

Article

« Évaluation et régulation de l'effet de serre d'origine agricole »

Stéphane De Cara et Pierre-Alain Jayet

L'Actualité économique, vol. 75, n° 4, 1999, p. 597-623.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/602304ar>

DOI: 10.7202/602304ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <http://www.erudit.org/apropos/utilisation.html>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : erudit@umontreal.ca

ÉVALUATION ET RÉGULATION DE L'EFFET DE SERRE D'ORIGINE AGRICOLE*

Stéphane DE CARA

MODEM,

Université de Paris 10-Nanterre,

INRA, Département d'économie,

Centre de Grignon

Pierre-Alain JAYET

INRA, Département d'économie,

Centre de Grignon

RÉSUMÉ – Nous examinons la contribution du secteur agricole aux émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'impact de mesures de régulation. À partir d'un modèle économique de l'offre agricole française à fort contenu technique, nous mesurons la contribution des activités animales et végétales à l'accumulation de méthane et de protoxyde d'azote et au stockage du carbone dans le sol et la partie aérienne des plantes. Nous donnons ensuite un éclairage prospectif sur la réaction à court et moyen terme de l'offre agricole à l'application de différents schémas de taxation. Dans un premier temps, nous donnons une appréciation de l'impact d'un schéma de premier rang et discutons de l'intérêt d'une incitation au reboisement des terres en jachère. Basées sur les données techniques disponibles, les taxes et primes reposent directement sur les niveaux d'émissions que l'agence environnementale est supposée mesurer parfaitement. Dans une optique de second rang fondée sur la taxation de facteurs observables à moindre coût, nous examinons ensuite l'effet : (i) d'une taxe sur l'alimentation achetée et (ii) d'une taxe sur l'animal. Le principal résultat est que l'incitation au reboisement constitue un instrument efficace de régulation de l'effet de serre d'origine agricole, alors que les schémas de taxe de second rang sur l'activité de production animale apparaissent relativement inefficaces.

* Cette étude a bénéficié d'un financement de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES). Nous tenons à remercier les participants au 38^e congrès de la Société canadienne de science économique de Montréal (Québec, mai 1998) et aux journées de l'Association Française de Sciences Économiques « Économie de l'environnement » (Toulouse, mai 1998) ainsi que deux rapporteurs anonymes qui ont contribué à améliorer cet article. Nous restons seuls responsables des erreurs éventuelles.

ABSTRACT – Evaluation and Regulation of Greenhouse Effect from Agriculture. The aim of this paper is to study the modification of the greenhouse gas concentration in the atmosphere due to agricultural activities, and the impact of the implementation of regulation policy tools. From a supply-side model of the French agriculture, we estimate the contribution of cultivation and animal husbandry in terms of methane and nitrous oxide, taking also into account carbon storage in soils and plants. We then compare the effects of different tax schemes on agricultural supply in the short and mid run. We first focus on first best schemes. In this case, the taxes and subsidies are directly based on net emission levels that are assumed to be perfectly observed by the environmental agency. In this framework, we particularly discuss the opportunity of an incentive scheme proposed to producers in order to reforest on set-aside land. Then we turn to the case of second best regulation tools based on the taxation of factors which are observable at lower cost, that is to say taxes on market feed and livestock. The incentive to reforestation appears to be an effective means to regulate agricultural greenhouse gas emissions. It is much more socially acceptable than second best policy tools including taxes on activities derived from livestock.

INTRODUCTION

L'agriculture et l'élevage participent à la modification de la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES) et donc au renforcement du changement climatique global. Les principaux gaz émis par ce secteur sont, outre le CO₂, le méthane (*via* l'élevage des ruminants) et le protoxyde d'azote (*via* l'épandage d'engrais azotés). Par ailleurs, l'une des caractéristiques importantes du secteur agricole est de permettre de stocker du carbone soit dans le sol, soit dans les parties aériennes des plantes. Ce stockage permet un ralentissement du cycle de dégradation du carbone et donc une limitation des effets négatifs sur l'environnement.

La contribution de l'agriculture aux émissions de GES est significative. Pour la France, ce secteur représente environ 15 % des émissions nettes (intégrant le stockage du carbone par les sols et les forêts) exprimées en équivalent CO₂ et réparties comme suit : 3 % pour le CO₂ provenant de la combustion d'énergie fossile, 4 % pour le protoxyde d'azote (N₂O) et 8 % pour le méthane (CH₄). Le stockage du carbone représente quant à lui 7 % des émissions nettes (ministère de l'Environnement, 1997).

Les premiers résultats des négociations internationales portant sur la réduction de l'effet de serre additionnel d'origine anthropique laissent entrevoir que les pays européens, et notamment la France¹, devront faire un effort important en matière de réduction de leurs émissions nettes. Des instruments économiques

1. À Kyoto, en décembre 1997, les pays de l'Union Européenne se sont engagés à réduire leurs émissions globales de 8 % par rapport au niveau de 1990 d'ici à 2008-2012 (en CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆). Pour sa part, la France devra, dans le même temps, stabiliser ses émissions au niveau de 1990, ce qui, dans un contexte de croissance des rejets de CO₂ (demande énergétique croissante avec des perspectives faibles de réduction dans le domaine de la fourniture d'électricité), nécessitera un effort important sur les autres gaz contenus dans le protocole.

incitant les exploitants agricoles à réduire les émissions ou à accroître le stockage de carbone constitue une alternative intéressante, notamment lorsque de telles mesures peuvent satisfaire conjointement à la réalisation d'autres objectifs environnementaux ou budgétaires.

La littérature économique dans ce domaine s'est jusqu'ici attachée à décrire et à comparer les instruments de régulation susceptibles de corriger les externalités dues à la pollution. Les études empiriques menées sur les effets d'une régulation des sources d'émissions de GES se sont concentrées principalement sur les émissions de CO₂, principal facteur du réchauffement climatique (Hoeller *et al.*, 1992). Les effets de l'introduction d'une taxe sur le carbone ou mixte carbone-énergie ont été examinés à l'aide de modèles macro-économiques (Beumais et Bréchet, 1995; Haughland *et al.*, 1992) parfois couplés avec des modèles de climat (Nordhaus, 1993).

Dans cet article, nous cherchons tout d'abord à mesurer, à l'échelle de la France et grâce aux données techniques disponibles, l'importance relative des différentes sources d'émission et des puits potentiels de carbone liés aux activités agricoles. Nous apportons ensuite un éclairage prospectif sur la réaction de la structure de production à l'application de différents schémas de régulation visant à améliorer le bilan net en termes de GES d'origine agricole.

La modélisation de l'offre agricole, sur laquelle se fonde notre analyse, repose sur des méthodes de programmation mathématique. Intégrant la diversité des conditions technico-économiques des exploitations françaises, elle rend compte des possibilités de substitution entre les différentes activités agricoles. Elle intègre aussi les mesures réglementaires liées à la Politique Agricole Commune (PAC). Le modèle utilisé nous permet d'appréhender, à l'échelle de la France, les adaptations à court ou moyen terme de l'offre agricole consécutives à l'adoption de nouveaux dispositifs institutionnels. Dans le cas présent, il nous permet de rendre compte des réallocations de la surface agricole, de la variation du capital animal, de la composition de l'alimentation animale, des variations de revenu des groupes d'agriculteurs représentatifs et des effets induits sur les budgets agricoles. En donnant une mesure des effets environnementaux, il fournit quelques éléments de réponse à une analyse coût-avantage qui prévaudrait dans le cadre de l'adoption d'instruments de la régulation adaptée à cette nouvelle cible.

Les schémas de régulation sollicités reposent principalement sur des instruments en prix. La référence que nous avons retenue est celle d'une taxation directe des émissions à hauteur du dommage marginal social et d'une prime au reboisement de la jachère fixe au *prorata* du bénéfice marginal lié au stockage additionnel de carbone. Ce premier jeu d'instruments est décliné dans différents contextes institutionnels. Il traduit des hypothèses fortes quant à la capacité de l'autorité régulatrice à inférer le comportement des agents et leurs effets sur la composition de l'atmosphère. Néanmoins, il fournit une référence pour l'évaluation

de politiques de second rang². Nous comparons ensuite cette première combinaison de taxes et de primes associées à la source même des émissions à l'application de mesures de régulation indirectes, fondées sur des facteurs observables à moindre coût pour la puissance publique. Deux types d'instruments ont été explorés à ce niveau : d'une part, une taxe par animal, fondée sur l'observation des émissions moyennes par espèce et catégorie d'âge, d'autre part, une taxe sur les quantités d'aliments achetées par l'exploitant, fondée sur les caractéristiques méthano-gènes moyennes des différents types d'aliments.

Nous exposons les principaux aspects méthodologiques liés au modèle utilisé et aux hypothèses retenues dans la première section. Nous présentons et discutons les résultats obtenus dans la deuxième section.

