

*Rapport final de travaux
relatif à la convention de recherche INRA - Médias-France
(n°INRA A01663)*

dans le cadre du programme :
**GESTION DES IMPACTS DU CHANGEMENT
CLIMATIQUE
PROGRAMME GICC APR 2001**

**TITRE DU PROJET : Spatialisation des impacts de la régulation
économique de l'effet de serre d'origine agricole**

COORDINATEUR : Jayet Pierre-Alain

UMR Economie Publique INRA-INAPG

BP01

Centre INRA de Versailles - Grignon

78850 Grignon

Tel 01 30 81 53 49 – Fax 01 30 81 53 68

E-mail jayet@grignon.inra.fr

Février 2004

|

A - Objectifs et programme initial de travail

Les objectifs initiaux du programme de recherche étaient résumés de la façon suivante lors du dépôt du projet au printemps 2001 :

Entre d'une part les modèles macro-économiques théoriques généraux portant sur les pollutions globales et la croissance, d'autre part les modèles physiques à l'échelle la plus fine, il y a place pour des évaluations sectorielles à des échelles en phase avec les prises de décision concernant les politiques de régulation économique des externalités. Le projet « Spatialisation des impacts de la régulation économique de l'effet de serre d'origine agricole » s'inscrit dans cet intervalle disciplinaire et spatial.

Le projet s'appuie sur un modèle sectoriel de l'offre agricole, fondé sur la programmation mathématique et l'optimisation, et opérationnel à l'échelle de l'Union Européenne. Il est conçu de façon modulaire, permettant d'intégrer des modules de liaison entre la production et l'environnement, et adapté à différentes échelles d'analyse - groupes types de producteurs, régions, Etats membres de l'Union Européenne.

La recherche appliquée qui est ici proposée vise d'une part à faciliter l'échange de données entre modèles ou données économiques et modèles ou données biophysiques, et d'autre part à systématiser un mode de représentation des résultats des analyses économiques plus orienté vers les utilisateurs potentiels étrangers vis à vis des modèles. Cette fluidité des informations et cette visualisation des résultats est proposée à partir de systèmes d'information géographique qu'il s'agira d'adapter à l'étude des émissions d'effet de serre d'origine agricole.

Les trois volets du projets sont (i) une inflexion des méthodes d'analyse économique et de modélisation en cours de développement vers une approche plus homogène de l'agriculture communautaire, (ii) une acquisition d'informations et de références techniques et physiques en phase avec l'information économique disponible (le Réseau d'information comptable agricole de l'UE), (iii) la mise au point d'une interface informatique permettant une approche intégrée des références et des résultats en matière de production économique et de critères environnementaux au premier rang desquels nous placerons l'effet de serre.

B - Résumé

Résumé français

Ce rapport aborde les questions liées aux impacts de la régulation économique des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole dans leur dimension spatiale. L'objectif général est de trouver un compromis entre des approches macro-économiques agrégées ne rendant pas compte de la variabilité géographique des sources et des coûts d'abattement et des modèles physiques travaillant à des échelles limitées dans l'espace.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet s'appuient principalement sur l'utilisation d'un modèle sectoriel de l'offre agricole européenne de nature micro-économique et fondé sur la programmation mathématique et l'optimisation. La prise en compte de la dimension spatiale passe par l'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) qui permettent une intégration spatiale des résultats des modèles économiques utilisés.

Ces travaux reposent tout d'abord sur une évaluation complète des bilans d'émissions de méthane et de protoxyde d'azote d'origine agricole pour l'ensemble de l'union Européenne à l'échelle des régions RICA (échelle à laquelle sont disponibles les données alimentant le modèle d'offre agricole). Ces évaluations permettent ainsi de mesurer l'offre de réduction d'émissions par le secteur agricole, et donc les coûts marginaux d'abattement dans un contexte de premier rang (simulation d'une taxe sur les émissions). L'hétérogénéité de ces coûts est explorée à la fois au niveau régional (spatialisé) et au niveau individuel (non spatialisé). Nos résultats montrent que l'hétérogénéité des coûts d'abattement est une dimension à prendre en compte dans la définition des politiques publiques. Les instruments de type quotas uniformes (non échangeables) entraînent en effet un surcoût d'autant plus important que l'hétérogénéité des coûts d'abattement est grande. Nos travaux permettent d'évaluer ce surcoût dans le cas des émissions de GES d'origine agricole.

L'analyse à l'échelle infrarégionale fait appel au croisement des simulations obtenues grâce au modèle économique et de bases de données géo-référencées traitées grâce à des SIG. Ce croisement permet de répartir une information disponible à un niveau agrégé (région RICA) à une échelle plus fine. Les analyses dans ce sens dans le cadre de ce projet ont été menées sur une région-test en croisant les données d'utilisation des sols de Corine Land Cover et la typologie issues des données du RICA.

Enfin, la question de la séquestration du carbone a été aussi abordée à l'échelle infra-régionale en intégrant à la fois la dimension spatiale et la dimension dynamique. Cette analyse repose sur l'utilisation d'un modèle micro-économique dynamique d'utilisation des terres, croisé à une base de données géo-référencée des caractéristiques des sols et un modèle de comptabilisation du carbone. Nous estimons les coûts associés à la séquestration du carbone permise par le passage de cultures annuelles à des cultures énergétiques pluriannuelles, qui permettent un stockage plus important sur un temps plus long.

Résumé anglais

—This report addresses the issue of the spatialisation of the impacts of greenhouse gas mitigation policies in the agricultural sector. Generally speaking, the objective is to reach a compromise between large-scale macro-economic modelling approaches – which often overlook the spatial variability of emissions and abatement costs – and field-scale biophysical modelling approaches.

The studies carried out in the course of this project rely for the most part on a supply-side oriented economic model of the EU agriculture based on micro-economic concepts, mathematical programming and optimization. The analysis of spatial implications of GHG mitigation policies relies on the use of Geographic Information Systems (GIS), which allows for spatial integration of the results provided by the economic model.

We first carry out a comprehensive assessment of the emission sources of methane and nitrous oxide for the EU agriculture at a regional scale (FADN regions, scale at which data that feed the economic model are available). The abatement supply from the agricultural sector is derived from this assessment by simulating the impact of a first-best instrument (namely an emission tax). We therefore estimate the marginal abatement cost curves for all sources and at the farm-type level. The heterogeneity of abatement costs is discussed both at the regional scale (spatially defined) and at the farm-type level (non spatially-defined). Our results show that the spatial heterogeneity of abatement costs is of crucial importance in the design of GHG mitigation policies. The greater is the heterogeneity of abatement costs, the larger is the efficiency loss associated with non incentive-based instruments. We estimate this efficiency loss in the case of uniform quotas.

Downscaling the economic and environmental results from the FADN-region scale to a finer scale requires the linking of the simulation results with geo-referenced databases and GIS tools. This has been carried out for a test-region by linking land-use data from Corine Land Cover and the typology from the FADN database.

Issues related to carbon sequestration have also been addressed at an infra-regional scale, including both spatial and dynamic dimensions. This analysis relies on the use of micro-economic, dynamic land-use model, a geo-referenced database of soils characteristics and a carbon accounting model. We estimate the costs of carbon sequestration when switching from annual crops to pluri-annual energy crops, which allow higher carbon sequestration rates for a longer period of time.

C - Travaux réalisés

Les trois volets ont été abordés de façon inégale mais nous avons pu progresser de façon significative sur chacun d'entre eux. La progression est due à la synergie qui a pu être opérée entre le programme GICC et des programmes ou des conventions de recherche passés en particulier avec la Commission Européenne. L'effet de levier d'un projet initialement modeste (42 k€) a joué. La progression est aussi due à la participation significative de collègues et de stagiaires qui n'étaient pas tous inscrits dans la liste des personnes initialement identifiées. Outre Stéphane De Cara, Laure Bamière et Pierre-Alain Jayet, l'UMR d'Economie Publique est impliquée avec Stelios Rozakis (Chercheur contractuel), Martin Houzé (stagiaire du DEA Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles), Stefano Casalegno et Caroline Godard (Ingénieurs CDD). L'unité DMOS de Sciences du Sol de l'INA a été impliquée avec Jean-Marc Gilliot (Maître de Conférence) et Florence Carré (doctorante).

Outre les mémoires d'étudiants, en particulier celui de Martin Houzé, ces travaux ont été valorisés par des participations à des congrès et des articles sont soumis à des revues scientifiques. Ils nous ont donné une visibilité supplémentaire dans des réseaux européens, ce qui s'est traduit en particulier par un rôle de partenaire important dans un STREP (INSEA, portant sur le stockage du carbone et l'abattement des émissions concernant les terres agricoles et forestières) en réponse au premier appel d'offre lancé dans le cadre du 6^{ème} PCRD de l'Union Européenne.

Nous résumons ici ce qui a été réalisé, en rapport avec ce qui été annoncé.

1^{er} volet : approche homogène de l'agriculture européenne

L'opportunité d'un travail réalisé pour le compte de la Commission Européenne en 2001 et 2002 a bousculé le programme prévisionnel, avec la mise au point accélérée d'une version « UE-15 » du modèle AROPAj (contrat intitulé « AROPAj Model to estimate the impacts of changes in CAP » 2001, extension et complément en 2002).

Cela n'a été possible que grâce à la mise à disposition rapide des données extraites du RICA européen. La dernière campagne d'observations validée début 2001 par les services statistiques d'Eurostat pour l'ensemble des Etats membres concerne des données de l'année 1997.

