts and Policy Networks : Cumulative Change in Agriculture. *Journal of Public Policy*, 16(3), 273–301.

- Commission des Communautés Européennes (2000). *Livre blanc sur la securite alimentaire*. Technical report, Bruxelles COM (1999) 719 final.
- Commission Européenne (2018). *Utiliser les réserves alimentaires pour améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans les pays en développement*. Technical report, Rapport de synthèse Bruxelles : Direction générale de la coopération internationale et du développement.
- Commission of the European Communities (2001). *Green paper on integrated product policy*. Technical report, COM(2001) 68 final.
- Connelly, J., Smith, G., Benson, D., & Saunders, C. (2012). *Politics and the Environment*. Routledge, London.
- Cortignani, R. & Dono, G. (2015). Simulation of the impact of greening measures in an agricultural area of the southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 525–533.
- Cortignani, R., Severini, S., & Dono, G. (2017). Complying with greening practices in the new CAP direct payments : an application on Italian specialized arable farms. *Land Use Policy*, 61, 265–275.
- Council of Europe (1993). *Convention sur la responsabilité civile des dommages résultant d'activités dangereuses pour l'environnement*. Technical report, Série des traités européens - n° 150.
- Cunha, A. & Swinbank, A. (2011). *An Inside View of the CAP Reform Process : Explaining the MacSharry, Agenda 2000, and Fischler Reforms*. Oxford : Oxford University Press.
- Darwin, R. (2001). Climate change and food security. *United States Department of Agriculture, Agriculture Information Bulletin Number 765-8*.
- Daugbjerg, C. (2009). Sequencing in public policy : the evolution of the CAP over a decade. *Journal of European Public Policy*, 16(3), 395–411.
- Daugbjerg, C. & Swinbank, A. (2009). Ideational Change in the WTO and its Impacts on EU Agricultural Policy Institutions and the CAP. *Journal of European Integration*, 31(3), 311–327.

- Déclaration de Stockholm (1972). Déclaration de Stockholm. In *Conférence des Nations Unies sur l'environnement*.
- De Cara, S., Henry, L., & Jayet, P.-A. (2018). Optimal coverage of an emission tax in the presence of monitoring, reporting, and verification costs. *Journal of Environmental Economics and Management*, 89, 71–93.
- De Cara, S., Galko, E., & Jayet, P.-A. (2008). The Global Warming Potential paradox : Implications for the design of climate policy. In R. Guesnerie & H. Tulkens (Eds.), *The design of climate policy*, MIT-CESifo Seminar Series (pp. 359–385). Cambridge, MA : MIT Press.
- De Cara, S., Houzé, M., & Jayet, P.-A. (2005). Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU : A spatial assessment of sources and abatement costs. *Environmental and Resource Economics*, 32(4), 551–583.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2011). Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost effectiveness, and the EU non-ETS burden sharing agreement. *Ecological Economics*, 70, 1680–1690.
- Deering, K. (2014). Stepping up to the challenge. *CARE*.
- Dessus, B., Laponche, B., & Treut, H. L. (2008). Effet de serre, n'oublions pas le methane. *La Recherche, Mensuel* 417.
- Dessus, B., Laponche, B., Treut, H. L., & Laplace, P. S. (2017). Le methane, un gaz qui pese lourd sur le climat. *La Recherche, mensuel* 529.
- Devereux, S. & Edwards, J. (2004). Climate change and food security. *IDS Bulletin*.
- Domínguez, I. & Fellmann, T. (2015). The need for comprehensive climate change mitigation policies in european agriculture. *EuroChoices*.
- Ellerman, A., Marcantonini, C., & Zaklan, A. (2016). The European Union Emissions Trading System : Ten Years and Counting. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10, 89–107.
- Eory, V., Pellerin, S., Carmona-Garcia, G., Lehtonen, H., Licite, I., Mattila, H., Lund-Sørensen, T., Muldowney, J., Popluga, D., Strandmark, L., & Schulte, R. (2018a). Mar-

- ginal abatement cost curves for agricultural climate policy : State-of-the art, lessons learnt and future potential. *Journal of Cleaner Production*, 182, 705–716.
- Eory, V., Topp, C. F. E., Butler, A., & Moran, D. (2018b). Addressing uncertainty in efficient mitigation of agricultural greenhouse gas emissions. *Journal of Agricultural Economics*, 69(3), 627–645.
- EPA (2013). *Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases : 2010-2030*. Technical report, United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs (6207J).
- Erjavec, E., Chantreuil, F., Hanrahan, K., Donnellan, T., Salputra, G., Kozar, M., & van Leeuwen, M. (2011). Policy assessment of an EU wide flat area CAP payments system. *Economic Modelling*, 28(4), 1550–1558.
- Erjavec, K. & Erjavec, E. (2015). Greening the CAP – Just a fashionable justification? A discourse analysis of the 2014–2020 CAP reform documents. *Food Policy*, 51, 53–62.
- European Commission (2007). *Programme thématique pour la sécurité alimentaire document de stratégie thématique et programme indicatif pluriannuel 2007-2010*. Technical report, Bruxelles C/2007/1924.
- European Commission (2008). *Fact Sheet Climate Change : The challenges for agriculture*. Technical report, European Commission Agriculture and Rural Development.
- European Commission (2009). *EU 2009 Report on Policy Coherence for Development*. Technical report, European Commission.
- European Commission (2010a). *The CAP towards 2020 : Meeting the Food, Natural Resources and Territorial Challenges of the Future*. Technical report, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions’, COM(2010) 672 final, Brussels.
- European Commission (2010b). *The EU Nitrates Directive*. Technical report, European Union.
- European Commission (2011a). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Com-*

mittee of the Regions : A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, COM(2011) 112 final. Technical report, European Commission.