1. MÉTHODOLOGIE

Les aspects méthodologiques sont présentés sur trois niveaux. Nous décrivons succinctement le modèle utilisé pour les simulations, en insistant sur les points directement liés aux émissions de GES (une description plus détaillée du modèle est fournie en annexe). Nous présentons les méthodes d'estimation et les données retenues pour quantifier les émissions et le stockage du carbone liés aux différentes activités. Enfin, nous exposons les combinaisons de taxes et de primes utilisées dans les simulations.

1.1 *Le modèle*

Le modèle utilisé est un modèle d'offre agricole multiproducteurs et multiproduits (Jayet *et al.*, 1997). Multiproducteurs, il respecte un principe de choix individuel de chacun des producteurs types pris en compte dans le modèle. Multiproduits, il permet de traduire l'allocation optimale des ressources parmi les productions végétales et animales choisies dans un ensemble de productions autorisées.

Les producteurs représentatifs sont définis à partir de critères géographiques et technico-économiques. Chaque producteur type maximise une marge brute (apparentée à un profit de court terme) sous des contraintes techniques propres à la production agricole tenant compte des instruments de la PAC, par le choix du niveau de ses activités (surfaces et collectes végétales, surfaces gelées, alimentation animale et effectifs animaux). À chacun de ces programmes économiques est associé un programme d'optimisation. Le principe fondamental de cette

2. Les politiques « optimales » sont entendues comme des mesures de régulation visant à inciter, de manière décentralisée, les agents à adopter des comportements individuels compatibles avec la réalisation de l'optimum au niveau social, sur la base des connaissances des mécanismes polluants et de l'évaluation du dommage social disponible. Dans le cas examiné, la réalisation de l'optimalité est contingente aux véritables valeurs des émissions, à la réalisation du dommage environnemental consécutif et à l'évaluation qui en est faite.

représentation du comportement économique des producteurs est l'importance accordée aux phénomènes physiques et biologiques qui sous-tendent l'activité de production. Si des paramètres peuvent être inférés statistiquement de l'observation, il n'en demeure pas moins que leurs valeurs doivent être cohérentes avec la représentation du processus de production telle que les sciences techniques la valident.

Les estimations des paramètres, à partir desquelles sont définis les coefficients des programmes linéaires, reposent sur des données micro-économiques. Les données utilisées sont extraites du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA). Il s'agit de données suffisamment complètes permettant l'estimation des paramètres pour lesquels l'information technique peut faire défaut à l'échelle d'une exploitation agricole type ou permettant de rapprocher information technique et observation économique à cette échelle. Ces données permettent également de respecter une certaine représentativité des exploitations types, à l'échelle nationale ou à l'échelle des régions.

À chaque jeu de valeurs des paramètres est associée une solution pour chacun des programmes d'optimisation traduisant le comportement des groupes types. D'une façon générale et condensée, le programme linéaire associé au producteur de type k peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \max_x \quad & \pi^k(x^k; \theta^k, \phi) \equiv g^k(\theta^k, \phi) \cdot x^k, \\ \text{s.c.} \quad & A^k(\theta^k, \phi) \cdot x^k \leq z^k(\theta^k, \phi) \\ \text{et} \quad & x^k \geq 0. \end{aligned}$$

Ce programme est linéaire en x^k , vecteur primal des n activités. A^k et z^k sont respectivement la matrice des coefficients et le vecteur des disponibilités associées aux m contraintes de production. g^k est le vecteur ligne des « prix » dans la fonction d'objectif. θ^k est le vecteur des paramètres caractérisant le producteur de type k et ϕ représente le vecteur des paramètres caractérisant l'environnement économique général. Seront respectivement notées $\pi^{*k}(\theta^k, \phi)$ et $x^{*k}(\theta^k, \phi)$, la fonction de profit et les fonctions de niveau d'activité (telles que l'offre de produits, les surfaces cultivées, la demande dérivée de facteurs) pour le producteur de type k .

Le vecteur E^k des émissions de N_2O et de CH_4 et des quantités de carbone stocké est calculé comme une fonction des activités concernées (surfaces allouées aux différentes cultures et composition de l'alimentation animale) évaluées à l'optimum pour chacune des exploitations représentatives de sorte que $E^{*k} = E^k(x^{*k}, \theta^k, \phi)$. Les composantes des vecteurs θ^k et ϕ , spécifiquement liées au calcul des émissions de GES intervenant dans la détermination de E^{*k} , sont les

potentiels d'émission ou de stockage associés à chaque activité, les coefficients d'équivalence entre gaz, ainsi que les niveaux des instruments de régulation. Par ailleurs, l'introduction d'une politique de taxation ou de prime revient à modifier le vecteur g^k des marges variables par unité d'activité concernée (surfaces associées aux différentes cultures et à la jachère fixe, productions et alimentation animales).

Dans l'élaboration du modèle, une attention particulière a été portée sur la description des comportements des firmes en matière d'alimentation des animaux. Les caractéristiques nutritionnelles des différents aliments ont été intégrées au modèle essentiellement en termes d'apports énergétiques, protéiques et de digestibilité. Pour satisfaire les besoins vitaux des animaux, l'agriculteur dispose d'aliments produits sur la ferme (certaines céréales, fourrages) et d'aliments achetés simples (céréales, tourteaux de colza, ...) ou composés (aliments industriels à base de céréales brutes, de coproduits agricoles ou issus de transformations agroalimentaires). Chaque agriculteur détermine l'alimentation de son troupeau en fonction des prix d'achat des aliments achetés et des possibilités de substitution par des aliments produits à la ferme, tout en respectant des apports minimaux différenciés selon le type d'animal. Enfin, nous disposons dans le modèle des charges variables estimées par culture et ventilées par poste de dépense. À partir des estimations de prix fournies par le Syndicat National de l'Industrie des Engrais (SNIE, 1995), nous en déduisons des quantités moyennes d'engrais épanchues dans chaque exploitation (Taverdet-Popioleck, 1998) auxquelles nous appliquons les taux moyens d'apport azoté par culture. En d'autres termes, ces intrants sont considérés comme constants par unité de surface pour une culture et un groupe donnés. Cette formulation ne permet pas d'appréhender les modifications des pratiques agricoles en matière d'utilisation de fertilisants (amélioration de l'efficacité des intrants). Néanmoins, elle permet de donner une représentation moyenne fidèle des consommations d'engrais azotés à l'échelle considérée.

1.2 *Évaluation des émissions*

Les conséquences des activités du secteur de l'agriculture et de l'élevage sur l'effet de serre sont limitées aux phénomènes principalement connus et pour lesquels nous disposons d'une information accessible et utilisable. Nous limitons cette présentation à quatre types de phénomène :

- les émissions de protoxyde d'azote provenant de la minéralisation des engrais azotés spécifiquement liées à l'activité végétale principale de surface;
- les émissions de méthane consécutives à la présence de ruminants sur l'exploitation;
- le stockage du carbone dans le sol directement lié à l'activité végétale de surface, stockage essentiellement dû au système racinaire;
- le stockage de carbone additionnel induit par la substitution d'une production lignee pérenne à une production annuelle, qui réduit d'autant les émissions.

Nous combinons ces différents phénomènes pour mesurer une émission de gaz à effet de serre en « équivalent carbone sous forme dioxyde de carbone » ($tC-CO_2$) sur la base des pouvoirs radiatifs globaux³ (PRG) cumulés sur 100 ans.

1.2.1 Émissions de protoxyde d'azote

Les oxydes d'azote sont principalement produits par les sols (Bremner et Blackmer, 1981; Germon et Henault, 1995). Nous ne prenons en compte que les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) dont le rôle direct sur le renforcement de l'effet de serre est avéré (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995a).

Dans les simulations effectuées, nous avons calculé les dégagements de N_2O à partir de l'équation proposée par Bouwman (1989) qui décrit les émissions en fonction de l'apport d'engrais azotés (équation 1) sur des parcelles normalement drainées et fertilisées⁴.

$$N_2O = 1,88 + 0,00417 \cdot N \quad (1)$$

où N_2O représente les émissions annuelles de N_2O en kg par hectare et par an et N l'apport en azote en kg par hectare et par an. À l'instar de cet auteur, nous n'avons pas retenu une influence différenciée des apports azotés par culture sur les dégagements de N_2O . De même, nous ne tenons pas compte des interactions chimiques – difficiles à appréhender d'un point de vue statistique, et donc difficilement contrôlables par l'agence environnementale – entre les différentes composantes de l'apport. La différenciation des niveaux d'émission par culture est donc directement liée aux variations de la teneur en azote des apports moyens de fertilisants.

1.2.2 Émissions de méthane

Le méthane produit par les ruminants provient essentiellement de la fermentation entérique. Outre la variabilité selon l'espèce et l'âge des animaux considérés, l'alimentation est l'un des facteurs-clés qui déterminent l'importance des flux de méthane dégagés par les ruminants (Vermorel, 1995). Le niveau d'alimentation, la nature du fourrage, la part dans la ration de l'alimentation concentrée et

3. Le forçage radiatif moyen correspond à la perturbation du bilan radiatif (en Wm^{-2}) au niveau de la tropopause. Il permet d'apprécier l'effet de serre additionnel, à un instant donné, imputable à un gaz particulier compte tenu de la concentration de GES. Le Pouvoir Radiatif Global exprime l'effet de serre cumulé sur un horizon de temps donné, compte tenu des transformations physico-chimiques de l'atmosphère.