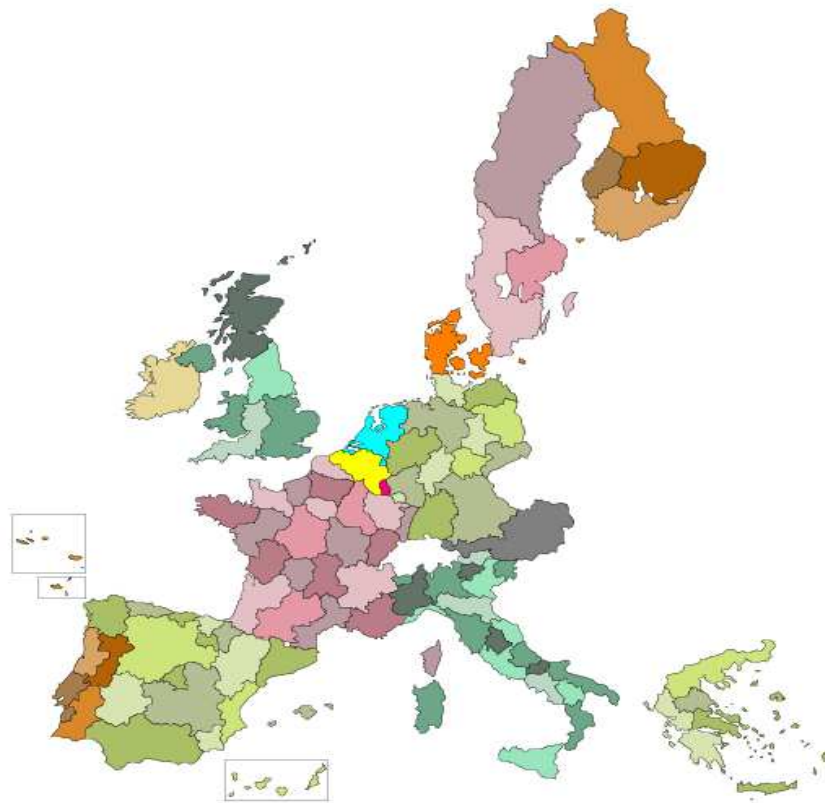


Figure 1. régions « RICA » de la version UE-15 du modèle AROPAj

La maquette du modèle, qui lui confère une certaine généralité, est améliorée. La typologie finalement retenue comporte 734 exploitations virtuelles types réparties sur les 101 régions (parmi les 104 régions RICA (à l'échelle « NUTS-2 » mais non superposable pour un certain nombre de pays) auxquelles on retire les trois villes-Etat allemandes) des 15 Etats membres de l'UE (voir la carte sur la figure 1).

Un aperçu de la typologie est donné par le tableau présenté dans le 3^{ème} volet ci-dessous. Il concerne les régions nord de la France. L'altitude qui est mentionnée fait référence aux trois niveaux saisis par le RICA. Dans les cellules affectées à chacun des groupes types, figurent les tailles des échantillons (i.e. le nombre d'exploitants agricoles enquêtés).

L'ensemble des opérations d'estimation des paramètres et de calibrage ont été conduites de façon automatique par des procédures informatiques (CShell Unix et FORTRAN) développées à l'occasion.

Suite aux travaux réalisés pour la Commission Européenne, une approche stylisée de l'accord de Berlin (Agenda 2000) permet d'intégrer l'évolution récente de la PAC dans le modèle.

Enfin, un nouveau module de calcul des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole a été inséré dans le modèle (voir le 2^{ème} volet ci-dessous). Il vient d'être activé (janvier 2004). Les résultats présentés ci-dessous reposent pour partie sur cette version, mais également sur des versions préliminaires développées depuis un an. Les derniers résultats obtenus diffèrent quelque peu des résultats établis par Martin Houzé. Il convient évidemment d'en tenir compte au moment de leur interprétation et de leur exploitation.

2^{ème} volet : acquisition d'informations sur les émissions compatibles avec le modèle AROPAj et les données micro-économiques

Il a fallu remettre à plat le module « calcul des émissions » de façon à permettre de traiter d'égale manière l'ensemble des groupes types de producteurs (voir le [1^{er} 2^{ème}](#)-volet), en nous appuyant sur les données physiques communément admises à l'échelle internationale. Les méthodes intégrées dans les versions antérieures du modèle (voir par exemple le programme précédemment développé en 1999-2001 sur appel d'offre GICC), privilégiaient des relations techniques trop particulières ou dépassées, alors que les méthodes préconisées par l'IPCC n'étaient retenues qu'à un stade embryonnaire. Dorénavant, nous nous appuyons uniquement sur les méthodes préconisées par l'IPCC, par souci d'homogénéité entre les pays, et parce que ces méthodes (qui peuvent ne pas conduire aux meilleures évaluations) sont communément admises par tous les Etats.

Ceci nous a conduit à privilégier les techniques de comptabilité et les liens entre émissions et activités issus directement des rapports de l'IPCC. Les émissions estimées dépendent donc de l'allocation des terres entre les différentes spéculations agricoles, des amendements en azote minéral ou organique, des activités de l'élevage (animaux et aliments) et de la gestion des effluents.

Du point de vue pratique, cela nous a obligés à repenser la nomenclature des paramètres (plusieurs dizaines de séries), et des activités primales (i.e. les émissions) et duales (les bilans ou contraintes associés) des programmes d'optimisation qui sous-tendent le modèle.

Pour améliorer le modèle et la cohérence entre les modules, un module associé à l'épandage des effluents d'élevage est en cours d'élaboration. Les paramètres propres aux évaluations des émissions de GES liées à la gestion des effluents ont été intégrés de façon à les rendre pertinente même si le module « épandage » n'a pas encore été définitivement validé.

Les 21 postes d'évaluation des émissions que nous intégrons dans le modèle à partir des méthodes de l'IPCC sont :

(01)	N2O	Agr soils	Direct em. synthetic fertilizers
(02)	N2O	Agr soils	Direct em. manure application
(03)	N2O	Agr soils	Direct em. by N fixing crops
(04)	N2O	Agr soils	Direct em. by crops residues
(05)	N2O	Agr soils	Animal production (pasture,...)
(06)	N2O	Agr soils	Indirect em. N atmosph. redeposition
(07)	N2O	Agr soils	Indirect em. N from leaching
(08)	N2O	Manure management	
(09)	CH4	Manure management	Dairy cattle
(10)	CH4	Manure management	Non-dairy cattle
(11)	CH4	Manure management	Sheep
(12)	CH4	Manure management	Goats
(13)	CH4	Manure management	Swine
(14)	CH4	Manure management	Poultry
(15)	CH4	Rice cultivation	
(16)	CH4	Enteric fermentation	Dairy cattle
(17)	CH4	Enteric fermentation	Non-dairy cattle
(18)	CH4	Enteric fermentation	Sheep
(19)	CH4	Enteric fermentation	Goats
(20)	CH4	Enteric fermentation	Swine
(21)	CH4	Enteric fermentation	Poultry

Tableau 1. Postes détaillés dans les émissions de GES d'origine agricole.

Un important travail sur les données à été conduit, qui consiste à collecter les informations les plus fiables aux échelles spatiales adaptées (le plus souvent à l'échelle nationale). Ces données ont été recueillies à partir des derniers rapports de l'IPCC, publiés en 2001 [et des dernières communications nationales des Etats Membres dans le cadre de la CCNUCC](#).

Cet ensemble d'informations, utilisé par le modèle AROPAj sous la forme de fichiers ASCII construits pour chacun des Etats membres, sera rendu accessible à des utilisateurs externes via une base de données élaborée autour du modèle et du groupe de programmes de recherche qui lui sont associés (MIRAjE). Cette base de données est en cours de développement dans le cadre d'un autre programme GICC (APR 2002, programme 2003-2005).

Par contre, ce que nous aurions aimé réaliser en terme de séquestration du carbone dans les sols agricoles, et en matière de changement d'utilisation des sols agricoles avec l'introduction des productions ligneuses n'a pas abouti. Stefano Casalegno, embauché à cet effet dans le cadre du programme n'a pas eu les moyens de progresser significativement dans cette direction.

Mais ce point fait partie du programme européen INSEA (mentionné par ailleurs) qui démarre le 1^{er} janvier 2004 pour une durée de 30 mois, coordonné par l'IIASA (Laxenburg, Autriche).

3^{ème} volet : élaboration de résultats et approche géographique

Deux types de travaux ont été conduits.

Approche européenne statique à partir du modèle AROPAj :

Le premier s'appuie sur le modèle AROPAj et traite des coûts d'abattement des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole (N₂O et CH₄), ainsi que des disparités entre les ~~r~~Régions de l'Union Européenne. Ce travail s'appuie sur le stage de Martin Houzé, même si depuis la fin du stage la remise à plat du modèle et des données a conduit à des résultats modifiés et validés. Ces résultats ~~font~~ont fait l'objet d'une présentation au ~~congrès australien précédemment cité~~48th Australian Agricultural and Resource Economics Society (AARES) Conference. Ils devraient faire l'objet d'un article soumis à une revue scientifique.

Les résultats détaillés sont présentés dans la section suivante. On peut les résumer en partant d'un effort de réduction des émissions de GES de 8%, effort qui serait celui de l'Union Européenne tous secteurs et tous pays (UE-15) confondus si l'accord de Kyoto devait se traduire dans les faits. Un instrument de régulation de type « prix », tel qu'une taxe sur les émissions, devrait être proposé à un niveau élevé pour que la cible puisse être atteinte, plus de 50€/t_CO₂. Une taxe uniforme conduirait à des niveaux d'abattement très hétérogènes, et des gains substantiels d'efficacité seraient obtenus par l'instauration de marchés de droits d'émission. Cette approche « primale de premier rang » est complétée par une approche « duale » par l'instauration de quotas virtuels d'émissions individuelles. On peut alors tirer partie de la distribution des réductions d'émission à prix donné, et de la distribution des coûts marginaux d'abattement pour un effort relatif donné. Le fait de passer d'une approche par groupe type à une approche régionale se traduit par un effet significatif de concentration des coûts marginaux d'abattement, concentration qui serait évidemment encore plus forte si la comparaison des coûts se faisait sur une base nationale. Cette concentration se traduit aussi par des biais d'agrégation qui pourrait rendre plus coûteuse et incertaine une politique de réduction des émissions fondées sur des estimations agrégées des coûts de réduction.

