

Réduire les émissions de l'agriculture : l'option des légumineuses

Benjamin Dequiedt¹

Longtemps restée à l'écart dans les négociations sur le climat et dans les principaux mécanismes de lutte contre le réchauffement climatique, l'agriculture est aujourd'hui appelée à réduire ses émissions, notamment en France où elle représente près d'un cinquième des émissions du pays. Parmi les mesures d'atténuation possibles, les légumineuses présentent non seulement de nombreux avantages agronomiques, tels que celui de lutter contre les espèces adventices ou bien celui de maintenir la structure du sol, mais également la capacité d'enrichir le sol en azote et d'économiser ainsi les apports en engrais. C'est à l'aspect climatique de cette plante que nous nous intéressons ici en quantifiant les réductions d'émissions liées à leur introduction et le coût qui y est associé.

Ce cahier propose dans un premier temps d'effectuer un bilan de la place des légumineuses dans les assolements en France et de leur intérêt en termes de réduction des émissions de protoxyde d'azote. Il expose ensuite la méthodologie employée pour rattacher le coût marginal d'abattement aux réductions d'émissions qui pourraient être engendrées. Il expose enfin les résultats et enfin la sensibilité du coût d'abattement estimé aux différents prix agricoles.

L'auteur tient à remercier Stéphane DE CARA (INRA), Antoine POUPART (InVivo), Nicolas Legrand (CEC) et Philippe DELACOTE (CEC-INRA) pour leur relecture attentive ainsi que tous les participants aux multiples discussions, débats et échanges sur les questions traitées dans cette note.

1. Chercheur à la Chaire Economie du Climat

benjamin.dequiedt@chaireeconomieduclimat.org

Contenu

Introduction.....	3
I. Contexte	4
A. Des cultures en repli en dépit de forts atouts.....	4
B. Introduire un prix du carbone dans l'agriculture pour favoriser la compétitivité des légumineuses.....	7
II. Evaluer le coût de l'atténuation des émissions de GES par le biais des légumineuses.....	9
A. L'état de l'art des méthodes pour estimer le coût marginal d'abattement dans l'agriculture...	9
B. Proposition d'une méthodologie spécifique aux légumineuses	10
1. Un principe reprenant celui de la méthodologie des projets domestiques sur l'insertion des légumineuses.....	11
2. L'hypothèse de rationalité du comportement économique des agriculteurs.	11
3. Calcul du coût et du potentiel de réduction.....	12
4. Illustration des effets considérés dans la simulation au sein d'un département fictif	15
III. Présentation des résultats.....	17
A. Première approche : doublement uniforme des légumineuses dans chacun des départements	17
B. Deuxième approche : introduction des légumineuses par égalisation du coût marginal d'abattement.....	20
C. Comparaison des deux approches	22
D. Sensibilité du coût marginal d'abattement aux variables agricoles.....	22
Conclusion	27

Introduction

En représentant 18% des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France, l'agriculture se hisse dans le trio de tête des secteurs les plus émetteurs avec les transports et les bâtiments (CITEPA 2012). Toutefois, la forte contribution de l'agriculture est en net repli et enregistre en 2010 une baisse de 10% des émissions par rapport à leur niveau de 1990. Une part de l'explication de cette baisse réside dans un certain découplage de la production agricole par rapport aux émissions de GES permis par les différentes réformes de la Politique Agricole Commune (PAC), conduisant notamment au découplage des aides vis-à-vis de la production, et les progrès réalisés dans les pratiques agronomiques (agriculture raisonnée) permettant de réduire la quantité d'engrais utilisée par tonne de céréales produite (Dequiedt, 2012). Cependant, cette baisse est aussi le reflet de la déprise ayant eu lieu dans ce secteur : ce sont 400 000 exploitations qui ont disparu depuis 1990 et parallèlement les terres arables françaises (la SAU) ont cédé l'équivalent de la superficie de l'Ile-de-France au profit de la forêt et des zones urbaines.

Par conséquent, compte-tenu des enjeux de développement territorial, de sécurité alimentaire et de compétitivité du secteur agricole, il convient de développer les pratiques culturales permettant de coupler production de denrées alimentaires et réduction des émissions. Parmi ces pratiques, l'introduction de légumineuses dans l'assolement agricole présente un fort potentiel. L'ambition de ce travail est donc d'évaluer le potentiel de cette option en quantifiant aussi bien les réductions des émissions de GES que les coûts associés à l'introduction de surfaces de légumineuses supplémentaires dans l'assolement agricole français.