4. L'intensité de la production de N_2O est fortement dépendante des conditions pédo-climatiques (acidité et humidité du sol, température, précipitations). La variabilité spatiale ou temporelle des flux de protoxyde d'azote rend d'autant plus difficile l'estimation de l'effet spécifique lié à l'apport de fertilisants. Néanmoins, l'observation montre que l'apparition de pics d'émission est corrélée positivement avec l'épandage d'engrais azotés (Bouwman, 1989).

les apports d'additifs, tels que les matières grasses, sont autant de paramètres qui interviennent dans la détermination de la quantité de méthane émise par unité de temps et par animal (Jayet *et al.*, 1997).

Le niveau des émissions a été calculé en distinguant le pouvoir méthanogène des aliments simples et celui des aliments composés. L'estimation repose sur deux équations qui lient la part de l'énergie brute de l'aliment dégagée sous forme de CH_4 et sa digestibilité (Sauvant *et al.*, 1996). L'équation (2) permet de calculer le pouvoir méthanogène dans le cas d'aliments simples tandis que l'équation (3) décrit les dégagements dans le cas d'aliments composés :

$$E-CH_4/EB = -1,73 + 13,91.dE \quad (2)$$

$$E-CH_4/EB = 5,62 + 4,54.dE \quad (3)$$

où dE est la digestibilité apparente, et $E-CH_4/EB$ représente le pourcentage d'énergie brute dissipée sous forme de méthane. La digestibilité et le contenu énergétique des différents aliments entrant dans la composition des rations des animaux sont donnés par Jarrige (1988).

1.2.3 Stockage du carbone

Absorbé par les plantes et réduit en carbone grâce à la photosynthèse, le CO_2 atmosphérique est stocké à long terme dans le sol. Par ailleurs, la conduite de cultures ligneuses en surface permet un stockage aérien additionnel important et durable. Le ralentissement consécutif du cycle de dégradation du carbone contribue à la diminution du dommage environnemental. Les temps biologiques impliqués par ces phénomènes étant très longs, il convient de mesurer l'importance de la stabilité de la conduite de l'exploitation en surface et de la destination des produits⁵.

Les deux formes de stockage de carbone mentionnées sont intégrées au modèle. Nous fondons nos estimations de stockage souterrain sur les chiffres publiés par Balesdent, et appliqués aux principales activités du modèle (Balesdent, 1995). La référence que nous retenons est celle de la jachère nue, activité pour laquelle le stockage de carbone est considéré comme nul. Nous distinguons, parmi les activités du modèle, trois types de culture caractérisés par leur potentiel de stockage annuel : les cultures de vente ($0,4 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$), les prairies ($0,6 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$) et les cultures ligneuses ($0,75 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$). Il est également tenu compte d'un stockage aérien additionnel pour les forêts avec une valeur moyenne annuelle de $2,5 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$, estimée sur une rotation complète. Des rentes différenciées selon les différentes essences permettent de rendre compte de la diversité des possibilités de production sylvicole (Jayet *et al.*, 1998).

5. Le cycle d'exploitation doit être suffisamment long pour que la variation du carbone « capitalisé » dans le sol soit significative et le produit du bois doit rester sur pied ou être exporté en étant aussi peu altéré que possible (destiné par exemple au bois d'œuvre).

1.2.4 Bilan net en termes de gaz à effet de serre

Afin de comparer les quantités émises en chacun des gaz étudiés, on est tenu de les ramener à une mesure commune. Dans la perspective de l'adoption de la politique de régulation retenue, cette mesure doit être fondée sur le dommage attendu imputable à une augmentation de l'un quelconque de ces gaz dans l'atmosphère. Le forçage radiatif moyen⁶ donne une première approximation de l'effet des trois gaz considérés sur le climat, mais occulte la dimension temporelle inhérente à la différence importante entre les temps de résidence dans l'atmosphère. Le méthane, le protoxyde d'azote et le carbone sont donc rapportés au pouvoir radiatif global cumulé sur 100 ans d'une unité massique de CO₂ émise aujourd'hui (tableau 1). Même si cet indice demeure imparfait, il nous permet d'établir une règle d'équivalence entre les trois gaz considérés. On tient ainsi compte de leurs caractéristiques différenciées sur une échelle de temps compatible avec la volonté affichée de promouvoir des formes de développement durable.

TABLEAU 1

POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL DES PRINCIPAUX GAZ À EFFET DE SERRE

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentration	356 ppmv	1,714 ppmv	0,311 ppmv
Forçage radiatif	1,56 Wm ⁻²	0,47 Wm ⁻²	0,14 Wm ⁻²
Durée de vie	50-200 ans	12 ans	120 ans
PRG sur 20 ans	1	56	280
PRG sur 100 ans	1	21	310
PRG sur 500 ans	1	6,5	170

SOURCE : IPCC, 1995a.

1.3 Instruments mis en place

1.3.1 Régulation des externalités

En présence d'externalité, le prix des produits ne coïncide plus avec leur valeur sociale. La réalisation de l'optimum social n'est donc plus assurée par le seul système de marché décentralisé. La littérature dans le domaine de l'économie de l'environnement propose des instruments susceptibles de réguler les externalités inhérentes aux choix des agents économiques afin que ces derniers adoptent

6. Voir note 3.

un comportement individuel compatible avec l'optimum d'un point de vue collectif. Il revient à la puissance publique de choisir le niveau et le mode d'intervention afin de combler l'écart entre coût marginal privé et coût marginal social, et d'orienter les décisions individuelles dans le sens d'un accroissement global du bien-être. Par ailleurs, le principe pollueur-payeur adopté par les pays de l'OCDE implique que le coût des mesures économiques engagées doit être supporté par les agents responsables de la pollution (OCDE, 1989; Henry, 1989). Dans la tradition pigouvienne et dans un contexte d'information et de concurrence parfaites, l'instrument privilégié est une taxe par unité d'émission évaluée au dommage marginal. Cette dernière permet de minimiser le coût global de réduction de la pollution (Pigou, 1932; Tietenberg, 1990; Barde et Smith, 1997). Dans le cas où l'information fait défaut ou est trop onéreuse à obtenir pour l'instance régulatrice, on peut être amené à préférer des schémas indirects de second rang sous-optimaux, mais efficaces du point de vue du coût d'application (Larson *et al.*, 1996).

La régulation de l'externalité négative que représente la pollution par les émissions de GES nécessite l'intervention d'une agence environnementale capable de recueillir les informations nécessaires à la fixation du niveau des instruments économiques, de lever une taxe (par exemple) permettant de rétablir les conditions de réalisation de l'optimum social et d'en vérifier l'application. Dans le cas qui nous intéresse, on peut concevoir qu'il revienne à une telle agence le rôle de faire respecter les engagements pris au niveau international tout en privilégiant des solutions économiquement efficaces (Troisième Conférence des Parties, 1997, articles 2 et 3). Les structures institutionnelles existantes – tant au niveau européen que français – dans le secteur agricole et l'orientation agro-environnementale affichée par la PAC permettent par ailleurs d'envisager l'application de telles mesures.

En théorie, l'adoption de taxes à la production aurait une influence sur les équilibres de marché des produits et consommations factorielles agricoles. La taxe optimale dans une optique d'équilibre général doit donc intégrer l'ensemble de ces effets induits (De Cara, 1997). Dans notre étude et étant donnée l'approche sectorielle retenue, nous privilégions un « jeu » entre le régulateur, le producteur et le contribuable faisant ainsi l'hypothèse que la structure de prix de marché est constante.

1.3.2 Schémas de taxation de premier rang

L'examen des processus biologiques en cause, dans l'accumulation de gaz à effet de serre d'origine agricole, met en évidence l'importance des pratiques agricoles et des choix d'activités. Dans un premier temps, nous adoptons une approche pigouvienne standard nous fondant sur une estimation du dommage marginal social associé à une augmentation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Il a été retenu une valeur de référence du dommage marginal social

de 450 F par tonne de carbone⁷ sous forme de CO₂. Les premières combinaisons de taxes et primes que nous introduisons couvrent exactement les émissions de chacune des firmes à hauteur de leur participation à l'aggravation du dommage⁸.

Dans la sous-section qui précède, nous avons mis en évidence le rôle du mode d'alimentation dans les émissions de méthane par les ruminants. La première correction du vecteur de coût privé que nous introduisons affecte directement l'alimentation animale – qu'elle qu'en soit l'origine, alimentation achetée ou intraconsommation – et vient en réduction du produit brut par animal dans l'objectif. Symétriquement, l'utilisation d'engrais azotés est pénalisée proportionnellement au dommage dû aux dégagements de N₂O dont elle est responsable.