Situons nous enfin à l'autre extrémité en matière de localisation des productions et des émissions relatives. Nous avons pour ce faire exploité une définition très restreinte des systèmes de culture représentés par le modèle, pour la mettre en relation avec une information géographique d'occupation du sol.

Deux grands types de systèmes de culture, « cultures » et « prairies », ont été affectés aux fermes définies par la typologie. Une méthode statistique simple a permis cette discrimination puis cette localisation (voir § D - 2^{ème} analyse : Approche spatiale de la régulation des émissions de GES). Elle est basée sur la comparaison des surfaces des productions végétales des groupes à celles occupées par les classes de couverture du sol de Corine Land Cover ~~de~~a permis cette distinction (voir Houzé, 2003).

Région	Altitude	Orientation Technico-économique												
		13	14	6	81	411	412	43	42	71	44	82	72	5
121	1	23.	13.	2.	1.	.	.	.	.	.	.	2.	.	.
131	1	131.	87.	8.	35.	3.	21.	18.	5.	.	.	1.	.	.
	2	4.	.	.	6.	.	.	2.	1.	.	1.	.	.	.
132	1	98.	106.	.	64.	8.	17.	9.	.	1.	.	1.	.	1.
133	1	39.	42.	2.	57.	6.	14.	13.	4.	1.	1.	.	.	2.
134	1	258.	28.	16.	38.	1.	8.	2.	24.	2.	17.	3.	2.	4.
	2	6.	1.	.	5.	.	1.	.	.	1.	.	.	.	.
	3	2.	.	.	1.	.	.	.	1.	.	.	.	.	.
135	1	21.	12.	4.	23.	66.	61.	23.	7.	4.	2.	5.	7.	2.
	2	.	.	.	.	.	.	1.	.	.	.	.	.	.
136	1	72.	18.	8.	33.	1.	5.	2.	64.	2.	6.	5.	.	.
	2	21.	.	1.	19.	.	4.	3.	35.	3.	2.	1.	1.	.
	3	1.	.	.	.	.	.	.	2.	.	.	.	.	.
141	1	19.	130.	7.	94.	10.	34.	11.	1.	4.	.	7.	.	1.
151	1	48.	1.	4.	76.	2.	24.	34.	5.	1.	3.	1.	.	.
	2	4.	.	.	8.	6.	16.	13.	.	.	1.	.	.	.
	3	.	.	.	.	3.	1.	.	.	.	.	.	.	.
152	1	36.	29.	4.	17.	1.	14.	1.	1.	3.	1.	2.	.	.
	2	1.	.	.	1.	.	1.	1.	.	1.	.	.	.	.
	3	.	.	.	.	2.	.	.	.	.	.	.	.	.
153	1	15.	2.	.	32.	11.	18.	13.	5.	.	1.	.	.	.
	2	4.	1.	.	6.	34.	26.	11.	.	.	1.	1.	.	1.
	3	.	.	.	.	29.	2.	.	.	.	.	.	1.	.
162	1	29.	10.	23.	45.	52.	60.	61.	69.	16.	11.	17.	26.	14.
	2	.	.	.	.	.	.	1.	.	.	.	.	.	.
163	1	5.	52.	7.	44.	126.	105.	39.	19.	33.	1.	43.	68.	69.
	3	.	.	.	.	1.	.	.	.	.	.	.	.	.



 groupe affecté à la zone "prairie"
 groupe affecté à la zone "culture"

Tableau 2. Typologie des régions RICA du nord de la France, et affectation des groupes types aux modes « CLC » (cultures ou prairies).

A l'échelle infra-régionale, la grande diversité spatiale des émissions associées aux territoires montre qu'une politique contractuelle qui s'appuierait sur les agents individuels risquerait d'engendrer des coûts élevés de contrôle des « contrats » qui pourraient être proposés, à l'image des contrats territoriaux d'exploitation (CTE, aujourd'hui contrats pour une agriculture durable – CAD).

Approche dynamique régionale :

Le deuxième travail aborde à l'échelle d'une région et à partir d'un autre modèle qu'AROPAJ la question des cultures énergétiques et la dynamique des systèmes

agricoles. Ce modèle, développé par Stelios Rozakis et Stéphane De Cara, est couplé avec un système d'information géographique. Il traite d'un ensemble de parcelles couvrant toute une petite région, et qui peuvent être affectées à un jeu de cultures à finalité alimentaire ou énergétique, dans le cadre d'une approche récursive. Ce travail fait l'objet d'une présentation [48th Australian Agricultural and Resource Economics Society \(AARES\) Conference](#) dans un congrès australien et est actuellement soumis pour publication à ~~une revue scientifique~~ [Agricultural Economics Review](#).

D - Résumé détaillé des travaux et des résultats

Les travaux réalisés en fonction des objectifs du programme reposent sur deux approches et deux modèles différents.

D.1. Approche européenne statique à partir du modèle AROPAj :

Le premier travail repose sur les développements du modèle AROPAj présentés ci-dessus. Il résulte d'analyses complémentaires, l'une étant plus récente (De Cara, Houzé, Jayet, 2004) et l'autre présentant une analyse préliminaire (Houzé, 2003). Ce qui suit porte uniquement sur le second travail, avec une synthèse des deux analyses.

1^{ère} analyse : *approche de premier rang de la régulation des émissions de GES*

Nous présentons le jeu de simulations réalisées pour l'étude des réductions des émissions de GES d'origine agricole. La première étape consiste à évaluer ces émissions à partir de la nouvelle version du modèle et du nouveau module de calcul de ces émissions. Il s'agit alors de les comparer avec les estimations fournies par l'UNFCCC (voir le site www.unfccc.de.int).

Deux évaluations sont proposées, l'une pour 1997, qui est l'année des observations du RICA sur la base desquelles le modèle est calibré. L'autre est 2001, première année de mise en œuvre de l'Agenda 2000

Comme le montre la figure 2, le modèle restitue les estimations fournies par l'IPCC, en les sous-estimant à l'exception des Pays-Bas [et le Royaume-Uni](#). La sous-estimation est importante en terme relatif pour l'Espagne. Pour la France, elle ne doit pas surprendre si l'on considère que le RICA représente peu les exploitations à temps partiel, et « mal » certaines exploitations de grandes cultures. [Au niveau européen, ce sont environ 85 % des émissions d'origine agricole qui sont capturés par le modèle, avec une représentativité plus forte pour les émissions de N2O par les sols agricoles et de méthane par la fermentation entérique.](#)

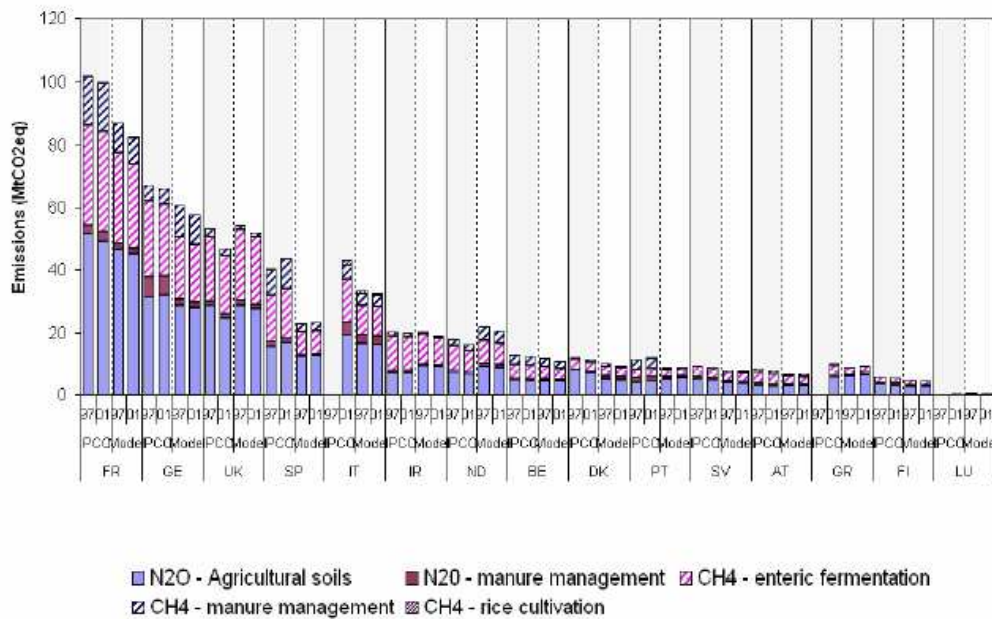


Figure 2. Emissions de N₂O et de CH₄ par l'agriculture, selon les sources, en 1997 et 2001 – Résultats du modèle AROPAJ et estimations IPCC.

Ensuite, une approche de premier rang, dans laquelle une autorité publique est supposée capable de réguler directement les émissions individuelles, est conduite de deux manières.

Dans un premier temps, on introduit une taxe sur les émissions évaluées en équivalent dioxyde de carbone à effet de serre (sur la base des pouvoirs radiatifs globaux à 100 ans préconisés par l'IPCC). Cette taxe est proposée sur un intervalle de 0 à 100 € par tonne de CO₂, par pas de 2.5 €/tCO₂. Le scénario retient par ailleurs la PAC associée à l'Agenda 2000, et un ajustement du capital animal de 15% maximum autour du capital animal initial de 1997.