European Commission (2011b). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing rules for direct payments to farmers under support schemes within the framework of the common agricultural policy.* Technical report, Brussels, 12.10.2011 COM(2011) 625 final 2011/0280 (COD).

European Commission (2011c). *Roadmap to a resource efficient Europe.* Technical report, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2011) 571, 20.9.2011a, European Commission, Brussels.

European Commission (2012). *Accounting for land use, land use change and forestry (LULUCF) in the Union's climate change commitments.* Technical report, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2012) 94 final, 12.3.2012a, European Commission, Brussels.

European Commission (2013a). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS An EU Strategy on adaptation to climate change, Brussels, 16.4.2013 COM(2013) 216 final.* Technical report, European Commission.

European Commission (2013b). *GREEN PAPER A 2030 framework for climate and energy policies.* Technical report, COM(2013) 169 final.

European Commission (2013c). *Multiannual financial framework 2014-2020 and the CAP reform.* Technical report, Brussels : European Commission.

European Commission (2013d). *Overview of CAP Reform 2014-2020.* Technical report, Agricultural Policy Perspectives Brief No 5.

European Commission (2014a). *Combaterea schimbărilor climatice.* Technical report, European Commission.

European Commission (2014b). *EU cereal farms report 2013 based on FADN data.* Technical report, European Commission.

European Commission (2014c). *General Union environment action programme to 2020 Living well, within the limits of our planet*. Technical report, Directorate-General for Environment (European Commission).

European Commission (2015). *EU agriculture spending focused on results*. Technical report, European Commission.

European Commission (2016a). *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Review of greening after one year*. Technical report, European Commission Brussels, 22.6.2016 SWD(2016) 218 final.

European Commission (2016b). *The Road from Paris*. Technical report, Brussels, COM(2016)110 final.

European Commission (2017a). *CAP explained : Direct Payments for farmers 2015-2020*. Technical report, European Commission.

European Commission (2017b). *COM(2017) 713 final COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The Future of Food and Farming*. Technical report, European Commission.

European Commission (2018). *A clean planet for all. A european long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral economy. In-depth analysis in support of the commission communication COM(2018)773*. Report, European Commission, Brussels.

European Commission (2018a). *FARM ECONOMY FOCUS - Information based on 2016 FADN data – PRELIMINARY results*. Technical report, European Commission.

European Commission (2018b). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing rules on support for strategic plans to be drawn up by Member States under the Common agricultural policy (CAP Strategic Plans) and financed by the European Agricultural Guarantee Fund (EAGF) and by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Regulation (EU) No 1305/2013 of the European Parliament and of the Council and Regulation (EU) No 1307/2013 of the European Parliament and of the Council*. Technical report, Brussels, 1.6.2018, COM(2018) 392 final, 2018/0216 (COD).

- European Commission-Eurostat (2011). *Analysis of methodologies for calculating greenhouse gas and ammonia emissions and nutrient balances*. Technical report, Eurostat Methodologies and Working papers.
- European Court of Auditors (2014). *Integration of EU water policy objectives with the CAP : a partial success*. Technical report, Luxembourg : Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency (2010). *The European Environment State and Outlook 2010 : Assessment of global megatrends*. Technical report, Copenhagen, European Environment Agency. The European Environment State and Outlook SOER.
- European Environment Agency (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report*. Technical report, EEA Report No12/2012, European Environment Agency, Copenhagen.
- European Environment Agency (2018). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2016 and inventory report 2018. Submission to the UNFCCC Secretariat. EEA Report/2018*. Technical report, EU EEA, Copenhagen, Denmark.
- European Parliament (2017). *Research for Agri Committee - The consequences of climate change for EU agriculture. Follow-up to the COP21 - UN Paris Climate Change Conference*. Technical report, European Parliament.
- European Parliament (2018a). *Fiches techniques sur l'Union européenne - 2018 "Le financement de la PAC"* www.europarl.europa.eu/factsheets/fr. Technical report, European Parliament.
- European Parliament (2018b). *Fiches techniques sur l'Union européenne - 2018 "Les instruments de la PAC et leurs réformes"*. *European Parliament*.
- European Parliament (2019a). *Fiches techniques sur l'Union européenne - 2019 "Énergies renouvelables"*. Technical report, European Parliament.
- European Parliament (2019b). *Fiches techniques sur l'Union européenne - 2019 Premier pilier de la Politique Agricole Commune (PAC) : II - Paiements directs aux agriculteurs*. Technical report, European Parliament.
- European Parliament (2019c). *Fiches techniques sur l'Union européenne - 2019 Second*

- pilier de la PAC : La politique de développement rural*. Technical report, European Parliament.
- European Parliament (2019d). *Fiches techniques sur l'Union européenne - Le Fonds de cohésion*. Technical report, European Parliament.
- Ewers, R., Scharlemann, J., Balmford, A., & Green, R. (2009). Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology*, 15, 1716 – 1726.
- FAO (2003a). *Les bilans alimentaires*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- FAO (2003b). *Trade reforms and food security : conceptualizing the linkages*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2009). *Food Security and Agricultural Mitigation in Developing Countries : Options for Capturing Synergies*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2013). *Facing the challenges of climate change and food security*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernandez, F., Blanco, M., Ceglar, A., M Barek, R., Ciaian, P., Srivastava, A., Lecerf, R., Ramos, F., Niemeyer, S., & Van-Doorslaer, B. (2013). *Still a challenge - interaction of biophysical and economic models for crop production and market analysis*. Technical report, Working Paper n° 3, ULYSSES project, EU 7th Framework Programme, Project 312182 KBBE.2012.1.4-05.
- Fezzi, C., Hutchins, M., Rigby, D., Bateman, I. J., Posen, P., & Hadley, D. (2010). Integrated assessment of water framework directive nitrate reduction measures. *Agricultural Economics*, 41, 123–134.
- Foley et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337–342.
- Foresight (2011). *The Future of Food and Farming : Challenges and choices for global sustainability*. Technical report, Final Project Report. The Government Office for Science, London.
- Frances, G. E., Quevauviller, P., Gonzales, E. S. M., & Amelin, E. V. (2017). Climate