Par ailleurs, les marges par culture sont bonifiées au *pro rata* du stockage de carbone dans le sol et dans la partie aérienne. Nous primons le carbone piégé sous forme organique à un taux égal au dommage marginal social retenu, faisant ainsi l'hypothèse qu'un atome de carbone stocké équivaut exactement à la réduction d'une molécule de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Dans les simulations, nous mettons l'accent sur le stockage du carbone dans le sol et le stockage aérien *via* la conduite de productions ligneuses. Une prime par hectare, fondée sur la capacité de stockage souterrain, est intégrée à la marge variable pour les cultures annuelles. De plus, dans le cadre de la PAC, une incitation à la reconversion des terres en jachère en forêt paysanne vient récompenser le stockage aérien sous forme de production ligneuse. La prime que nous proposons dans ce domaine représente environ la moitié des primes existantes en matière d'incitation au gel de terre.

1.3.3 Schémas de taxation de second rang

Le second volet de taxes que nous mettons en œuvre dans les simulations repose sur l'hypothèse que l'adoption d'une politique de régulation de premier rang se heurte au coût prohibitif du recueil d'information et du contrôle des pratiques des agriculteurs. C'est vraisemblablement dans le cas des émissions de

7. Les problèmes liés à l'évaluation du dommage dû au changement climatique restent source de controverses : « [...] IPCC does not endorse any particular range of values for the marginal damage of CO₂ emissions, but published estimates range between \$ 5 and \$ 125 (1990 US) per ton of carbon emitted now. This range of estimates does not represent the full range of uncertainty[...] » (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995b : 11). La valeur retenue nous a été suggérée lors de l'étude commanditée par la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre à Paris. Nous proposons une analyse de sensibilité des résultats des simulations autour de ce chiffre à la section 2.3.

8. L'hypothèse d'un dommage marginal constant est une hypothèse relativement forte. On peut, en effet, imaginer que le dommage soit convexe en la concentration totale de GES. Néanmoins, sur la base des données existantes, il nous est apparu impossible de proposer, une forme de fonction de dommage qui répondrait à cette préoccupation. De plus, étant donnée la contribution marginale des émissions françaises d'origine agricole au total des émissions mondiales, l'approximation linéaire au voisinage du niveau calculé apparaît comme un compromis relativement satisfaisant. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité (section 2.3) fournit une réponse partielle à cette question en donnant un aperçu des réponses du modèle à différents niveaux d'évaluation du dommage.

méthane que des difficultés de cet ordre sont le plus susceptibles d'apparaître. En effet, une part de l'alimentation animale ne passe pas par le marché lorsqu'elle est produite et consommée sur l'exploitation (intraconsommation). Également, ce mode d'alimentation est reconnu plus méthanogène que l'aliment concentré acheté. Il devient difficile d'envisager une correction pigouvienne de premier rang assise sur les véritables consommations de ces intrants. Nous nous intéressons donc à l'adoption d'instruments portant uniquement sur des facteurs observables. Nous pénalisons tour à tour le capital animal (sur la base des estimations moyennes des émissions par animal) et l'alimentation achetée.

Outre la taxe sur les consommations d'engrais azotés, évaluée à 90 F la tonne (soit un peu plus de 2 % du prix moyen de l'engrais), et la récompense au stockage du carbone, nous introduisons une taxe par tonne d'aliment concentré de 80 F et une taxe de 70 F par tonne d'aliment grossier, qui correspondent à un taux de taxe de l'ordre de 5 %, niveau jugé « acceptable » sans toutefois favoriser exagérément les aliments produits sur l'exploitation. En ce qui concerne la taxation du capital animal, nous introduisons un système différencié fondé sur les quatre catégories du tableau 2. On notera que ces valeurs sont comprises entre le quart et la moitié des primes offertes par tête dans le cadre de la PAC.

TABLEAU 2
TAXATION DU CAPITAL ANIMAL

Type d'animal	Taxe en F par tête et par an
Bovins mâles de plus de 1 an	160
Jeunes femelles de plus de 1 an et génisses	120
Vaches laitières	320
Vaches allaitantes	240

1.4 *Présentation des scénarios*

Nous combinons les jeux de taxes présentés ci-dessus sous la forme de sept scénarios. Par ailleurs, afin de mettre en évidence les interactions entre une éventuelle politique de régulation et le dispositif actuel de la PAC, deux simulations de référence sont retenues selon que les contraintes liées à ces dispositions réglementaires sont actives (PAC95) ou non (REF90). Le scénario GES90 permet d'apprécier l'efficacité relative d'une politique de régulation hors du dispositif de la PAC.

Les scénarios GES95 et GESFP traduisent la situation d'une politique de régulation de premier rang sur la base du dommage marginal retenu. Ces deux scénarios diffèrent uniquement par la prise en compte d'une prime spécifique à la production de bois sur les terres en jachère fixe (GESFP). Enfin, les scénarios

ALIFP et ANIFP introduisent la possibilité d'une taxation indirecte du dommage via respectivement l'alimentation destinée aux ruminants et le capital animal. Dans ces deux scénarios, la taxation coexiste avec la prime offerte pour les productions ligneuses. Le tableau 3 donne un récapitulatif des instruments mis en œuvre dans chacun des scénarios.

TABLEAU 3

RÉSUMÉ DES DIFFÉRENTS JEUX DE SCÉNARIOS RETENUS

Scénario	Instruments
1. REF90	Référence PAC 90
2. GES90	PAC 90 + taxation / prime à la source
3. PAC95	Référence PAC 95
4. GES95	PAC 95 + taxe / prime à la source
5. GESFP	PAC 95 + taxe / prime à la source + rémunération de la forêt
6. ALIFP	PAC 95 + taxe des engrais, des aliments + prime au stockage de carbone + rémunération de la forêt
7. ANIFP	PAC 95 + taxe des engrais, des animaux + prime au stockage de carbone + rémunération de la forêt

2. RÉSULTATS

Les simulations effectuées nous permettent de comparer les effets des différents jeux de taxes et primes affectant les activités responsables d'une émission additionnelle de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nous examinons les effets de l'introduction de tels schémas sur la composition de l'offre, sur l'importance du dommage, sur les revenus (marges brutes des exploitants), sur les budgets publics au niveau européen (FEOGA hors restitutions aux exportations) et sur la recette fiscale spécifiquement liée à la politique de régulation de l'effet de serre. Les grandeurs obtenues sont données à titre indicatif et n'ont en elles-mêmes aucune valeur de « prévision ». Elles permettent néanmoins de juger de l'efficacité relative des différents schémas à l'aune de critères à la fois strictement environnementaux et économiques. Afin de donner une vision synthétique de cette comparaison, nous ramenons les dommages à leur valeur monétaire.

2.1 Impact de la réforme de la PAC sur le dommage

La réforme de la PAC, décidée en 1992 et progressivement mise en place sur la période 1993-95, s'est traduite par une baisse du soutien aux prix agricoles et l'adoption de mesures de régulation de l'offre (gel pour les activités végétales et

prime à l'*extensification* pour les activités animales) compensées par l'introduction d'aides aux revenus découplées des rendements. Nous en avons retenu les principes dans les simulations des scénarios 3 à 7 (tableau 3).

La comparaison des résultats des simulations PAC95 et REF90 révèle l'effet légèrement négatif en terme de dommages de cette réforme (tableau 4). La baisse des surfaces allouées aux grandes cultures et aux fourrages est responsable de deux effets contraires sur le bilan en GES. La baisse importante du carbone stocké est en partie compensée par la diminution des émissions d'azote consécutive à la baisse de l'utilisation de fertilisants. Dans le même temps, l'augmentation des effectifs herbivores, conjuguée à une réorientation de l'alimentation animale vers l'intraconsommation de céréales, favorise une hausse des émissions de méthane. L'abandon progressif du système de soutien des prix et l'adoption de mesures d'aides au revenu découplées de la production conduisent à des transferts importants vers les agriculteurs et vers les consommateurs, en partie financés par le budget agricole européen.

2.2 Effet d'une taxation à la source des émissions de GES

Les mécanismes directs de taxation et de prime des émissions à la source permettent dans tous les cas de réduire de manière significative le dommage. L'examen de la situation fictive, où les contraintes liées à la Politique Agricole Commune ne sont pas actives (GES90, tableau 4), révèle que, dans ce contexte, l'application d'un schéma de taxation directe des émissions, sans tenir compte d'une éventuelle rémunération de la forêt paysanne, permettrait de réduire le dommage de près d'un million de tonnes d'équivalent C-CO₂. Cette réduction est principalement obtenue grâce à la baisse des émissions de méthane, permise par une réduction des effectifs animaux et par une nouvelle répartition de l'alimentation animale entre aliments grossiers et aliments concentrés. Elle permettrait ainsi de compenser la baisse du stockage de carbone induite par la nouvelle réallocation de la surface agricole utilisable.