La figure 3 donne le niveau de réduction des émissions qui serait obtenu par l'introduction de cette taxe de premier rang, réduction décomposée en 9 postes principaux définis selon l'origine des émissions. Les deux principaux postes qui offrent des potentiels significatifs de réduction sont les émissions de CH₄ dues à la fermentation entérique des herbivores et les émissions directes de N₂O [à partir des cultures par les sols agricoles](#).

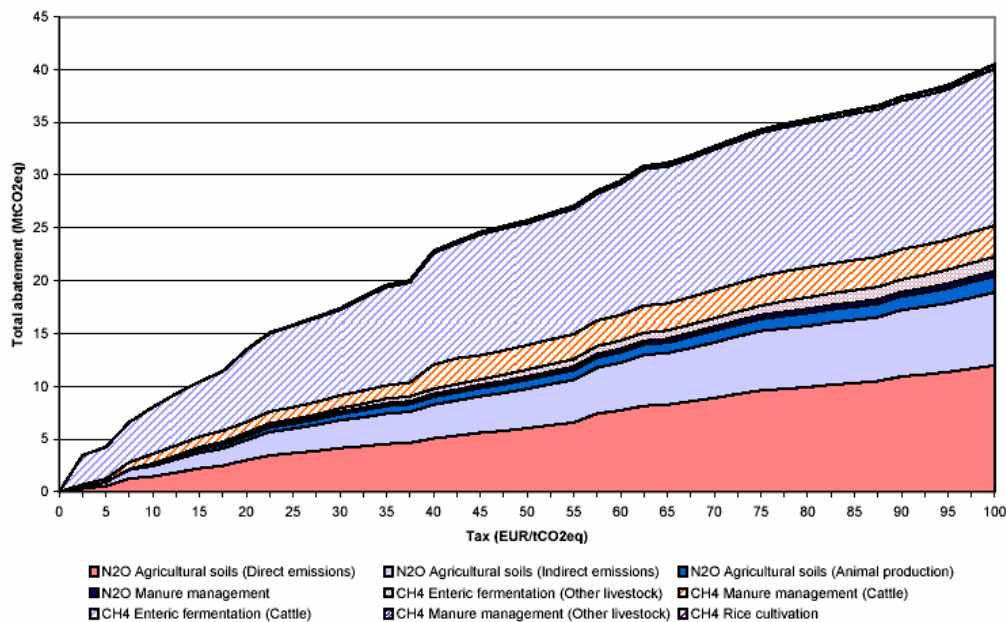


Figure 3. Réductions des émissions de N2O et CH4 sous l'effet d'une taxe sur les émissions directes

En les comparant à un total d'émissions d'origine agricoles de l'ordre de 400 MtCO₂, les réductions peuvent paraître assez peu significatives, même pour un niveau élevé de taxe. Il convient de noter que le modèle conduit sans doute à sous-estimer l'effet d'une taxe dans la mesure où les rigidités telles que le maintien des rendements agricoles à des niveaux constants limite les possibilités d'ajustement. Sur ce point, le travail en cours réalisé par Caroline Godard (thèse ADEME-INRA et APR GICC 2002) devrait permettre de tenir compte de ces possibilités d'ajustement avec l'intégration de rendements comme des fonctions de réponse à l'azote. Les fixités en matière des rendements lait et viande par rapport à l'alimentation animale et des systèmes de gestion des effluents d'élevage pèsent également dans ce sens. Enfin, l'ajustement du capital animal limité à 15% peut jouer significativement, surtout pour des niveaux élevés de taxe. Enfin, l'absence de comptabilisation de la séquestration du carbone dans le cadre de ces simulations tend aussi à augmenter les coûts d'abattement dans la mesure où elle prive les agriculteur de la possibilité de valoriser leurs réduction d'émissions nettes par un stockage accru.

A partir de ces résultats, on peut déterminer le niveau de taxe permettant un niveau donné d'effort de réduction des émissions de GES. Ainsi, un effort de 8%, correspondant à la cible que serait l'application de l'accord de Kyoto, serait obtenu par une taxe voisine de 56 €/tCO₂ (notée par la suite Tk). On notera que ce calcul tient compte d'une évolution des émissions entre 1990 et 1997 calculée « hors modèle » (à partir des estimations de l'IPCC). Il faut tout de même garder à l'esprit que cet objectif de 8% est calculé sur la base de la simulation 2001. Etant

donné la baisse des émissions d'origine agricole entre 1990 et 2001, ce pourcentage correspond à un effort important. Autrement dit, en termes d'abattement total depuis 1990, l'agriculture contribuerait proportionnellement plus que le reste de l'économie.

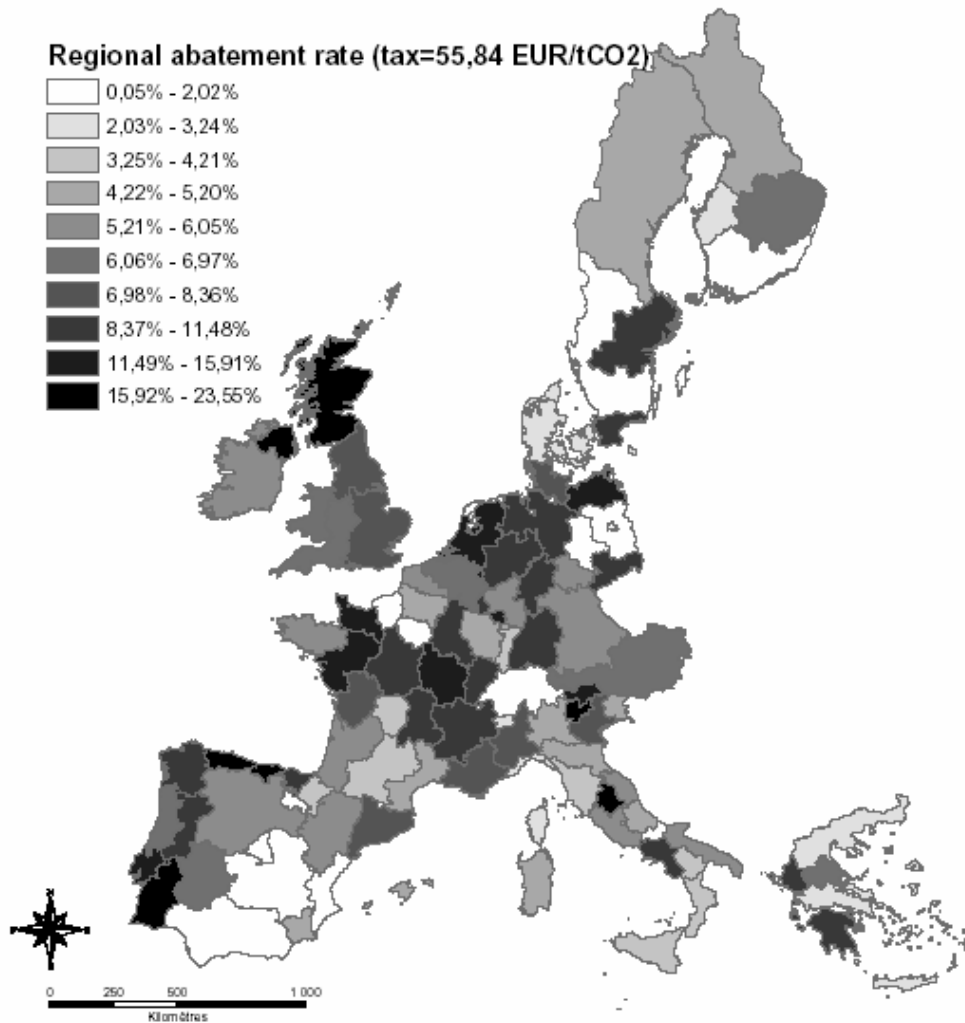


Figure 4. Répartition régionale de l'effort d'abattement associé à un même « prix » Tk de 56€/tCO₂.

On peut alors représenter l'effort, en terme de réduction des émissions, obtenu de la part de chacune des régions, pour un même prix Tk. Celui-ci varie de 0 à 245% du niveau des émissions régionales de référence. La carte de la figure 4 montre dans quelle mesure les fortes disparités régionales mériteraient que soit instauré un mécanisme de transfert des droits d'émission, si une taxe uniforme venait à en fixer le montant.

Dans la figure 4, les niveaux de réduction sont évidemment estimés à l'échelle régionale, alors que la dispersion réelle de ces niveaux est plus importante lorsqu'on les évalue à l'échelle des groupes types. La figure 5 donne les fonctions de distribution pour les deux modes d'estimation, fonctions qui se « croisent » au taux de réduction des émissions de 8% (en abscisse), puisque ces fonctions sont déterminées en réponse à une taxe de 56€/tCO₂ calculée pour obtenir une réduction globale de 8% des émissions. On remarquera que ce taux de réduction est réalisé (en ordonnée) sur une base de 60% des émissions initiales concernées. Une partie significative de l'abattement serait donc obtenu sur des groupes types et des régions capables de réduire les émissions de façon plus importante pour un même niveau de taxe.