- change policy and water resources in the EU and Spain. A closer look into the Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy*, 69, 1–12.
- Frank, S., Beach, R., Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Mosnier, A., Hasegawa, T., Creason, J., Ragnauth, S., & Obersteiner, M. (2018a). Structural change as a key component for agricultural non-CO₂ mitigation efforts. *Nature communications*, 9(1).
- Frank, S., Havlik, P., Stehfest, E., van Meijl, H., Witzke, P., Perez-Dominguez, I., van Dijk, M., Doelman, J. C., Fellmann, T., Koopman, J. F. L., Tabeau, A., & Valin, H. (2018b). Agricultural non-CO₂ emission reduction potential in the context of the 1.5 °c target. *Nature Climate Change*.
- Frank, S., Havlík, P., Soussana, J., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., Kleinwechter, U., Fricko, O., Gusti, M., Herrero, M., Smith, P., Hasegawa, T., Kraxner, F., & Obersteiner, M. (2017). Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environ. Res. Lett.* 12 105004.
- Galko, E. & Jayet, P.-A. (2011). Economic and Environmental Effects of Decoupled Agricultural Support in the EU. *Agricultural Economics*, 42, 605–618.
- Garnache, C., Mérel, P. R., Lee, J., & Six, J. (2017). The social costs of second-best policies : Evidence from agricultural GHG mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 82, 39–73.
- Garnett, T. (2011). Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy*, 36.
- Garzon, I. (2006). *Reforming the common agricultural policy : history of a paradigm change*. Basingstoke : Palgrave Macmillan.
- Gocht, A., Ciaian, P., Bielza, M., Terres, J. M., Roder, N., Himics, M., & Salputra, G. (2017). EU-wide economic and environmental impacts of CAP greening with high spatial and farm-type detail. *Journal of Agricultural Economics*, 68(3), 651–681.
- Godfray, H. C. J. (2014). The challenge of feeding 9–10 billion people equitably and sustainably. *The Journal of Agricultural Science*, 152, 2–8.
- Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., & Wiltshire, A. (2010).

Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*.

Gouldson, A., Lopez-Gunn, E., Alstine, J. V., Rees, Y., Davies, M., & Krishnarayan, V. (2008). New alternative and complementary environmental policy instruments and the implementation of the Water Framework Directive. *European Environment*, 18(6), 359–370.

Grant, W. (1997). *The Common Agricultural Policy*. Palgrave, London.

Grant, W. (2010). Policy Instruments in the Common Agricultural Policy. *West European Politics*, 33(1), 22–38.

Greer, A. (2013). The Common Agricultural Policy and the EU budget : stasis or change ? *European Journal of Government and Economics*, 2(2).

Gregory, P., Ingram, J., & Brklacich, M. (2005). Climate change and food security. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*.

Grinsven, H., Tiktak, A., & Rougoor, C. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 78, 69–84.

Grosjean, G., Fuss, S., Koch, N., Bodirsky, B. L., Cara, S. D., & Acworth, W. (2018). Options to overcome the barriers to pricing European agricultural emissions. *Climate Policy*, 18(2), 151–169.

Grosjean, G., Fuss, S., Koch, N., Bodirsky, B. L., De Cara, S., & Acworth, W. (2016). Options to overcome the barriers to pricing European agricultural emissions. *Climate Policy*, 18(2), 151–169.

Gupta, J. & Grubb, M. (2000). Climate Change and European Leadership : A Sustainable Role for Europe? *Dordrecht : Kluwer Academic*.

Hart, K., Allen, B., Lindner, M., Keenleyside, C., Burgess, P., Eggers, J., & Buckwell, A. (2013). *Land as an environmental resource*. Technical report, Report prepared for DG Environment, Contract No ENV.B.1/ETU/2011/0029, Institute for European Environmental Policy, London.