TABLEAU 4

COMPARAISON DES SCÉNARIOS GES90 ET PAC95 PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE REF90 (HYPOTHÈSE D'UNE VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE DE 450 F)

	Unité	REF90	GES90	Δ^1		PAC95	Δ^1	
Céréales	(Mha)	7,92	8,03	0,11	1,4 %	7,50	-0,43	-5,4 %
SCOP hors gel ²	(Mha)	10,79	10,92	0,13	1,2 %	10,53	-0,26	-2,4 %
Gel tournant primé	(Mha)	0,00	0,00	0,00	-	1,89	1,89	-
Gel fixe primé (forêt)	(Mha)	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
Fourrages et prairies	(Mha)	10,29	10,16	-0,13	-1,3 %	8,95	-1,34	-13,1 %
Alimentation animale								
– céréales intraconsommées	(Mt)	8,14	8,28	0,14	1,7 %	11,57	3,43	42,2 %
– concentrés achetés	(Mt)	13,53	13,93	0,40	3,0 %	11,63	-1,91	-14,1 %
– grossiers	(Mt)	2,32	1,56	-0,76	-32,6 %	1,25	-1,07	-46,0 %
Effectifs UGB	(MUGB)	19,65	19,56	-0,09	-0,5 %	19,66	0,02	0,1 %
Bilan carbone stocké	(Mt)	10,68	10,65	-0,03	-0,3 %	9,65	-1,03	-9,6 %
Bilan azote émis	(1 000t)	62,00	62,00	0,00	0,0 %	59,00	-3,00	-4,8 %
Bilan méthane émis	(Mt)	1,70	1,66	-0,04	-2,2 %	1,72	0,03	1,5 %
Émissions nettes	(Mt CO ₂)	50,85	49,97	-0,88	-1,7 %	51,53	0,68	1,3 %
Marge brute	(1 000MF)	119,71	113,53	-6,18	-5,2 %	121,26	1,55	1,3 %
Recette fiscale	(1 000MF)	0,00	6,13	6,13	-	0,00	0,00	-
Dommage	(1 000MF)	-6,24	-6,13	0,11	-1,7 %	-6,32	-0,08	1,3 %
FEOGA ³	(1 000MF)	1,29	1,30	0,01	0,8 %	-37,05	-38,33	-
Total		114,75	114,83	0,07	0,1 %	77,89	-36,86	-32,1 %

NOTES : 1. Variations absolue et relative par rapport à la référence REF90.

2. Surface en céréales, oléagineux et protéagineux.

3. Il importe de rappeler que le budget agricole (« FEOGA ») ne tient compte ici que des taxes de corresponsabilité céréalière (REF90) et des aides directes (PAC95). Sont donc ignorés dans nos bilans les impacts budgétaires des restitutions aux exportations et l'effet de la baisse des prix agricoles sur le surplus des consommateurs.

Dans le cadre institutionnel de la PAC en application aujourd'hui, le potentiel de réduction du dommage demeure relativement limité si la puissance publique se contente de taxer les émissions sans récompenser significativement l'activité « forêt » (scénario GES95, tableau 5). Un schéma de taxation directe s'avérerait efficace principalement en ce qui concerne les émissions de méthane, en incitant les agents à réduire l'intraconsommation au profit de l'alimentation concentrée achetée et à diminuer le capital animal. Il ne permettrait qu'une augmentation faible du stockage de carbone et une diminution négligeable des émissions de N₂O. En outre, l'application d'une telle politique se traduirait par une baisse très importante de la marge brute des exploitants, essentiellement due à la ponction

fiscale liée à la politique de régulation. Le bénéfice, exprimé en équivalent monétaire, s'avère, en définitive, faible. En revanche, l'introduction de mesures visant à soutenir la reconversion de la jachère en forêt paysanne (GESFP, tableau 5) permettrait un stockage additionnel important du carbone (de plus de 50 %) sans altérer sensiblement les résultats environnementaux sur les autres postes que sont les émissions de protoxyde d'azote et les émissions de méthane. La prime proposée à la reconversion de la jachère en forêt paysanne (qui vient s'ajouter à la marge d'exploitation normale de l'activité forêt) s'avérerait particulièrement profitable. La marge brute agricole, soutenue par de telles primes, subirait une baisse moindre et la recette fiscale resterait relativement importante.

TABLEAU 5

COMPARAISON DES SCÉNARIOS GES95 ET GESFP PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE PAC95 (HYPOTHÈSE D'UNE VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE DE 450 F)

	Unité	PAC95	GES95	Δ^1		GESFP	Δ^1	
Céréales	(Mha)	7,50	7,48	-0,01	-0,2 %	7,16	-0,33	-4,5 %
SCOP hors gel ²	(Mha)	10,53	10,56	0,03	0,3 %	9,98	-0,55	-5,2 %
Gel tournant primé	(Mha)	1,89	1,92	0,03	1,8 %	0,74	-1,15	-60,8 %
Gel fixe primé (forêt)	(Mha)	0,00	0,01	0,01	-	1,72	1,72	-
Fourrages et prairies	(Mha)	8,95	8,86	-0,08	-0,9 %	8,92	-0,03	-0,3 %
Alimentation animale								
- céréales intraconsommées	(Mt)	11,57	10,96	-0,62	-5,3 %	10,78	-0,79	-6,8 %
- concentrés achetés	(Mt)	11,63	12,23	0,61	5,2 %	12,26	0,63	5,5 %
- grossiers	(Mt)	1,25	1,15	-0,10	-8,0 %	1,15	-0,10	-8,0 %
Effectifs UGB	(MUGB)	19,66	19,54	-0,12	-0,6 %	19,54	-0,12	-0,6 %
Bilan carbone stocké	(Mt)	9,65	9,65	0,00	0,0 %	15,04	5,39	55,8 %
Bilan azote émis	(1 000t)	59,00	59,00	0,00	0,0 %	58,00	-1,00	-1,7 %
Bilan méthane émis	(Mt)	1,72	1,68	-0,05	-2,7 %	1,68	-0,04	-2,6 %
Émissions nettes	(MtCO ₂)	51,53	50,35	-1,19	-2,3 %	44,70	-6,84	-13,3 %
Marge brute	(1 000MF)	121,26	115,06	-6,20	-5,1 %	116,02	-5,24	-4,3 %
Recette fiscale	(1 000MF)	0,00	6,18	6,18	-	5,49	5,49	-
Domage	(1 000MF)	-6,32	-6,18	0,15	-2,3 %	-5,49	0,84	-13,3 %
FEOGA	(1 000MF)	-37,05	-37,14	-0,10	0,3 %	-36,97	0,08	-0,2 %
Total		77,89	77,92	0,02	0,0 %	79,06	1,17	1,5 %

NOTES : 1. Variations absolue et relative par rapport à la référence PAC95.

2. Surface en céréales, oléagineux et protéagineux.

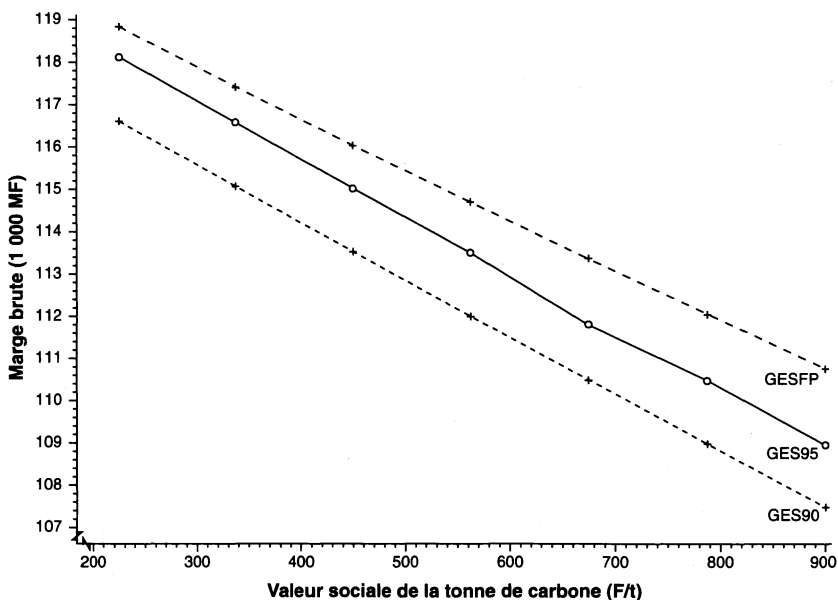
2.3 Analyse de la sensibilité des résultats à la valeur sociale de la tonne de carbone

La valeur sociale de la tonne de carbone intervient dans la modélisation à deux niveaux. Elle permet de traduire en termes monétaires le dommage résultant

des activités agricoles et, dans l'optique de schémas de taxation de premier rang, de fixer le niveau des instruments fiscaux mis en place. Il apparaît important, afin à la fois de valider d'un point de vue technique la modélisation et de fournir un éclairage politique pertinent, de tester la réaction du modèle à différents niveaux de ce paramètre. Dans les scénarios 2, 4 et 5 où des schémas de taxation de premier rang ont été testés, la marge brute du secteur réagit presque linéairement à une variation de la valorisation sociale du dommage dû à une tonne supplémentaire d'équivalent CO_2 , entre 225 F et 900 F (graphique 1). Dans les trois cas, l'augmentation de la prime au stockage ne compense pas la perte de revenu occasionnée par l'augmentation des taxes sur les activités animales et l'utilisation d'engrais azotés. L'ordre des trois scénarios est respecté du point de vue de la marge. La configuration GES90 apparaît très légèrement moins sensible – en termes d'élasticité – à une augmentation de la valeur sociale du dommage.