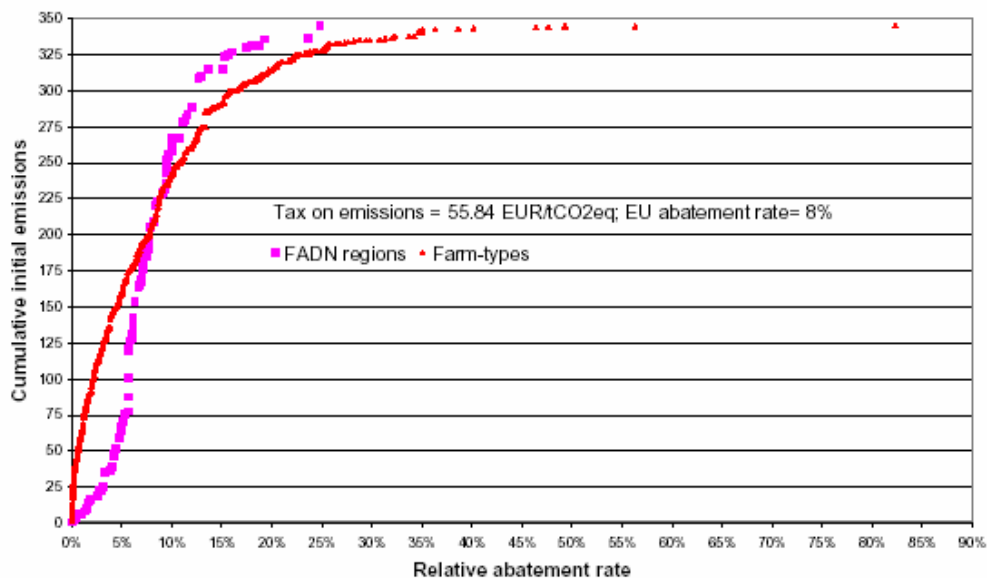


Figure 5. Distribution des taux d'abattement relatif des émissions de GES rapportées aux émissions initiales, cumulées en fonction des groupes types ou des Régions.

Les simulations nous permettent de montrer comment évolue cette distribution des efforts d'abattement selon le niveau de la taxe. La figure 6 montre le déplacement de la distribution des efforts de réduction pour trois niveaux de taxe, respectivement 20, Tk, et 100 €/t_{eq}CO₂. La mise en œuvre de ces taxes impliquerait, toujours dans une logique de premier rang, une réduction respectivement de l'ordre de 3.9%, 8%, et 11.8% des émissions agricoles totales de GES.

Il est clair que plus la taxe augmente (i.e. plus l'effort demandé est important), plus la distribution de l'effort de réduction rapporté aux émissions initiales totales, par groupe type, est décalée vers des taux d'effort individuel plus importants.

Ainsi, pour atteindre 60% du potentiel de réduction associé à un niveau de taxe donné, il faudrait mobiliser toutes les exploitations qui pourraient fournir un effort respectif de 3, 8 et 12% de réduction des émissions initiales pour un coût marginal d'abattement respectif de 20, 56 et 100 €/t_{eq}CO₂. Rappelons que le potentiel total associé à ces niveaux de taxes est respectivement 3.9, 8.0 et 11.8% des émissions initiales totales. Autre façon d'utiliser les résultats, mobiliser les producteurs capables de réduire de 8% leurs émissions individuelles pour un coût marginal d'abattement respectif de 20, 56 et 100€/CO₂, permettrait de réaliser un objectif global de réduction respectif de 87, 68 et 50% du potentiel estimé à ce coût.

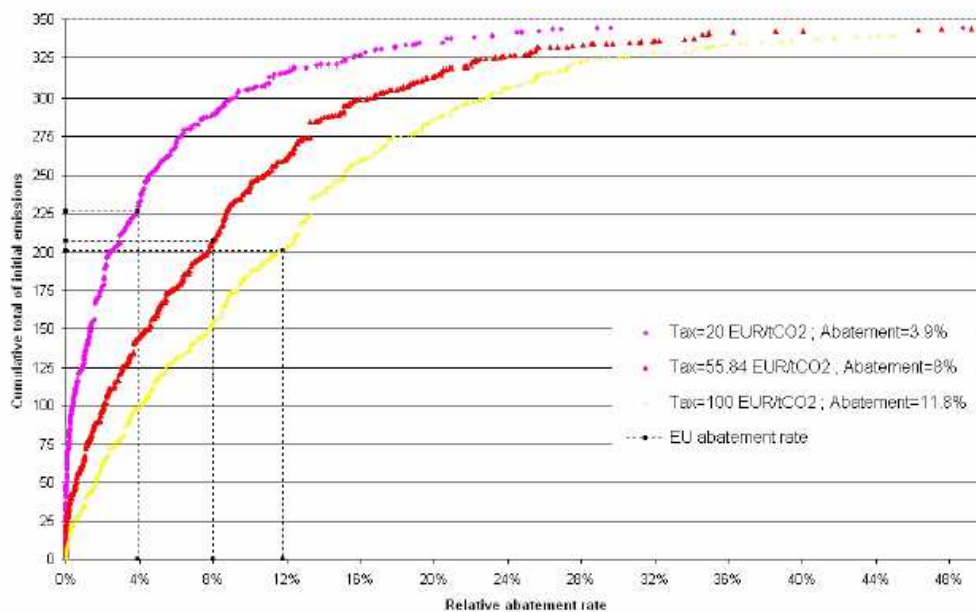


Figure 6. Part de la réduction des émissions totales de GES en fonction du niveau individuel de réduction associé à un niveau donné de la taxe.

L'approche duale, qui consiste à imposer un quota virtuel sur les émissions directes de GES (N₂O et CH₄), repose sur l'estimation des coûts marginaux de réduction. Ce coût n'est autre que la valeur prise par la variable duale associée au quota dans le programme d'optimisation associé à chacune des exploitations agricoles types du modèle. Nous retenons trois valeurs de réduction relative des émissions initiales (respectivement 4%, 8% et 12%).

La figure 7 reprend l'offre de réduction des émissions en fonction du coût marginal d'abattement obtenu pour l'ensemble des groupes types, à partir de l'analyse primale présentée ci-dessus. Puis, pour trois niveaux individuels relatifs de réduction (en l'occurrence 3.9%, 8%, et 11.8%), on détermine le coût marginal moyen de réduction pondérée par les émissions initiales, ainsi que la valeur

médiane de ce coût. Pour un niveau donné de réduction, médiane et moyenne sont très significativement différentes et toutes deux très significativement supérieures au coût marginal, révélant ainsi une distribution des coûts individuels à variance et asymétrie fortes. Il en ressort que la contribution de certaines exploitations est importante pour la réalisation d'un objectif global, mais qu'elle ne serait acquise qu'à un prix très élevé.

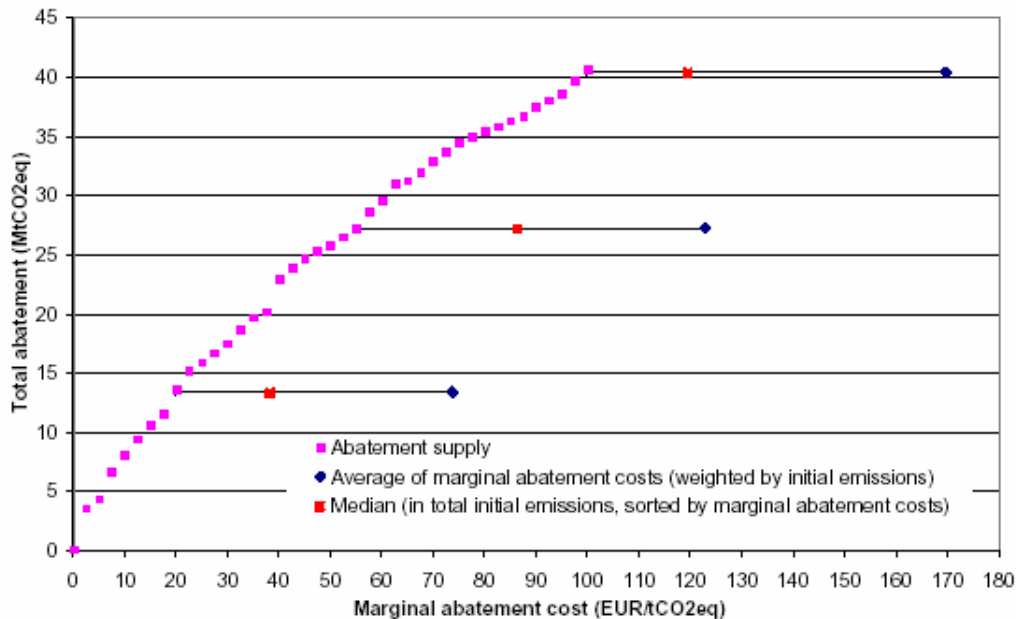


Figure 7. Relation entre l'offre de réduction des émissions de GES et le coût marginal individuel de réduction.

2^{ème} analyse : approche spatiale de la régulation des émissions de GES

A la difficulté évoquée ci-dessus qui conclut la section précédente, s'ajoute le problème de la réelle dispersion spatiale des coûts et des potentiels d'abattement. Cette dispersion dépasse la simple modulation régionale des émissions et de leurs coût et potentiel de réduction, présentée par exemple sur la carte de la figure 4.

En effet, dans le type de présentation retenu jusqu'ici, une région, même divisée sur le plan de la production agricole en groupes types, est supposée implicitement homogène. Les exploitations agricoles types, à l'image des populations réelles qu'elles sont supposées représenter, ne sont pas localisées (ni localisables, leur localisation étant « interdite » contractuellement lors de toute utilisation du RICA). Par ailleurs, on n'étudie ici que les terres agricoles.

L'occupation des sols peut apparaître de manière plus ou moins morcelée selon la résolution spatiale à laquelle on se place. La difficulté pour notre approche était de

disposer d'une information homogène à l'échelle de l'ensemble de l'Europe. La base géographique Corine Land Cover (CLC, figure 8) fournit cette information, à une résolution spatiale de 250×250 m, de manière exhaustive, puisque déterminée à partir d'images satellites. Cependant, certaines de ses caractéristiques ne constitue pas l'outil idéal pour traiter des questions de spatialisation infra-régionale des émissions de GES. La résolution ne permet pas d'avoir une vision synthétique de l'information à une échelle infra-régionale lisible ; les classes retenues pour décrire les couvertures spatiales sont parfois ambiguës par rapport aux surfaces agricoles précises considérées par le modèle économique (par exemple les « zones agricoles hétérogènes » recourent des territoires agricoles variés) ; enfin, l'acquisition des données de base est antérieure à l'année 1997 (année de disponibilité des données RICA) et répartie sur plusieurs périodes disjointes dans le temps.