- Havlik, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M., Mosnier, A., Thornton, P., Böttcher, H., Conant, R., Frank, S., Fritz, S., Fuss, S., Kraxner, F., & Notenbaert, A. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions. *PNAS*, 111(10), 3709–3714.
- Havlík, P., Valin, H., Mosnier, A., Obersteiner, M., Baker, J., Herrero, M., Rufino, M., & Schmid, E. (2012). Crop productivity and the global livestock sector : implications for land use change and greenhouse gas emissions. *Am. J. Agric. Econ.*
- Henke, R., Benos, T., Filippis, F., Giua, M., Pierangeli, F., & Andrea, P. (2018). The new Common Agricultural Policy How do Member States respond to flexibility. *Journal of Common Market Studies*.
- Henry, S. (2018). Mitigation gambles : uncertainty, urgency and the last gamble possible. *Phil. Trans. R. Soc. A 376*, 20170105.
- Hey, C. (2005). EU Environmental Policies : A short history of the policy strategies. *Stefan Scheuer EU Environmental Policy Handbook A Critical Analysis of EU Environmental Legislation Making it accessible to environmentalists and decision makers, EUROPEAN ENVIRONMENTAL BUREAU (EEB)*.
- Hjerp, P., Volkery, A., Lückge, H., Medhurst, J., Hart, K., Medarova-Bergstrom, K., Tröltzsch, J., McGuinn, J., Skinner, I., Desbarats, J., Slater, C., Bartel, A., Frelih-Larsen, A., & ten Brink, P. (2012). *Methodologies for climate proofing investments and measures under Cohesion and regional policy and the Common Agricultural Policy*. Technical report, A report for DG Climate. Institute for European Environmental Policy, London.
- HLPE (2012). *Food security and climate change. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security*. Technical report, High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition (HLPE).
- House of Commons (2011). *The Common Agricultural Policy after 2013*. Technical report, House of Commons Environment, Food and Rural Affairs Committee.
- Huyghe, C., De Vlieghe, A., van Gils, B., & Peeters, A. (2014). *Grasslands and herbivore production in Europe and effects of common policies*. Synthèses.
- Hyman, R. C., Reilly, J. M., Babiker, M. H., Masin, A. D., & Jacoby, H. D. (2003). Mo-

deling non-CO2 Greenhouse Gas Abatement. *Environmental Modeling & Assessment*, 8.

INRA (2010). *Alimentation des bovins, ovins, caprins*. Paris, France : Quae.

IPCC (2001). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC (2007). *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ Press, Cambridge, UK.

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

IPCC (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical report, [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPES-FOOD (2016). *Towards a common food policy for the EU : IPES-FOOD launches three year reflection*. Technical report, Panel international d'experts sur les systèmes alimentaires durables (IPES-FOOD).

Jensen, H., Domínguez, I. P., Fellmann, T., Lirette, P., Hristov, J., & Philippidis, G. (2019). Economic impacts of a low carbon economy on global agriculture : The bumpy road to Paris. *Sustainability*, 11(8), 2349.

Jensen, H., Fellmann, T., Domínguez, I. P., Charlebois, P., & Philippidis, G. (2018). Economic Impacts on Agriculture of a Low Carbon Economy by 2030 : An Analysis with

the Aglink-Cosimo model. *Paper prepared for presentation at the 21st Annual Conference on Global Economic Analysis : "Framing the future through the Sustainable Development Goals" Cartagena, Colombia.*

Joint Research Centre (2015). *Documentation of the European Commission's EU module of the Aglink-Cosimo modelling system.* Technical report, European Commission Joint Research Centre.

Journal officiel de l'Union européenne (2004). *DIRECTIVE 2004/35/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux.* Technical report, Journal officiel de l'Union européenne.

Journal officiel de l'Union européenne (2009). *RÈGLEMENT (CE) no 73/2009 DU CONSEIL du 19 janvier 2009 établissant des règles communes pour les régimes de soutien direct en faveur des agriculteurs dans le cadre de la politique agricole commune et établissant certains régimes de soutien en faveur des agriculteurs, modifiant les règlements (CE) no 1290/2005, (CE) no 247/2006 et (CE) no 378/2007 et abrogeant le règlement (CE) no 1782/2003.* Technical report, Journal officiel de l'Union européenne.

Journal officiel des Communautés européennes (1987). *Acte Unique Européen.* Technical report, Journal officiel des Communautés européennes.

Journal officiel des Communautés européennes (1996). *DIRECTIVE 96/61 /CE DU CONSEIL du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution.* Technical report, Journal officiel des Communautés européennes.

Kandlikar, M. (1996). Indices for comparing greenhouse gas emissions : integrating science and economics. *Energy Economics*, 18, 265–281.

Kelemen, R. D. (2010). Globalizing European Union environmental policy. *Journal of European Public Policy*, 17(3), 335–349.

Kennet, L. & Nedergaard, P. (2009). The Logic of Policy Development : Lessons Learned from Reform and Routine within the CAP 1980–2003. *Journal of European Integration*, 31(3), 291–309.

Kesicki, F. & Strachan, N. (2011). Marginal abatement cost (MAC) curves : confronting

- theory and practice. *Environmental Science & Policy*, 14, 1195–1204.
- Kossoy, A., Peszko, G., Oppermann, K., Prytz, N., Gilbert, A., Klein, N., Lam, L., & Wong, L. (2015). *Carbon pricing watch 2015 : an advance brief from the state and trends of carbon pricing 2015 report, to be released late 2015. State and Trends of Carbon Pricing*. Technical report, Washington, D.C. : World Bank Group.
- Kriegler, E., Luderer, G., Bauer, N., Baumstark, L., Fujimori, S., Popp, A., Rogelj, J., Strefler, J., & van Vuuren, D. P. (2018). Pathways limiting warming to 1.5°C : a tale of turning around in no time? *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 20160457.
- Kuik, O., Brander, L., & Tol, R. (2009). Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions : A meta-analysis. *Energy Policy*, 37, 1395–1403.
- La Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'ONU (1987). *Rapport Brundtland-Our Common Future*. Technical report, La Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement de l'ONU.
- Lascoumes, L. & Le Gales, P. (2004). Conclusion : De L'Innovation Instrumentale a la Recomposition de l'Etat. in L. Lascoumes and P. Le Gales (eds.), *Gouverner par les instruments*. Paris : Sciences Po.
- Leclère, D., Jayet, P.-A., & de Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level Autonomous Adaptation of European Agricultural Supply to Climate Change. *Ecological Economics*, 87, 1–15.
- Leip, A. (2010). Quantitative quality assessment of the greenhouse gas inventory for agriculture in Europe. *Climatic Change*, 103, 245–261.
- Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, P., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S., & Biala, K. (2010). *Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS)*. Technical report, European Commission, Joint Research Centre.
- Liefferink, D., Wiering, M., & Uitenboogaart, Y. (2011). The EU Water Framework Directive : A multi-dimensional analysis of implementation and domestic impact. *Land use policy*, 28, 712–722.
- Louhichi, K., Ciaian, P., Espinosa, M., Perni, A., & y Paloma, S. G. (2017). Economic