GRAPHIQUE 1

ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE LA MARGE BRUTE AU PARAMÈTRE
« VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE À EFFET DE SERRE »

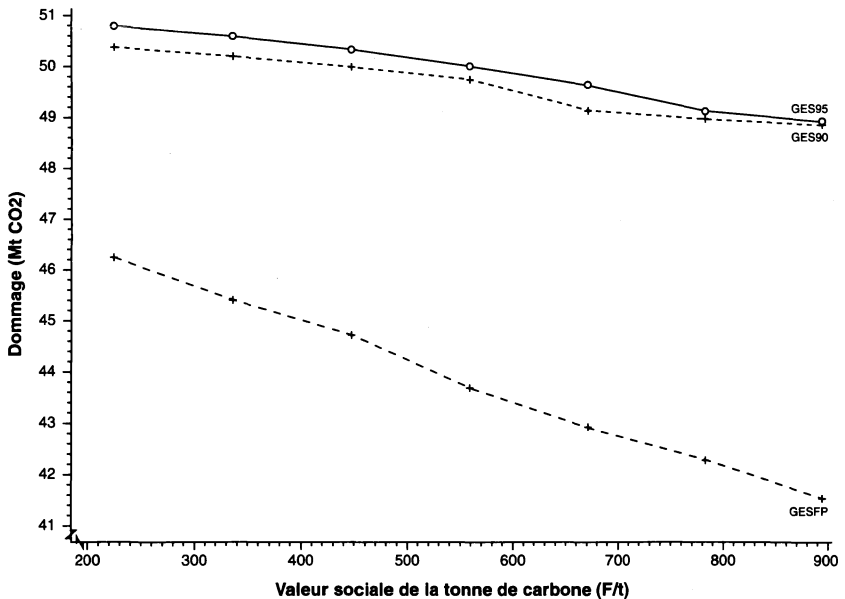


Du côté du dommage (graphique 2), le gain en efficacité du schéma GESFP est nettement plus marqué. En permettant un basculement sensible des jachères vers des productions ligneuses, une valeur élevée de la prime associée au stockage du carbone permettrait une réduction sensible du dommage exprimé en équivalent CO_2 . En revanche, les scénarios GES90 et GES95 tendraient à donner des résultats environnementaux comparables pour une valorisation sociale de 900 F. Un

examen approfondi de la variation des résultats du scénario GESFP due à une variation plus large (de 0 à 2 250 F) de la valorisation du dommage est donné dans le graphique 3. Il indique que pour un niveau de dommage élevé – impliquant des primes élevées au stockage du carbone – la jachère fixe prendrait une place prépondérante dans le total des surfaces gelées aux dépens du gel tournant. Conjugué à une baisse simultanée des émissions de N_2O et de CH_4 – due à une baisse de la part de l'intraconsommation dans l'alimentation animale –, le stockage additionnel de carbone résultant permettrait d'améliorer sensiblement le bilan en GES du secteur.

GRAPHIQUE 2

ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES ÉMISSIONS NETTES TOTALES AU PARAMÈTRE
« VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE À EFFET DE SERRE »

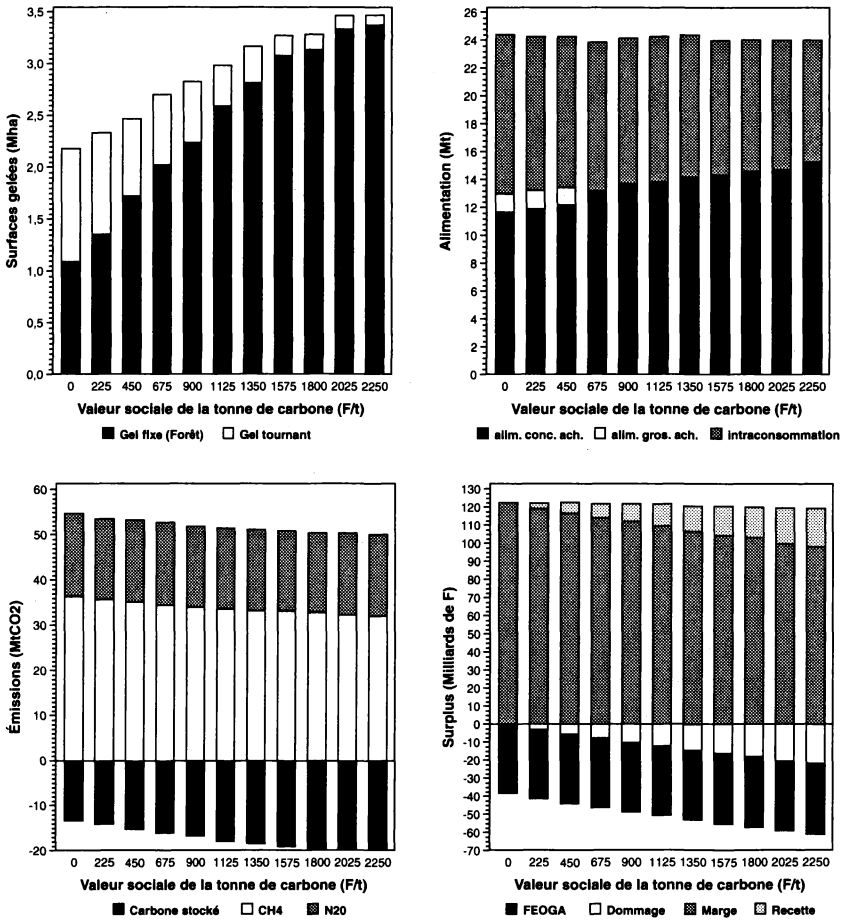


L'analyse des résultats suivants peut être faite à deux niveaux : soit l'on considère que le scénario est maintenu dans son principe, soit l'on considère constant le dommage imputable à une unité supplémentaire de carbone émis. Dans le premier cas, la taxe est équivalente au dommage marginal social. La recette fiscale totale est donc équivalente au dommage social total. Dans le dernier cas, un écart apparaît entre la recette fiscale totale et le dommage total (la taxe ne correspond plus au premier rang)⁹.

9. Pour la compréhension du graphique 3, il convient de rappeler que nous faisons varier *simultanément* la valorisation du dommage et les taxes.

GRAPHIQUE 3

ANALYSE DE SENSIBILITÉ AU PARAMÈTRE « VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE À EFFET DE SERRE » DANS LE SCÉNARIO GESFP SELON QUATRE CRITÈRES : SURFACES GELÉES, ALIMENTATION ANIMALE, ÉMISSIONS, VARIATIONS DE SURPLUS



2.4 Schémas de taxation des facteurs observables et contrôlables

Dans cette section, on teste l'application de schémas de taxation, non plus basés directement sur l'évaluation des émissions par la puissance publique, mais sur les facteurs dont l'utilisation est contrôlable à moindre coût. Les instruments mis en place pénalisent d'une part l'alimentation achetée et d'autre part le capital animal herbivore.

Ces instruments ne correspondant plus à l'optimum de premier rang, il s'ensuit que le dommage n'est plus intégralement compensé par la recette fiscale liée à

l'application des taxes et primes (scénarios ALIFP et ANIFP, tableau 6). Dans les deux cas, la politique de régulation se traduit par une réduction importante de l'activité animale et par une baisse de la marge brute. Associés à une baisse de tous les postes de dépenses en alimentation, les scénarios ANIFP et ALIFP permettent une réduction supplémentaire des émissions de méthane par rapport au scénario GESFP. Par ailleurs, la réallocation des activités végétales s'effectue au bénéfice des grandes cultures et aux dépens de la jachère fixe, réduisant ainsi les possibilités de stockage de carbone.