Malgré ces difficultés, cette base de données a été utilisée par Martin Houzé pour aborder la question des changements d'échelle dans une problématique de régulation des émissions de GES d'origine agricole.

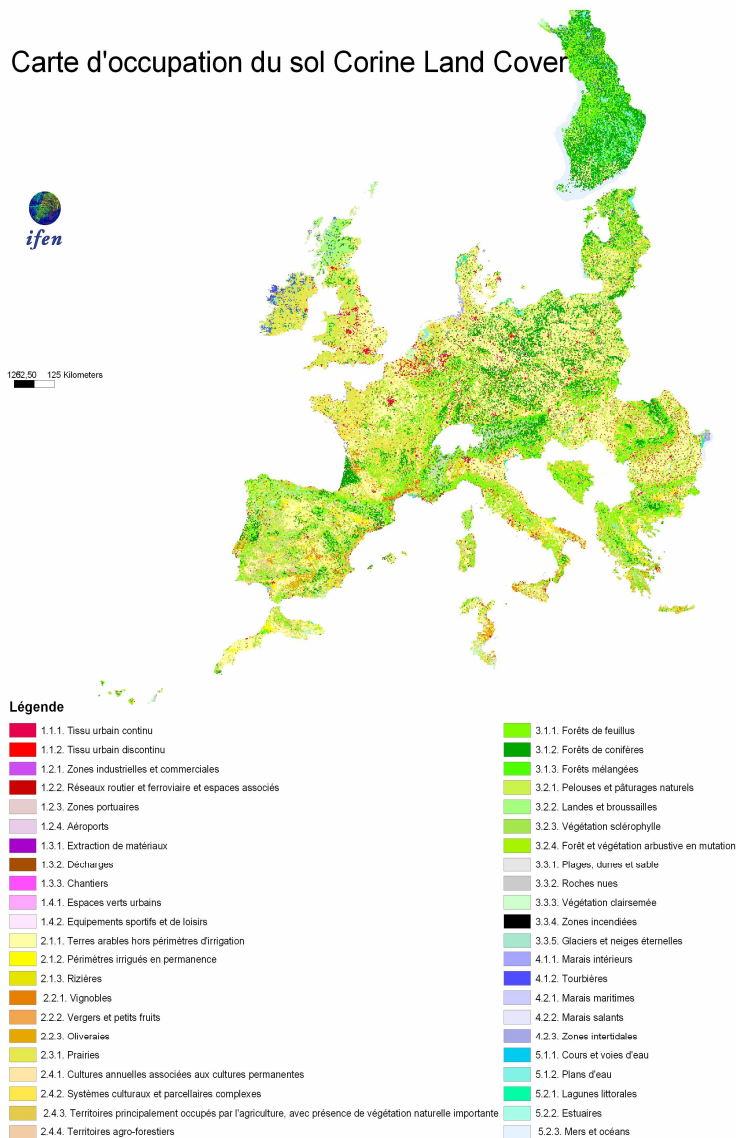


Figure 8. Carte d'occupation des sols Corine Land Cover.

Rappelons tout d'abord le point départ offert par le modèle AROPAj, en nous limitant aux émissions de N₂O. De premières évaluations des niveaux de gaz émis agrégés régionalement, fondées sur une version préliminaire du modèle AROPAj, sont présentées sur la figure 9.

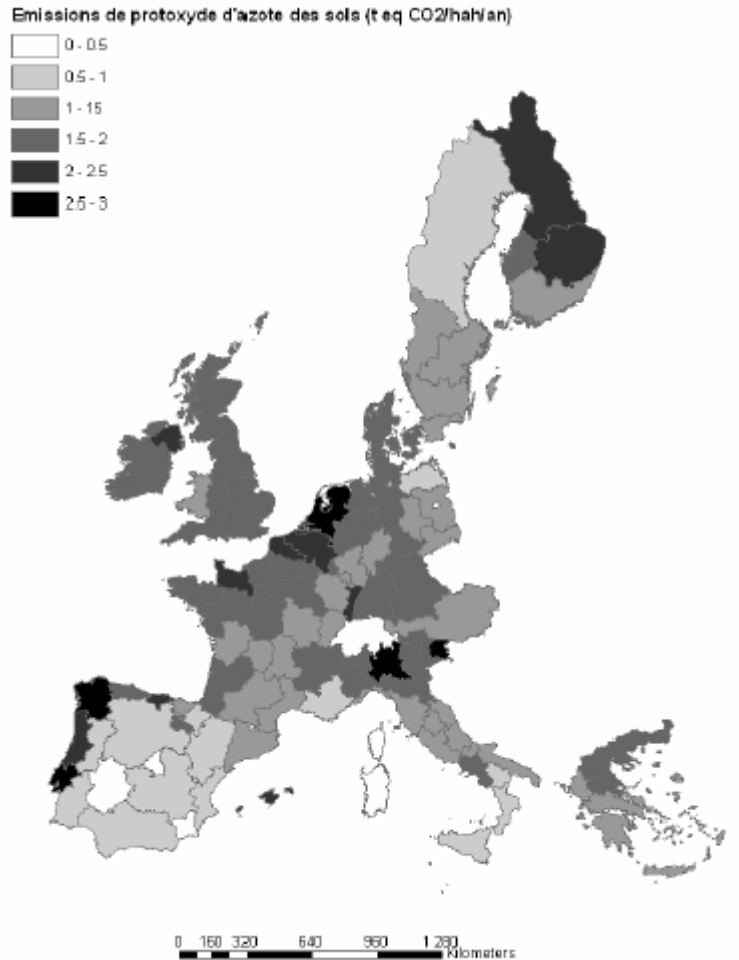


Figure 9. Evaluation préliminaire des émissions de N₂O par l'agriculture (Houzé, 2003).

A partir de cette représentation, l'introduction de l'information géographique de la base CLC permet d'exclure de l'analyse les classes non agricoles et non-ambiguës (forêts, territoires artificialisés, zones humides et surfaces en eau). La représentation obtenue pour la France des émissions de N₂O au niveau régional après application de ce masque est présentée figure 10.

Dans un deuxième temps, une utilisation plus fine des classes « territoires agricoles » de CLC permet de relier les systèmes de cultures des exploitations agricoles types du modèle à des occupations de sol agricole possibles (par une méthode simple de « minimisation de distance »), on peut ainsi produire une information plus localisée (figure 11 : exemple de la région Basse-Normandie).

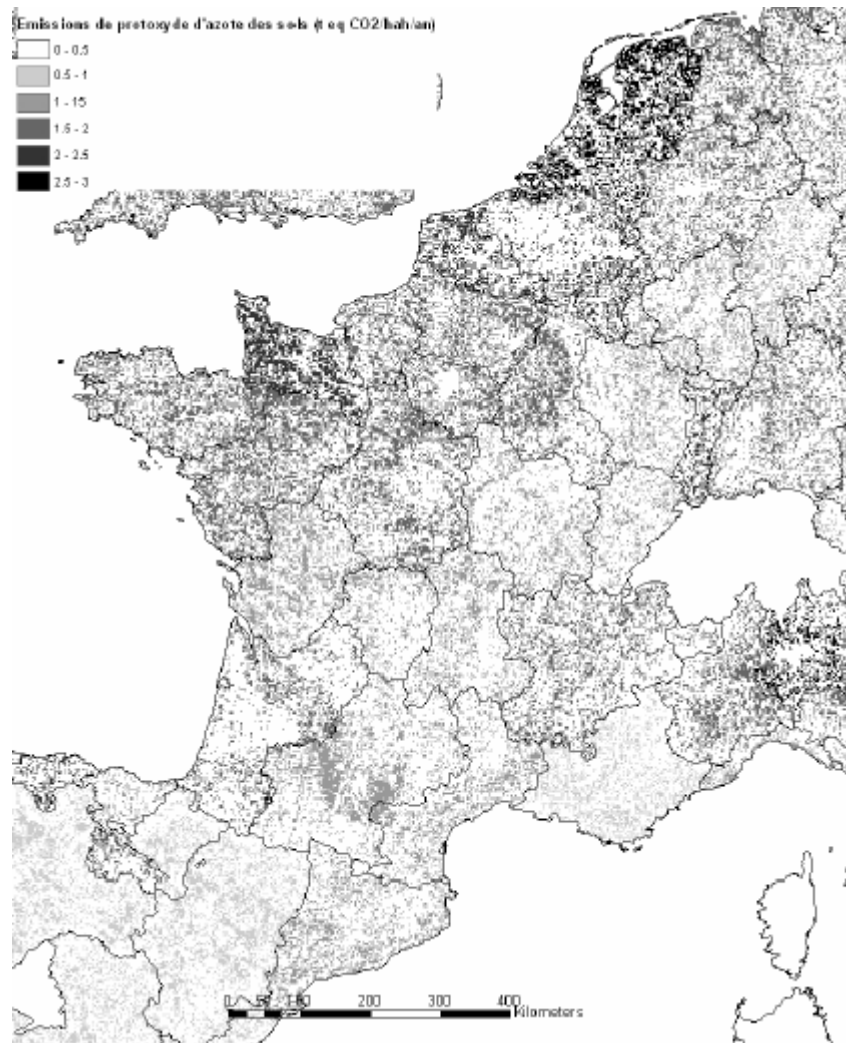


Figure 10. Localisation des émissions de N₂O pour la France à partir d'un masque CLC

On notera que la représentation donnée figure 10 reprend une analyse à l'échelle régionale par classe de niveaux d'émission, d'où une classe homogène par région. S'il est intéressant de tenter une localisation infra-régionale selon les systèmes de cultures (figure 11), on remarque que la comparaison inter-régionale d'une telle représentation reste difficile à interpréter du fait de la grande disparité des réalités représentées par les zones « pariries » et « cultures » selon les régions (voir tableau 2). L'homogénéité régionale transparaîtrait au niveau des émissions rapportées à chacun de ces deux types d'occupation du territoire agricole.