- impacts of CAP greening : application of an EU-wide individual farm model for CAP analysis (IFM-CAP). *European Review of Agricultural Economics*, 45, 205–238.
- Lowe, P. & Baldock, D. (2000). *Integration of environmental objectives into agricultural policy making*, (pp. 31–52). CABI Publishing.
- Ludi, E. (2009). Climate change, water and food security. *Overseas Development Institute*.
- Manne, A. & Richels, R. (2010). A Multi-Gas Approach to Climate Policy - with and without GWPs. *FEEM Working Paper No. 44.2000*.
- Manners, I. (2002). Normative power Europe : a contradiction in terms? *Journal of Common Market Studies*, 40(2), 235–258.
- Maracchi, G., Sirotenko, O., & Bindi, M. (2005). Impact of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions : Europe in J Salinger, M V K Sivakumar, & R P Motha (eds) *Increasing Climate Variability and Change*. Springer, (pp. 117–135).
- Martin, G., C, P., Gosalbez, G., Vallejo, A., & Esteller, J. (2015). Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy. *Land Use Policy*, 48, 515–524.
- McCarl, B. A. & Schneider, U. A. (2001). Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry. *Science*, 294, 2481–2482.
- Meijl, H., Jansson, T., Banse, M., & Woltjer, G. (2019). The Impact of Modulation : Modelling the First and Second Pillar CAP Policies.
- Meijl, v., Havlik, P., Lotze-Campen, H., Stehfest, E., Witzke, P., Dominguez, I. P., Bo-dirsky, B., Dijk, v., Doelman, J., Fellmann, T., Humpenoder, F., Koopman, J., Muller, C., Popp, A., Tabeau, A., Valin, H., & van Zeist, W. (2018). Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. *Environ. Res. Lett.*, 13(064021).
- Meunier, G. (2017). Prices versus quantities in the presence of a second, unpriced, externality. *Journal of Public Economic Theory*, (pp. 1–22).

- Michaelis, P. (1999). Sustainable greenhouse policies : the role of non-CO₂ gases. *Structural Change and Economic Dynamics*, 10, 239–260.
- Mitchell, D., Allen, M., Hall, J., Muller, B., Rajamani, L., & Quere, C. (2018). The myriad challenges of the Paris Agreement. *Phil. Trans. R. Soc. A* 376 : 20180066.
- Monteny, G. J. (2001). The EU Nitrates Directive : A European Approach to Combat Water Pollution from Agriculture. *The Scientific World*, (pp. 927–935).
- Moran, D., Macleod, M., Wall, E., Eory, V., McVittie, A., Barnes, A., Rees, R., Topp, C., & Moxey, A. (2010). Marginal abatement cost curves for UK agricultural greenhouse gas emissions. *Journal of Agricultural Economics*, 62, 93–118.
- Nazzaro, C. & Marotta, G. (2016). The Common Agricultural Policy 2014–2020 : scenarios for the European agricultural and rural systems. *Agricultural and Food Economics*, 4(1), 16.
- Neuenfeldt, S. & Gocht, A. (2014). *A Handbook on the use of FADN Database in Programming Models*. Technical report, Thünen Working Paper 35.
- Oberthür, S. & Roche Kelly, C. (2008). EU leadership in International Climate Policy : Achievements and Challenges. *International Spectator*, 43(3), 35–50.
- OCDE (2004). *Analysis of the 2003 CAP Reform*. Technical report, Organisation for Economic Cooperation and Development.
- OCDE (2015). *Aglink-Cosimo Model Documentation. A partial equilibrium model of world agricultural markets*. Technical report, OCDE.
- OCDE (2015). *A review of the literature on the cost-effectiveness of greenhouse gas mitigation measure for agriculture*. Technical report, OCDE - Joint Working Party on Agriculture and the Environment.
- OECD (2007). *Documentation of the AGLINK-COSIMO Model*. Technical report, Working Party on Agricultural Policies and Markets, AGR/CA/APM(2006)16/FINAL. Directorate for Food, Agriculture and Fisheries, Committee for Agriculture, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- OECD (2010). *Linkages between Agricultural Policies and Environmental Effects : Using*

the OECD Stylised Agri-environmental Policy Impact Model. Technical report, OECD Publishing.

OECD (2015). *Agriculture and Climate Change*. Technical report, OECD.

OECD (2018). *Recommandation du Conseil sur les principes directeurs relatifs aux aspects économiques des politiques de l'environnement sur le plan international*. Technical report, OECD/LEGAL/0102.

OECD & WBG (2015). *The FASTER Principles for Successful Carbon Pricing : An approach based on initial experience*. Technical report, Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) and World Bank Group (WBG).

Official Journal of the European Communities (1991). *COUNCIL DIRECTIVE of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91 / 676 /EEC)*. Technical report, Official Journal of the European Communities.

Official Journal of the European Communities (2000a). *COMMISSION REGULATION (EC) No 1122/2000 of 22 May 2000 amending Regulation (EEC) No 2237/77 on the form of farm return to be used for the purpose of determining incomes of agricultural holdings*. Technical report, Official Journal of the European Communities.