La méthode utilisée reprend le principe de base de la méthodologie liée aux projets domestiques d'introduction de légumineuses développée par *In Vivo* (InVivo, 2011). L'originalité de cette méthodologie repose principalement sur le calcul des coûts d'opportunité liés à la mise en place de légumineuses dans les rotations culturales. Nous proposons ici de l'approfondir en construisant une simulation permettant d'observer les fluctuations du coût d'abattement en fonction de la surface supplémentaire de légumineuses introduites, des variations des prix des principales cultures de céréales et de l'augmentation des prix des intrants agricoles (engrais et produits phytosanitaires). Le périmètre retenu pour l'étude est celui de l'ensemble des départements de la France métropolitaine.

Après avoir décrit brièvement le contexte des cultures de légumineuses et les différents travaux qui ont été menés dans la littérature scientifique sur l'évaluation du coût marginal d'abattement, nous exposerons le principe de notre évaluation sur l'introduction de ces plantes dans les assolements agricoles. Par la suite, nous présenterons les calculs effectués et les résultats obtenus en termes de coût et les réductions d'émissions associés à la moindre utilisation d'engrais. Enfin, nous analyserons les différents facteurs influençant le coût d'abattement des légumineuses.

I. Contexte

A. Des cultures en repli en dépit de forts atouts

La réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la fertilisation des cultures représente un enjeu très important. Actuellement, ces émissions représentent la moitié des émissions de l'agriculture française, soit 10% des émissions de la France. Regroupées dans la catégorie dite des « sols agricoles » de l'inventaire réalisé chaque année pour le compte de la Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), elles rassemblent l'ensemble des émissions de protoxyde d'azote (N_2O) issues du processus de dénitrification des fertilisants azotés épandus sur les sols agricoles, que ces fertilisants soient sous forme d'engrais chimiques ou sous la forme de déjections animales.

De manière générale, quatre grandes stratégies pour atténuer ces émissions se distinguent. La première d'entre elles consiste tout simplement à réduire la quantité d'engrais apportée pour des résultats notables en termes de réduction des émissions. Cette option a été envisagée dans de nombreux articles de la littérature scientifique pour quantifier le coût des réductions d'émissions (De Cara et Al. 2005). Si cette mesure permet d'obtenir des résultats significatifs, il n'en demeure pas moins que les rendements agricoles sont fortement affectés par la réduction des engrais. Elle se heurte donc à la nécessité de maintenir un certain niveau de production, comme cela a été souligné précédemment. Une autre mesure consiste à réduire les apports tout en tenant compte cette fois-ci des besoins de croissance de la plante. Elle s'illustre par une meilleure répartition des engrais dans la parcelle pour tenir compte des propriétés du sol et par une répartition dans le temps aux aléas de la météorologie. Elle permet ainsi de réduire les émissions de GES sans affecter la production. Une troisième stratégie consiste à agir au niveau de la chaîne de réaction moléculaire ayant lieu dans le sol et conduisant aux émissions de N_2O , par le biais d'inhibiteurs de nitrification. Elle permet aussi d'améliorer l'efficacité des engrais tout en augmentant la quantité de céréales produite par unité d'engrais utilisée. Enfin, une autre stratégie consiste à cultiver les cultures ayant un besoin en fertilisants inférieur aux autres cultures. Ce papier s'intéresse à cette dernière stratégie à travers l'introduction de légumineuses dans les assolements agricoles.

A la différence des autres cultures, les légumineuses ou *fabacées* se caractérisent par leur capacité naturelle à fixer l'azote de l'atmosphère. Cette aptitude leur est conférée par les bactéries rhizobium vivant en symbiose au niveau de leurs racines dans des organes appelés nodosités. Ainsi, leur besoin en fertilisants est très inférieur aux autres cultures réduisant notablement leurs émissions par rapports aux cultures non-légumineuses. Une étude réalisée par l'INRA (Jeuffroy et Al.) mesurant les émissions de différentes cultures situées en chambres hermétiques a ainsi démontré que les légumineuses émettent de l'ordre de trente fois moins de GES par unité de surface¹ que les cultures conventionnelles. Par ailleurs, l'azote fixé par les légumineuses au cours de leur croissance bénéficie également aux cultures cultivées pendant les deux années suivantes, constituant ainsi un excellent précédent dans les rotations.

¹ Etude effectuée sur la culture de pois pour les légumineuses et comparée aux émissions des cultures de blé et de colza.