La clé d'analyse régionale sur laquelle est basée la typologie du modèle économique demeure.

Une étape d'analyses statistiques spatiales plus poussées permettrait d'éviter un éclatement trop important en petites zones géographiques de terres agricoles en

créant des zones homogènes d'un point de vue de l'occupation du sol agricole, et améliorerait la lisibilité de cartes similaires aux figures 10 ou 11.

Ce mode de représentation ne modifiera pas cependant la réalité d'un certain « mitage » régional de l'occupation du territoire, et ses conséquences en matière de réalisation d'une politique de régulation. Le régulateur devra en effet s'adresser à des agents économiques individuels, qui, par la nature des terres qu'ils possèdent et leur capacité à la valoriser, s'engageront individuellement sur des bases économiques et biophysiques différentes. Toute forme de contrat exigera du régulateur une acquisition importante et coûteuse d'information, et/ou une capacité de contrôle également complexe et coûteux. Ce serait l'un des enjeux des CTE (nouvellement CAD) que d'être des instruments contractuels adaptés à ce type de problématique environnementale.

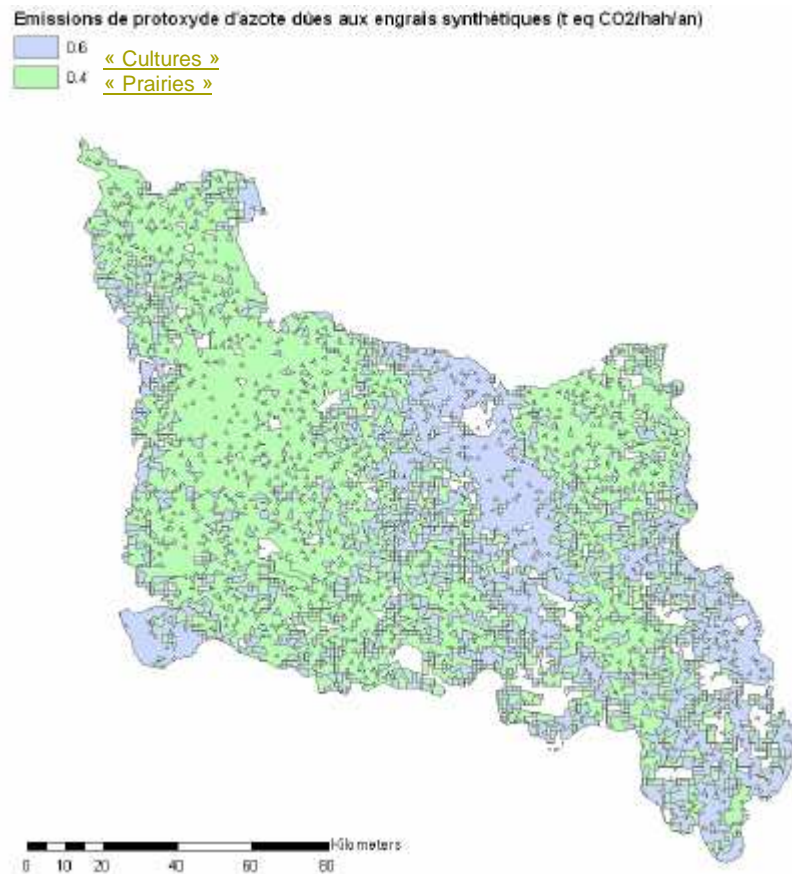


Figure 11. Localisation infra-régionale des émissions de N₂O en Basse-Normandie en reliant les surfaces couvertes par la typologie AROPAj et celles de la base CLC.

D.2. Approche dynamique régionale :

Le second travail repose sur un modèle de programmation spatiale et dynamique spécifiquement développé pour une région grecque, dans laquelle sont mises en concurrence des cultures à finalité traditionnelle et des cultures énergétiques. Ce travail également développé dans le cadre d'une étude financée par la Commission Européenne a fait l'objet d'un rapport, et d'un article soumis dans une revue scientifique (De Cara et Rozakis, 2003).

Ce travail est tout d'abord résumé en quelques lignes.

Une des problématiques majeures liées au stockage de carbone dans les sols agricoles tient à l'appréciation dynamique des potentiels de stockage et des coûts qui y sont associés. Cet aspect est notamment important lorsque sont considérées les inerties liées aux contraintes agronomiques conditionnant l'utilisation des terres et la possibilité d'un déstockage rapide lié à des changements des pratiques. Afin de mesurer l'impact de ces éléments, nous utilisons un modèle dynamique d'offre de produits végétaux que nous couplons, en amont, à un modèle de comptabilisation dynamique des puits de carbone et, en aval, à un système d'information géographique. Ce modèle est appliqué à une région agricole (Thessalie, Grèce) pour laquelle on dispose d'une base de données assez détaillée sur les cultures et les surfaces. Un aspect important et novateur de l'étude réside dans la prise en compte des cultures multi-annuelles comme alternative aux cultures annuelles standard. Le modèle est utilisé pour décrire les potentiels de stockage sur une durée compatible avec les engagements internationaux.

Résultats :

On détermine d'abord la courbe d'offre du stockage de carbone à l'échelle régionale. Chaque modèle individuel est optimisé (y compris le paiement par tonne et les bilans de stockage de carbone calculés par le modèle physique de comptabilité du carbone). Les résultats agrégés sont présentés sur la Figure 12, en termes de stockage annuel pour une plage exhaustive de valeurs de carbone. Afin d'obtenir les quantités annuelles de stockage de carbone, on a calculé la moyenne annuelle du carbone stocké accumulé sur dix ans.

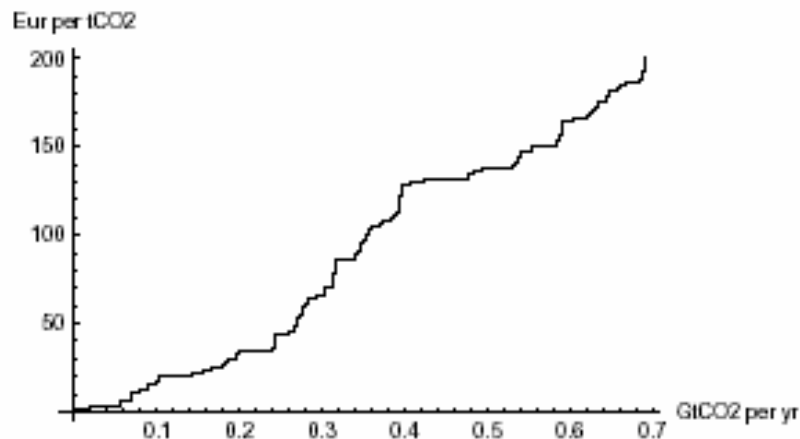


Figure 12. Offre de stockage de carbone et coûts marginaux au niveau régional

La courbe de la figure 12 indique les valeurs du coût marginal à partir desquelles une quantité donnée de carbone stocké peut être atteinte. La forme en escalier de la courbe d'offre est liée aux changements de solution optimale des exploitations agricoles et à l'agrégation des résultats concernant la position spatiale de ces exploitations. Le coût marginal associé au stockage des premières unités de carbone est relativement bas. Pour une quantité de 0.1 GtCO₂/an, les coûts de réduction marginaux restent au dessous de 20 €/tCO₂. Pour des coûts qui varient de 30 €/tCO₂ à 130 €/tCO₂, la pente des coûts marginaux de réduction monte et le potentiel de stockage varie de 0.2 GtCO₂ à 0.4 GtCO₂ par an. Le coût marginal est exploré dans cette étude pour des quantités qui correspondent à un potentiel de stockage de 0.7 GtCO₂ annuellement.

Dimension temporelle du stockage de carbone :

Les résultats présentés sur la Figure 12 dépendent de la surface totale cultivée pour des plantes à buts énergétiques, étant donné que les cultures énergétiques pérennes arrivent à stocker du carbone à des taux plus élevés que les cultures arables traditionnelles de la région (coton, maïs, blé). Le taux de stockage est autant plus élevé pour un horizon donné que le moment de la plantation de la culture pérenne arrive plus tôt. Pour des valeurs de carbone plus élevées, la substitution des cultures énergétiques aux cultures conventionnelles arrive plus rapidement dans le temps, la valeur totale actualisée des marges brutes des exploitations étant optimisée.

Les quantités stockées du carbone dans le temps pour des valeurs différentes du carbone sont présentées par Figure 13. L'axe z représente l'augmentation annuelle

du stock pour une valeur et une année fixées. La figure montre que dans les quatre premières années et pour des valeurs de carbone comprises entre 0 et 30 €/tCO₂ les quantités stockées sont négligeables. Pour des valeurs plus élevées du carbone, le stockage commence plus tôt, et un plateau apparaît quand les valeurs s'approchent de 200 €, puisque le stockage supplémentaire est peu possible étant donné que la capacité est exploitée au maximum (plantation des cultures énergétiques dès la première année).