Official Journal of the European Communities (2000b). *DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Technical report, Official Journal of the European Communities.

Official Journal of the European Communities (2002). *DECISION No 466/2002/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 1 March 2002 laying down a Community action programme promoting non-governmental organisations primarily active in the field of environmental protection*. Technical report, Official Journal of the European Communities.

Official Journal of the European Union (1965). *REGULATION No 79/65/EEC OF THE COUNCIL of 15 June 1965 setting up a network for the collection of accountancy data on the incomes and business operation of agricultural holdings in the European Economic Community*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2009a). *COUNCIL REGULATION (EC) No 1217/2009 of 30 November 2009 setting up a network for the collection of accountancy data on the incomes and business operation of agricultural holdings in the European Community*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2009b). *DECISION No 406/2009/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the effort of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitments up to 2020*. Technical report, DECISIONS ADOPTED JOINTLY BY THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL.

Official Journal of the European Union (2009c). *DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2011). *EU agriculture and climate change European Parliament resolution of 5 May 2010 on EU agriculture and climate change (2009/2157(INI)) (2011/C 81 E/06)*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2012). *Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2013a). *DECISION No 1386/2013/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2013b). *REGULATION (EU) No 1307/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 december 2013 establishing rules for direct payments to farmers under support schemes within the framework of the common agricultural policy and repealing Council Regulation (EC) No 637/2008 and Council Regulation (EC) No 73/2009*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2013c). *REGULATION (EU) No 1318/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 22 October 2013 amending Council Regulation (EC) No 1217/2009 setting up a network for the collection of accountancy data on the incomes and business operation of agricultural holdings in the European Community*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2015). *COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2015/141 of 29 January 2015 amending Implementing Regulation (EU) No 367/2014 setting the net balance available for EAGF expenditure*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Official Journal of the European Union (2018). *REGULATION (EU) 2018/841 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU*. Technical report, Official Journal of the European Union.

Olesen, J. & Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16, 239–262.

O'Mara, F. (2012). The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*, 110, 1263–1270.

Parker, C. F., Karlsson, C., & Hjerpe, M. (2017). Assessing the European Union's global climate change leadership : from Copenhagen to the Paris Agreement. *Journal of European Integration*, 39(2), 239–252.

Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., Doreau, M., Dupraz, P., Faverdin, P., Garcia-Launay, F., Hassouna, M., Hénault, C., Jeuffroy, M.-H., Klumpp, K., Metay, A., Moran, D., Recous, S., Samson, E., Savini, I., Pardon, L., & Chemineau, P. (2017). Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of french agriculture. *Environmental Science & Policy*, 77, 130–139.

Perez Dominguez, I., Fellmann, T., Weiss, F., Witzke, H. P., Arreiro, H. J., Himics, M., Jansson, T., Salputra, G., & Leip, A. (2016). *An economic assessment of GHG mitigation policy options for EU agriculture*. Report JRC101396, European Commission, Joint Research Center, Sevilla, Spain.

- Prieur, M. (1991). *Droit de l'Environnement. Edition Dalloz, Paris.*
- Ragnauth, S., Creason, J., Alsalam, J., Ohrel, S., Petrusa, J., & Beach, R. (2015). Global mitigation of non-CO2 greenhouse gases : marginal abatement costs curves and abatement potential through 2030. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12, 155–168.
- Reisinger, A., Havlik, P., Riahi, K., Vliet, O., Obersteiner, M., & Herrero, M. (2013). Implications of alternative metrics for global mitigation costs and greenhouse gas emissions from agriculture. *Climatic Change*, 117(4), 677–690.
- Report of the High-Level Commission on Carbon Prices (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Technical report, International Bank for Reconstruction and Development and International Development Association / The World Bank.
- Règlement (CE) N° 1292/96 du Conseil (1996). *RÈGLEMENT (CE) N° 1292/96 DU CONSEIL du 27 juin 1996 concernant la politique et la gestion de l'aide alimentaire et des actions spécifiques d'appui à la sécurité alimentaire*. Technical report, Journal officiel des Communautés européennes, No L 166/ 1.
- Rivera, G. L., Malliet, P., Saussay, A., & Reynes, F. (2018). Construire une politique énergétique et climatique européenne cohérente et climatique européenne cohérente. *Revue de l'OFCE*.
- Rouquette, L. (2018). *Politique agricole commune et sécurité alimentaire*. Technical report, Pour la solidarité. European think & do tank. Sous la direction de Denis Stokkink.
- Röös, E., Bajželj, B., Smith, P., Patel, M., Little, D., & Garnett, T. (2017). Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Global Environmental Change*, 47.
- Scheipers, S. & Sicurelli, D. (2007). Normative power Europe. *Journal of Common Market Studies*, 45(2), 435–457.
- Schroeder, L. A., Gocht, A., & Britz, W. (2014). The Impact of Pillar II Funding : Validation from a Modelling and Evaluation Perspective. *Journal of Agricultural Economics*.
- Shackley, S. & Wynne, B. (1997). Global Warming Potentials : ambiguity or precision as an aid to policy? *Climate Research*, 8, 89–106.