TABLEAU 6

COMPARAISON DES SCÉNARIOS ALIFP ET ANIFP PAR RAPPORT À LA RÉFÉRENCE GESFP (HYPOTHÈSE D'UNE VALEUR SOCIALE DE LA TONNE DE CARBONE DE 450 F)

	Unité	GESFP	ALIFP	Δ^1	ANIFP	Δ^1		Δ^1
Céréales	(Mha)	7,16	7,36	0,20	2,8 %	7,44	0,27	3,8 %
SCOP hors gel ²	(Mha)	9,98	10,23	0,25	2,5 %	10,29	0,31	3,1 %
Gel tournant primé	(Mha)	0,74	0,91	0,17	22,7 %	0,84	0,10	13,2 %
Gel fixe primé (forêt)	(Mha)	1,72	1,60	-0,12	-7,1 %	1,65	-0,07	-4,2 %
Fourrages et prairies	(Mha)	8,92	8,60	-0,32	-3,6 %	8,56	-0,36	-4,0 %
Alimentation animale								
– céréales intraconsommées	(Mt)	10,78	9,82	-0,96	-8,9 %	9,85	-0,93	-8,7 %
– concentrés achetés	(Mt)	12,26	9,74	-2,52	-20,6 %	10,05	-2,21	-18,0 %
– grossiers	(Mt)	1,15	0,88	-0,27	-23,3 %	0,95	-0,20	-17,4 %
Effectifs UGB	(MUGB)	19,54	18,41	-1,13	-5,8 %	18,36	-1,18	-6,0 %
Bilan carbone stocké	(Mt)	15,04	14,58	-0,46	-3,0 %	14,73	-0,31	-2,1 %
Bilan azote émis	(1 000t)	58,00	58,00	0,00	0,0 %	59,00	1,00	1,7 %
Bilan méthane émis	(Mt)	1,68	1,57	-0,11	-6,4 %	1,57	-0,10	-6,1 %
Émissions nettes	(MtCO ₂)	44,70	42,55	-2,14	-4,8 %	42,66	-2,04	-4,6 %
Marge brute	(1 000MF)	116,02	114,00	-2,02	-1,7 %	113,28	-2,74	-2,4 %
Recette fiscale	(1 000MF)	5,49	0,68	-4,81	-87,6 %	3,18	-2,31	-42,1 %
Domage	(1 000MF)	-5,49	-5,22	0,26	-4,8 %	-5,24	0,25	-4,6 %
FEOGA	(1 000MF)	-36,97	-36,34	0,62	-1,7 %	-36,75	0,22	-0,6 %
Total		79,06	73,12	-5,94	-7,5 %	74,48	-4,58	-5,8 %

NOTES : 1. Variations absolue et relative par rapport à la référence GESFP.

2. Surface en céréales, oléagineux et protéagineux.

La différence majeure entre les résultats des simulations concernant ces deux scénarios réside dans la part du dommage effectivement couvert par la recette fiscale. La taxation du capital animal, telle qu'elle a été décrite à la section 1.4, permet de dégager une recette fiscale qui, si elle ne couvre pas entièrement le dommage, demeure plus importante que dans le cas d'une taxation de l'aliment.

La taxation de l'alimentation n'est assise que sur les consommations intermédiaires achetées. Elle favorise la substitution d'une partie de l'alimentation achetée par l'intraconsommation, cette dernière étant plus méthanogène. L'adoption d'un taux plus élevé de taxe frappant l'alimentation achetée aurait d'ailleurs pour conséquence de renforcer ce phénomène. La taxe sur le capital animal présente l'intérêt, pour sa part, d'affecter toutes les sources d'émissions de méthane. La contrepartie de ce schéma est de pénaliser plus durement le produit brut animal, et donc le revenu agricole.

CONCLUSION

Les simulations effectuées reposent sur un certain nombre d'hypothèses dont il convient de mesurer l'importance dans l'analyse des résultats. Il est clair que la réalité des mécanismes chimiques et biologiques est plus complexe que la spécification simplifiée retenue dans le modèle. En particulier, le niveau des émissions *ex post* est contingent à la réalisation de variables aléatoires telles que les conditions atmosphériques qui ne sont pas prises en compte (raisonnement en « année moyenne »).

L'échelle du modèle utilisé, le niveau d'agrégation et les données dont nous disposons n'ont pas toujours permis d'introduire des formulations associées aux émissions qui soient différenciées selon le type de sol ou la conduite de l'exploitation (irrigation ou acidité des sols, pour les émissions de N_2O par exemple). Par ailleurs, le modèle retenu décrit la consommation d'engrais comme une quantité constante par unité de surface pour une culture et un groupe donnés. Le relâchement de l'hypothèse de fixité des rendements permettrait de rendre compte de l'adoption de pratiques culturales plus contrastées. Un amendement du modèle en ce sens est théoriquement réalisable, sous réserves de données agronomiques disponibles.

D'autres sources de pollution n'ont pas été prises en compte par manque d'information. C'est par exemple le cas des dégagements de méthane et d'azote dus aux déjections animales. L'importance de ce type d'émissions est fortement liée à leur mode de traitement (Martinez *et al.*, 1995). Les effets en retour du changement climatique sur la production agricole n'ont également pas été pris en compte. Cette hypothèse se justifie aisément du fait de la différence importante entre le délai de réalisation du dommage et les échéances fixées par les accords internationaux.

Néanmoins, les simulations effectuées montrent l'intérêt de l'introduction d'une rémunération spécifique de l'activité « forêt » qui viendrait en complément des marges d'exploitation privées et des primes liées à la Politique Agricole Commune. Sur le plan environnemental, une telle mesure permettrait en effet un stockage de carbone important et durable, relativement facilement contrôlable et compatible avec d'autres objectifs environnementaux. Ce résultat est confirmé par l'analyse de sensibilité effectuée. Elle pourrait par ailleurs s'intégrer dans la

politique européenne de retrait des terres et de maîtrise de la production¹⁰. L'adoption de primes de cette nature doit aller de pair avec des mesures d'incitation à réduire les émissions de méthane et d'azote pour que le coût de la politique de régulation ne soit pas financé par un déficit budgétaire. De plus, elle doit s'inscrire dans une logique de long terme, permettant de fournir des signaux économiques clairs afin que les agents décident de manière décentralisée de retenir ce type d'activité.

Compte tenu de l'effet d'évitement imputable aux consommations intermédiaires qui ne passent pas par le marché, nous montrons que la puissance publique a intérêt à taxer l'animal plutôt que l'aliment. Le niveau d'intraconsommation de céréales et de fourrages destiné à l'alimentation animale est donc déterminant. Il apparaît comme le frein principal vis-à-vis d'une politique de taxation des sources du méthane d'origine agricole. L'incitation au reboisement apparaît enfin comme l'instrument le plus pertinent permettant d'améliorer le bilan en carbone. Il est en particulier intéressant pour un pays, bridé par un niveau d'émission par habitant relativement faible et peu mobile, d'adopter des incitations de cette nature. Ce fut d'ailleurs l'un des enjeux de la Conférence de Kyoto que de comptabiliser ce type de stockage.

10. Ce dernier point est en partie à nuancer. À court terme, l'une des réformes de la PAC envisage la suppression de l'obligation de jachère.

ANNEXE

1. PRÉSENTATION DU MODÈLE

1.1 Principes généraux

L'objectif du modèle utilisé est de traduire les choix annuels de production des agriculteurs à l'échelle de la France en tenant compte de la rationalité économique des agents, de la diversité des contraintes techniques et des mesures réglementaires liées à la Politique Agricole Commune. L'ensemble des activités correspond à la fois à des activités substituables les unes aux autres et à des activités induites par le mode de régulation publique (Organisation Commune de Marché). Formellement, le producteur k ajuste son offre et ses demandes dérivées de facteurs (x^k) en maximisant sa marge (π^k) tout en respectant les contraintes liées à sa production ($A^k \cdot x^k \leq z^k$). Le programme du producteur k s'écrit alors :

$$\max_{x^k} \pi^k(x^k; \theta^k, \phi) \equiv \sum_{f \in F} (p_f - c_f^k) x_f^k - \sum_{h \in H} c_h x_h^k + \sum_{i \in I} p_i x_i^k - \sum_{j \in J} c_j x_j^k,$$

$$\text{s.c. } A^k(\theta^k, \phi) \cdot x^k \leq z^k(\theta^k, \phi) \quad A \in \mathfrak{R}^{m \times n}$$

$$\text{et } x^k \geq 0 \quad x \in \mathfrak{R}^n$$

avec F : ensemble des productions végétales destinées à la ventes;

H : ensemble des productions végétales susceptibles d'être autoconsommées;

I : ensemble des productions animales;

J : ensemble des aliments achetés (aliments simples, composés et grossiers).

Les coefficients de ces programmes linéaires en x^k dépendent de paramètres exogènes généraux (ϕ) et/ou spécifiques au producteur k (θ^k). La fonction objectif de ce programme dépend notamment des prix de ventes (p) et des charges variables (c^k).

1.2 Données

Les estimations des paramètres θ^k (charges variables et rendements par culture, ressources déterminant les facteurs quasi fixes et parts de surface admissibles) et ϕ (prix des produits et taxes/prime à la production, paramètres relatifs à la politique agricole) reposent sur des données micro-économiques extraites du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA). Ces données comptables nous renseignent sur environ 7 000 exploitations représentatives de plus de 560 000 exploitations françaises – soit environ 80 % des exploitations « professionnelles ». Les techniques d'estimation utilisées relèvent de modèles de covariance, et plus généralement, de modèles linéaires simples. La typologie des exploitations est fondée sur une classification ascendante hiérarchique appliquée à des données micro-économiques ou agrégées. À partir des rendements agricoles et des parts de surface, on obtient un découpage régional du territoire (19 régions).