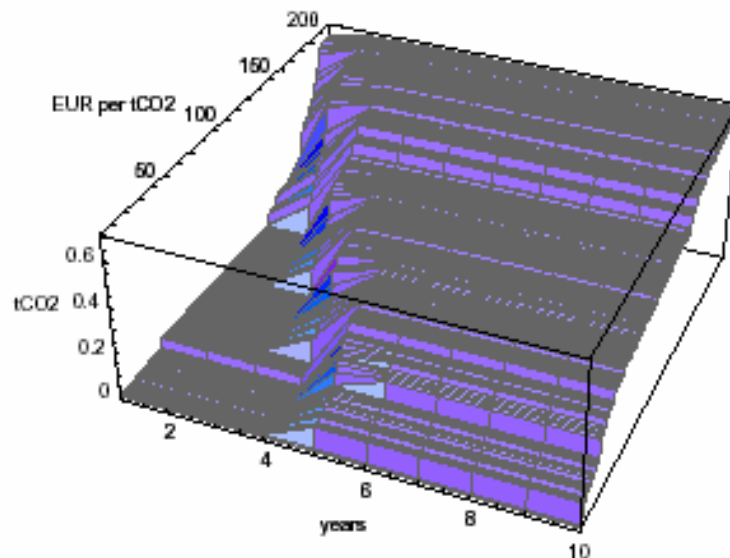


Figure 13. Dimension temporelle des coûts marginaux de stockage de carbone dans le cas d'un contrat sur la quantité.

Hétérogénéité spatiale et politique d'optimum de second rang.

Les outils de politique de lutte contre l'effet de serre qui sont définis sur la base des quantités réelles de stockage de carbone sont plus efficaces que ceux qui sont basés sur des coefficients moyens. Dans le cas du stockage de carbone, le coût marginal associé à une quantité fixe de carbone stocké est moins élevé si on utilise des **contrats sur les quantités**. Au cas où les calculs précis sont trop coûteux à effectuer et lorsque des informations personnalisées sont impossibles à recueillir, l'agence environnementale peut tout de même préférer des **outils fondés sur la surface** (subventions par hectare).

Dans cette perspective on a comparé l'efficacité relative de ces deux types de contrats. On calcule d'abord les coefficients de stockage de carbone par hectare, qui se sont basés sur des moyennes régionales. Ces coefficients, multipliés par la valeur de carbone, sont introduits dans le calcul des marges brutes des

exploitations sous forme de subventions par hectare. Ainsi, tous les agriculteurs qui cultivent le même nombre d'hectares touchent le même montant pour la même culture. Les coûts de stockage de carbone et leur évolution dans le temps sont montrés sur la figure 14.a. La différence entre les « contrats par tonne » et les « contrats par hectare » en termes de carbone stocké par an et de valeur de carbone est présentée sur la Figure 14.b. Autrement dit, le graphique sur la Figure 14.b indique que les instruments fondés sur les quantités rendent possible de stocker une quantité de carbone jusqu'à 90% plus élevée par rapport à ce que donnent les contrats fondés sur les surfaces pour une année et une valeur de carbone données. Effectivement, des différences notables apparaissent en début de la période, les contrats à la tonne incitant les agriculteurs à passer plus tôt à la plantation des cultures énergétiques pérennes.

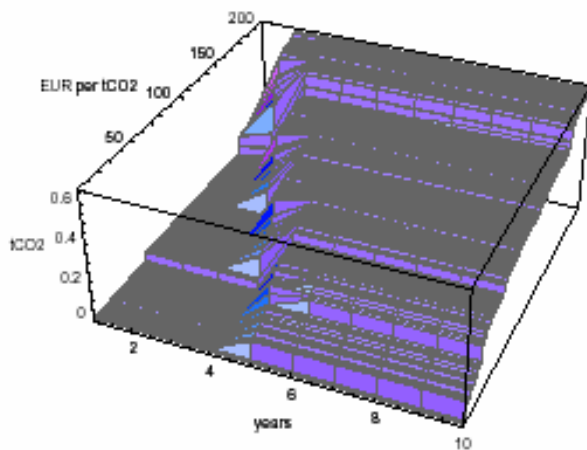


Figure 14. a. coûts marginaux sous contrat par hectare

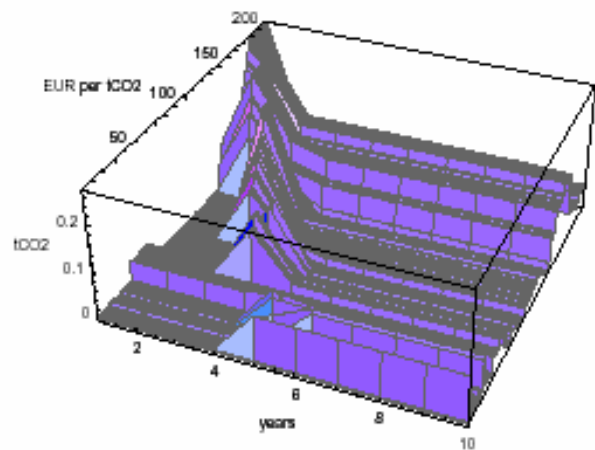


Figure 14. b. Différence de stockage de carbone entre contrats à l'hectare et à la tonne

E - Difficultés et opportunités rencontrées

Le fait de disposer d'une visibilité scientifique européenne accrue, l'appui de programmes tel que le programme GICC, et l'intérêt croissant pour la thématique manifesté par nos structures de recherche publique : autant d'éléments qui ont favorisé la stabilisation d'une jeune équipe orientée sur la modélisation économique, le couplage de modèles biophysique et économique, et les régulations agro-environnementales relative au changement climatique.

Mais cette situation aujourd'hui plus favorable n'était pas la situation qui prévalait au début du projet (Stéphane De Cara, CR2 était à l'époque en post-doc et Assistant à Iowa State University, et l'équipe se réduisait à ... un permanent).

De plus, la gestion de projets et l'encadrement administratif peuvent à l'occasion poser des problèmes de ressources humaines. Plus précisément, il nous est difficile de réagir en temps réel, et de gérer au mieux l'adéquation entre la disponibilité de personnes ayant compétence et motivation d'une part, et l'offre effective de travail de la part d'un laboratoire public d'autre part, laboratoire qui doit s'assurer de la signature d'un contrat et des antécédents du candidat pour avoir l'autorisation de le recruter. Lorsque l'équipe est importante, on peut compter sur un effet tampon. Ce n'est pas notre cas. Le retard pris dans la signature de la convention de recherche (retard « partagé » par toutes les administrations concernées) a eu des effets démultipliés par l'indisponibilité de candidats intéressants pour un CDD et par la difficulté d'engager des financements pour l'acquisition de matériel et logiciel en début d'année comptable. Ce genre de situation peut obliger à attendre un an, et l'arrivée de stagiaires en fin de cycle d'étude, pour la réalisation des objectifs annoncés.

Ce problème s'est clairement posé pour l'un des aspects du programme. Cet aspect n'était pas au cœur du projet initial, mais il est apparu que l'aborder nous aurait procuré un avantage significatif. Il s'agissait d'intégrer les puits de carbone constitués par la biomasse ligno-cellulosique à laquelle aurait pu être consacrée une part des terres agricoles. Le véritable problème est de constituer des références solides sur l'accroissement naturel (bois, qualité du bois, et contenu carboné), sur la valorisation éventuelle par le marché (selon la qualité et la destination du produit), et sur les coûts moyens annuels actualisés.

Ce problème sera finalement abordé dans le cadre d'un projet européen sélectionné sur l'APR 2003 du FP6, dans le cadre d'un STREP débutant le 1^{er} janvier 2004 et coordonné par l'IIASA.

Il importe de souligner l'appui qu'a pu représenter l'équipe de Sciences du Sol DMOS de l'INA-PG, qui s'est concrétisé en particulier au moment du stage de Martin Houzé et de l'utilisation effective d'un SIG. Jean-Marc Gilliot et Florence Carré ont à ce titre largement contribué à l'aboutissement des travaux de recherche engagés sur ce programme. L'appui de Caroline Godard, CDD (aujourd'hui en thèse co-financée ADEME-INRA), a également été déterminant à un moment délicat en milieu de contrat.

F - Publications liées au thème et au programme

Les contributions orales et écrites les plus directement liées au programme GICC-APR 2001 sont les suivantes :

De Cara S. Houzé M., Jayet P.A., 2004, **Greenhouse gas emissions from agriculture in Europe : a spatial assessment of sources and abatement costs**, *48th Australian Agricultural and Resource Economics Society (AARES) Conference*, Melbourne, Australie, 11-13 février 2004.

De Cara S., Rozakis S., 2003, **Carbon sequestration through the planting of multi-annual energy crops : a dynamic and spatial approach**, *48th Australian Agricultural and Resource Economics Society (AARES) Conference, Melbourne, Australie, 11-13 février 2004* soumis à Agricultural Economic Review.

Houzé M., 2003, **Emissions de gaz à effet de serre d'origine agricole**, mémoire de DEA, DEA EERN, INA-PG, INRA ESR Grignon, septembre 2003, 39p.

Bamière L., Debove E., De Cara S., Godard C., Jayet P.A., Niang B., 2004, **Economie publique du changement climatique : Modèle Intégré pour les Régulations Agri-Environnementales**, journées INRA MICCES, l'Isle sur la Sorgue, 22-23 janvier 2004, (<http://www.avignon.inra.fr/stics/micces>)

G- Disponibilité des données

Un site internet est en cours d'élaboration. Il porte sur le « cluster » MIRAjE de projets de recherche engagés sur la thématique du changement climatique et des systèmes de production agricoles européens.

Ce site devrait permettre de donner à terme un accès à la base de données ARTIX, initialement développée dans le cadre des travaux de couplage des modèles biophysique STICS et économique AROPAj.

Une présentation de ces projets et des résultats auxquels ils conduisent a été fournie au cours du séminaire MICCES de l'INRA (Isle sur la Sorgue, 22-23 janvier 2004).