- Shrestha, S., Ciaian, P., Himics, M., & Doorslaer, B. V. (2013). Impacts of climate change on EU agriculture. *Review of Agricultural and Applied Economics*, (2), 24–39.
- Skogstad, G. (1998). Ideas, Paradigms and Institutions : Agricultural Exceptionalism in the European Union and the United States. *Governance*, 11(4), 463–490.
- Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N. H., Rice, C. W., Robledo, C. A., Romanovskaya, C., Sperling, F., & Tubiello, F. N. (2014). *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*, volume 3, chapter 11, (pp. 497–540). Cambridge University Press : Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K.-h., Lauk, C., Harper, R., Tubiello, F. N., de Siqueira Pinto, A., Jafari, M., Sohi, S., Masera, O., Böttcher, H., Berndes, G., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Mbow, C., Ravindranath, N. H., Rice, C. W., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., Herrero, M., House, J. I., & Rose, S. (2013). How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals ? *Global Change Biology*, 19, 2285–2302.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., , & Rice, C. (2007). Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118, 6–28.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*.
- Sorrentino, A., Henke, R., & Severini, S. (2011). The Common Agricultural Policy after the Fischler Reform. *Farnham, UK and Burlington, VT, USA : Ashgate*.
- Stead, D. (2007). *Common Agricultural Policy*. R. Whaples (ed.) EH.Net Encyclopedia.
- T Pierrehumbert, R. (2005). Warming the world. *Nature*, 432, 677.
- The British Survey of Fertiliser Practice (2009). *FERTILISER USE ON FARM CROPS*

FOR CROP YEAR 2009. Technical report, UK Department for Environment, Food & Rural Affairs, British Library Cataloguing in Publication Data.

The Grantham Research Institute (2011). *Briefing Note : The case for carbon pricing*. Technical report, The Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.

Thornton, P. (2012). Recalibrating food production in the developing world : Global warming will change more than just the climate. *CCAFS Policy Brief no. 6. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)*.

Trnka, M., Brazdil, R., Dubrovsky, M., Semeradova, D., Stepanek, P., Dobrovolny, P., Mozny, M., Eitzinger, J., Malek, J., Formayer, H., Balek, J., & Zalud, Z. (2011a). A 200-year climate record in Central Europe : implications for agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, (31), 631–641.

Trnka, M., Eitzinger, J., Semeradova, D., Hlavinka, P., Balek, J., Dubrovsky, M., Kubu, G., Stepanek, P., Thaler, S., Mozny, M., & Zalud, Z. (2011b). Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe. *Climatic Change*, (108), 261–289.

UN (1998). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Technical report, United Nations.

Underwood, E., Poláková, J., Berman, S., Dooley, E., Freluh-Larsen, A., Kretschmer, B., Maxted, N., McConville, A., Naumann, S., Sarteel, M., Tostivint, C., Tucker, G., & van der Grijp, N. (2013). *Technology options for feeding 10 billion people. Climate change and agriculture ; biodiversity and agriculture*. . Technical report, Report prepared for the STOA Panel of the European Parliament. Contract IP/A/STOA/FWC/2008-096/LOT3/C1/SC5. Institute for European Environmental Policy, BIO Intelligence Service, Ecologic Institute, IVM, Brussels/London.

UNFCCC (2016). *Decision 1/CP.21 Adoption of the Paris Agreement*. Technical report, FCCC/CP/2015/10 Add. 1, Annex (Paris Agreement).

United Nations (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Technical report, United Nations.

United Nations (2011). *Objectifs du Millénaire pour le développement Rapport de 2011*. Technical report, United Nations.

- United Nations (2015). *Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Technical report, United Nations.
- United Nations (2017). *World Population Prospects : The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Technical report, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Working Paper No. ESA/P/WP/248.
- Valin, H., Havlik, P., Forsell, N., Frank, S., Mosnier, A., Peters, D., Hamelinck, C., Spottle, M., & van den Berg, M. (2013a). Description of the GLOBIOM (IIASA) model and comparison with the MIRAGE-BioF (IFPRI) model. *EC project ENER/C1/428-2012 - LOT 2 Assessing the land use impact of EU biofuels policy*.
- Valin, H., Havlik, P., Mosnier, A., Herrero, M., Schmid, E., & Obersteiner, M. (2013b). Agricultural productivity and greenhouse gas emissions : trade-offs or synergies between mitigation and food security? *Environmental Research Letters*.
- van Leeuwen, M. & Tabeau, A. (2005). Dutch AG-MEMOD model. A tool to analyse the agri-food sector. *The Hague, Agricultural Economics Research Institute (LEI)*.
- Van Schaik, L. & Schunz, S. (2012). Explaining EU activism and impact in global climate politics : is the EU a norm- or interest-driven actor? *Journal of Common Market Studies*, 50(1), 169–186.
- van Vuuren, D. P., Eickhout, B., Lucas, P. L., & den Elwen, M. G. J. (2006). Long-Term Multi-Gas Scenarios to Stabilise Radiative Forcing - Exploring Costs and Benefits Within an Integrated Assessment Framework. *The Energy Journal, International Association for Energy Economics*, 27, 201–234.
- Velthof, G., Lesschen, J., Webb, J., Pietrzak, S., Miatkowski, Z., Pinto, M., Kros, J., & Oenema, O. (2014). The impact of the Nitrates Directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000–2008. *Science of The Total Environment*, 468-469, 1225 – 1233.
- Vermont, B. & De Cara, S. (2010). How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture? A meta-analysis. *Ecological Economics*, 69(7), 1373–1386.
- Vojtech, V. (2010). *Policy Measures Addressing Agrienvironmental Issues*. Technical report, OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 24, OECD Publishing, Paris.