En croisant ces données avec l'orientation économique des exploitations (OTEX), on aboutit à une partition des exploitations en 82 groupes homogènes du point de vue de critères à la fois pédo-climatiques et technico-économiques. Enfin, chacun de ces groupes est divisé en sous-groupes homothétiques de leur groupe d'origine dans le rapport de leurs ressources en terre. Ce dernier point permet de tenir compte des effets de seuil relatifs à la PAC. C'est au total 691 programmes linéaires qui sont résolus et dont les résultats sont agrégés compte tenu des effectifs de chacun des sous-groupes.

1.3 *Activités*

1.3.1 *Activités végétales*

Le producteur k choisit les surfaces allouées aux différentes cultures végétales dans la limite des parts de surface admissibles. Les activités végétales autorisées dans le modèle sont les surfaces en céréales, oléagineux, protéagineux, betteraves, fourrages et autres cultures destinées à la vente (soit 14 productions végétales). Les différents systèmes de gel (gel primé ou volontaire, jachère fixe ou tournante) inclus dans les dispositions de la PAC conduisent à autant d'activités supplémentaires. L'exclusivité des différentes options est prise en compte par l'introduction de variables binaires.

1.3.2 *Activités animales*

Les activités génériques de production animale sont au nombre de 38 (bovins, volailles, ovins et caprins). Parmi ces activités, les productions bovines (34 activités) font l'objet d'un niveau de résolution particulièrement fin. Un module démographique traduit les ajustements entre les différentes catégories de ces animaux. Par ailleurs, certains effectifs animaux sont assimilés à un capital quasi fixe. Leur variation relative est donc limitée de façon exogène pour chaque groupe (le coefficient d'ajustement est limité à 15 % du capital initial dans les simulations présentées).

1.3.3 *Alimentation animale*

Les activités relatives à l'alimentation animale consistent d'une part en intracommunication (céréales ou fourrages produits sur l'exploitation) et d'autre part en aliments achetés simples ou composés. Des contraintes nutritionnelles traduisent les apports minimaux que doit respecter l'exploitant pour chaque type d'animal compte tenu des caractéristiques différenciées des aliments (protéines, énergie, digestibilité).

1.4 *Contraintes*

La maquette qui représente l'ensemble de production type regroupe les contraintes de production en 5 sous-ensembles : les contraintes d'assolement, les

contraintes d'alimentation animale, les contraintes de disponibilité en facteurs quasi fixes et de capacité (terre, capital animal), le module de démographie bovine, les contraintes nées de la PAC.

1.5 Calibrage

L'estimation obtenue, θ_0 , en première étape est considérée comme une valeur initiale d'une méthode d'estimation utilisant plus d'information (c.-à-d. le calibrage). Elle consiste en un ajustement des paramètres *préestimés* afin de rapprocher le niveau optimal x^{*k} des activités obtenu en situation de référence et le niveau x_0^k des valeurs observées pour ces activités dans une telle situation. Le programme pour un groupe k donné est le suivant :

$$\min_{\theta^k} |x^{*k}(\theta^k, \phi) - x_0^k|^2,$$

s.c. $\theta \in \Theta$.

La résolution de ce programme repose sur une combinaison de méthodes de type Monte-Carlo et d'algorithmes de gradient, une solution initiale pour chaque programme linéaire étant obtenue à partir des valeurs initialement estimées des paramètres, éventuellement complétées par un programme d'expertise en cas de défaut d'observation ou de valeur aberrante des paramètres. L'ensemble Θ limite les valeurs possibles pour θ^k .

BIBLIOGRAPHIE

- BALESSENT, J. (1995), « Stockage de carbone dans les sols en fonction de leur utilisation », *Dossiers de l'Environnement*, 10 : 39-47, INRA, Délégation permanente à l'environnement.
- BARDE, J.-P., et SMITH, S. (1997), « Environnement : les instruments économiques sont-ils efficaces? », *L'Observateur de L'OCDE*, 192.
- BEAUMAIS, O., et BRÉCHET, T. (1995), « La stratégie communautaire de régulation de l'effet de serre : quels enjeux pour la France? », *Économie et Prévision*, 117 : 155-170.
- BOUWMAN, A.-F. (1989), « The Role of Soils and Land Use in the Greenhouse Effect », Working paper, ISRIC, Wageningen, The Netherlands.
- BREMNER, J.-M., et BLACKMER, A.-M. (1981), « Terrestrial Nitrification as a Source of Atmospheric Nitrous Oxide », in DELWICHE C.C.(éd.), *Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide*, p. 151-170, Wiley & Sons.
- DE CARA, S. (1997), *Régulation économique de l'effet de serre, le cas du secteur agricole*, Mémoires et Thèses n° 26, Économie et Sociologie Rurales, INRA, Grignon, France.
- GERMON, J.-C., et HENAULT, C. (1995), « Processus d'émissions de méthane et d'oxydes d'azote gazeux par les sols. Évolution, quantification, spatialisation », *Dossiers de l'Environnement*, 10, INRA, Délégation permanente à l'environnement.
- HAUGHLAND, T., OLSEN, O., et ROLAND, K. (1992), « Are Carbon Taxes a Viable Option? », *Energy Policy* : 405-419.
- HENRY, C. (1989), *Microeconomics for Public Policy*, Clarendon Press, Oxford.
- HOELLER, P., DEAN, A., et HAYAFUJI, M. (1992), « New Issues, New Results: the OECD's Second Survey of Macro-economic Costs of Reducing CO₂ Emissions », Working Paper n° 123, Organisation de Coopération et de Développement Économique, Paris.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1995a), « The Science of Climate Change », in HOUGHTON, J., MEIRA FILHO, L., CALLANDER, B., HARRIS, N., KATTENBERG, A., et MASKELL, K. (éds), *Climate Change 1995, Contribution of Working Group I to the 2nd Assessment of the IPCC*, Cambridge University Press.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1995b), « Economic and Social Dimensions of Climate Change », in BRUCE, J., LEE, H., et HAITES, E. (éds), *Climate Change 1995, Contribution of Working Group III to the 2nd Assessment of the IPCC*, Cambridge University Press.
- JARRIGE, R. (éd.) (1988), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, INRA.
- JAYET, P.-A., BIRFET, A., et HOFSTETTER, A. (1998), « Forêt paysanne et PAC : une évaluation des impacts d'une incitation au reboisement », *Cahiers d'Économie et de Sociologie Rurales*, 48 : 5-35.

- JAYET, P.-A., DE CARA, S., BIRFET, A., et LE MOGUÉDEC, G. (1997), « De l'agriculture et de l'élevage à l'effet de serre, impact de la régulation économique », Études et Documents n° 30, étude réalisée pour le compte de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre (MIES), Économie et Sociologie Rurales, INRA, Grignon, France.
- LARSON, D. M., HELFAND, G. E., et HOUSE, B. W. (1996), « Second-Best Tax Policies to Reduce Nonpoint Source Pollution », *American Journal of Agricultural Economics*, 78,4 : 1108-1117.
- MARTINEZ, J., GUIZIOU, F., et GUEUTIER, V. (1995), « Émissions de méthane au cours du stockage des déjections animales », Contrat INRA-Cemagref n° 2710 A, Programme ECLAT.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (1997), « Seconde communication à la convention cadre sur le changement climatique », mimeo, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Paris, France.
- NORDHAUS, W. D. (1993), « Rolling the DICE: An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases », *Resource and Energy Economics*, 15 : 27-50.
- OCDE (1989), *Politiques de l'agriculture et de l'environnement : possibilités d'intégration*, Organisation de Coopération et de Développement Économique, Paris.
- PIGOU, A. (1932), *The Economics of Welfare*, Fourth Edition, MacMillan and Co.
- SAUVANT, D., GIGER-REVERDIN, S., et TREGARO, Y. (1996), « Quantification de la production de méthane par les ruminants », Document de travail, Laboratoire de Nutrition et d'Alimentation INRA de l'INA-PG, Paris, France.
- SNIE (1995), *Les livraisons d'engrais en France, Exercice 95-96*, Syndicat National de l'Industrie des Engrais, Ministère de l'Agriculture, SCEES.
- TAVERDET-POPIOLECK, N. (1998), « La consommation d'engrais azotés en France : une prospective pour 2010 », *Cahiers d'Économie et de Sociologie Rurales*, 46/47 : 30-69.
- TIETENBERG, T. (1990), « Economic Instruments for Environmental Regulation », *Oxford Review of Economic Policy*, 6,1 : 24.
- TROISIÈME CONFÉRENCE DES PARTIES (1997), Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, Document officiel, CCNUCC.
- VERMOREL, M. (1995), « Émissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production », Productions animales, INRA, France.