- von Witzke, H., Noleppa, S., & Schwarz, G. (2010). Decoupled payments to EU farmers, production, and trade : An economic analysis for Germany. *Working Paper, No. 90/2010, Humboldt-Universität zu Berlin, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften an der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät, Berlin.*
- Voulvoulis, N., Arpon, K. D., & Giakoumis, T. (2017). The EU Water Framework Directive : From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment, 575*, 358–366.
- Was, A., Zawalińska, K., & Britz, W. (2014). Impact of “greening” the Common Agricultural Policy on sustainability of european agriculture : from perspective of the Baltic sea countries. *Journal of Agribusiness and Rural Development, 4*(34), 191–212.
- West, P. C., Gerber, J. S., Engstrom, P. M., Mueller, N. D., Brauman, K. A., Carlson, K. M., Cassidy, E. S., Johnston, M., K., G., MacDonald, Ray, D. K., & Siebert, S. (2014). Leverage points for improving global food security and the environment. *Science, 345*.
- Wilkes, A., Tennigkeit, T., & Solymosi, K. (2013). *National planning for GHG mitigation in agriculture : A guidance document*. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Wollenberg, E., Richards, M., Smith, P., Havlík, P., Obersteiner, M., Tubiello, F. N., Herrero, M., Gerber, P., Carter, S., Reisinger, A., et al. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2 C target. *Global Change Biology, 22*(12), 3859–3864.
- World Bank Group (2018). *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. Technical report, World Bank, Washington, DC.

Titre : Analyse multicritère des politiques publiques environnementales dans l'Union Européenne

Mots clés : Coûts marginaux d'abattement, Emissions de gaz à effet de serre, Prix du carbone, Union Européenne, Modèle économique de l'offre agricole, Programmation mathématique

Résumé : L'Union Européenne a un programme ambitieux pour faire face aux effets du changement climatique, les institutions européennes devant désormais prendre en compte l'environnement dans le cadre de ses politiques. L'objectif de ma thèse consiste à évaluer les impacts des politiques publiques européennes sur l'agriculture et l'environnement, de mesurer leurs effets croisés et d'évaluer l'intérêt d'une meilleure coordination de ces politiques. La thèse vise à enrichir l'analyse économique sur des problématiques importantes recentrées sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) agricoles dans l'UE et le niveau de la production agricole, sous un angle quantitatif. La méthodologie repose sur un modèle de programmation mathématique qui simule l'offre agricole européenne (AROPAj), utilisant les données du Réseau d'Information Comptable Agricole. L'analyse est réalisée à plusieurs niveaux, européen, national, régional et infra-régional, tenant compte de la variabilité du contexte économique qui caractérise l'agriculture européenne sur les six années 2007-2012. Nous évaluons tout d'abord comment l'agriculture peut contribuer à l'atténuation des émissions de GES dans l'UE et nous offrons une

analyse détaillée des courbes de coûts marginaux d'abattement. Les résultats indiquent qu'en moyenne, sur la période 2007-2012, l'agriculture européenne peut réduire ses émissions d'environ 10%, 20% et 30% respectivement, pour les prix des émissions de 38, 112.5 et 205 Euros/tCO₂eq. Nous montrons que l'agriculture peut offrir une atténuation substantielle et que le potentiel et les coûts d'atténuation varient substantiellement dans le temps et dans l'espace. La deuxième problématique étudiée porte sur la compatibilité entre l'augmentation de la production agricole et la diminution de l'impact de l'agriculture sur l'environnement. En introduisant une approche primale (via un prix du carbone) et une approche duale (via un objectif calorique), nous montrons qu'on peut réduire les émissions de GES et modifier l'offre agricole tout en augmentant la quantité en calories alimentaires. On étend la problématique des émissions de GES, en dissociant les prix des deux gaz (CH₄ et N₂O). Un système de prix différenciés permet de mieux adapter la politique de régulation climatique en fonction de l'horizon de temps sur lequel on se projette, offrant une flexibilité dans la réduction des coûts d'abattement des émissions.

Titre : Multidimensional Analysis of Environmental Public Policies in the European Union

Keywords : Marginal abatement costs, Greenhouse gas emissions, Carbon price, European Union, Economic supply-side agricultural model, Mathematical programming

Abstract : The European Union has an ambitious agenda to deal with the effects of climate change, the European institutions must now take environment into account within the framework of its policies. The objective of my thesis is to evaluate the impacts of European public policies on agriculture and environment, to measure their crossed effects and to assess the potential for a better coordination of these policies. The thesis aims to enrich the economic analysis on important issues refocused on the reduction of agricultural greenhouse gas emissions in the EU and the level of agricultural production, from a quantitative perspective. The methodology is based on a mathematical programming model that simulates the European agricultural supply (AROPAj), using data from the Farm Accountancy Data Network. The analysis is carried out at several levels, European, national, regional and sub-regional, taking into account the variability of the economic context that characterizes the European agriculture over the six years 2007-2012. We first assess how agriculture may contribute to the

mitigation of EU GHG emissions and provide a detailed analysis of marginal abatement cost curves. The results show that, on average, over the period 2007-2012, EU agriculture may reduce its emissions by around 10%, 20% and 30%, respectively for emission prices of 38, 112.5 and 205 EUR/tCO₂eq. We show that agriculture may offer substantial mitigation and that mitigation costs and potential vary in time and in space. The second issue studied concerns the compatibility between the increase in agricultural production and the reduction of the impact of agriculture on the environment. By introducing a primal approach (via a carbon price) and a dual approach (via a calorie target), we show that we can reduce GHG emissions and change agricultural supply while increasing the quantity of food calories. We extend the issue of GHG emissions by separating the prices of the two gases (CH₄ et N₂O). A differentiated price system allows to better adapt the climate regulation policy according to the time horizon on which we are projected, offering flexibility in reducing the emission abatement costs.