Néanmoins, en dépit leur intérêt, la tendance historique de l'évolution des surfaces de ces plantes est à la baisse. Cette baisse a commencé dès les années 1960 pour les légumineuses fourragères². La part des terres arables occupée par ces cultures était alors de 17%. Elle a ensuite diminué tendanciellement pour atteindre le niveau de 2% en 2010. La baisse des surfaces en légumineuses à graines³ s'est initiée plus tardivement à la fin des années 1980 après des années d'effort de la PAC pour les développer. D'après Duc et Al. (2010) et CGDD (2010) ces tendances s'expliquent par plusieurs grands facteurs :

- **Une évolution des régimes alimentaires** incorporant de plus en plus de protéines d'origine animale et de moins en moins de protéines végétales : la consommation de légumineuses à graines en France a ainsi chuté de 7,3 kg/personne/an à 1,4kg/personne/an entre 1920 et 1985 (CGDD 2010).
- **Un prix attractif des engrais dans les années 1960** qui a conduit à se passer progressivement du rôle agronomique des légumineuses dans les rotations.
- **Le changement du modèle de l'alimentation animal**. Les rations à base de fourrage de légumineuses ont été remplacées par des rations à base de maïs ensilage, de graminées prairiales, complétées par du tourteau de soja. Le rôle des fourrages a été réduit à celui d'apport en fibres.
- **Un régime commercial favorable au soja** provenant du continent américain (pas de droit de douane aux frontières).
- **Un manque de recherche effectuée sur les légumineuses** (CGDD, 2010) par rapport aux autres cultures, ce qui a conduit à une baisse de leur compétitivité. Par exemple, le rendement du pois par rapport à celui du blé a fortement diminué au cours des deux dernières décennies : il était égal à 90% du rendement du blé tendre en 1990 pour atteindre seulement 55% en 2007.

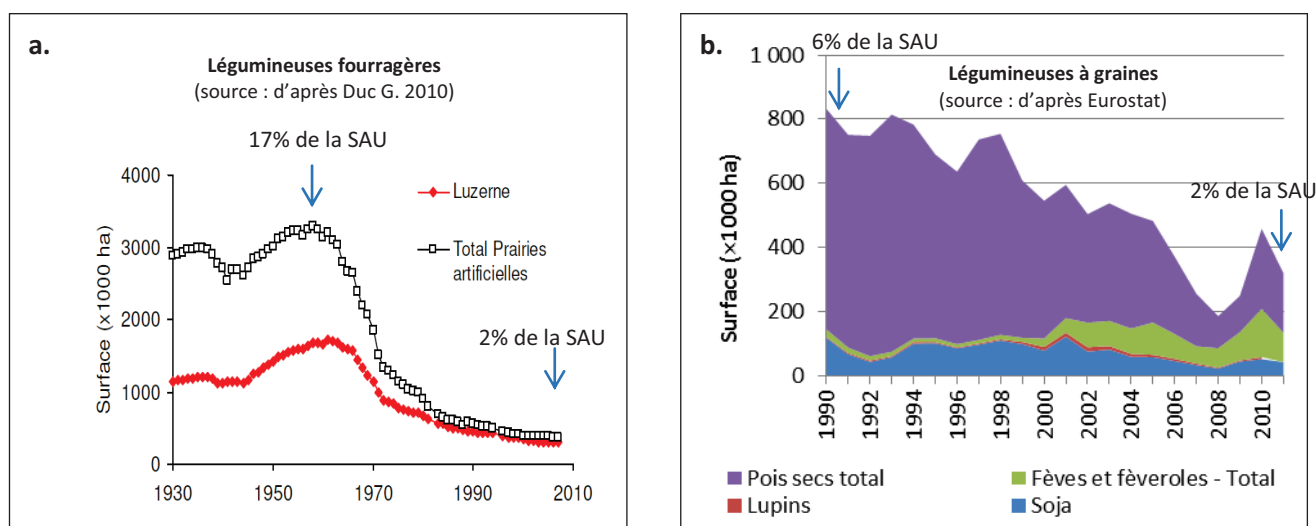


Figure 1 – Evolution des surfaces en légumineuses fourragères (a) et des surfaces en légumineuses à graines (b) en France

² Cultivées pour leur appareil végétatif (luzerne, trèfle violet et sainfoin), elles sont utilisées en alimentation animale.

³ Cultivées pour leurs graines riches en protéines (fèves, fèverole, soja, pois sec, lentille, haricot...), elles sont utilisées à la fois pour l'alimentation humaine et animale.

L'ensemble de ces facteurs a conduit à créer une situation de très forte dépendance de la France et, plus largement, de l'Union Européenne au soja américain pour leur approvisionnement en protéines végétales dédiées à l'alimentation animale. En 2009, le soja était de loin la première denrée alimentaire importée par l'Union Européenne avec près de 12,5 millions de tonnes importées devant l'huile de palme (5,5 millions de tonnes) et les bananes (4,5 millions de tonnes) (source : FAOstat), ces importations provenant en très grande majorité de l'Amérique du Sud (49% du Brésil et 31% d'Argentine d'après la Commission Européenne). En termes de coût, le solde commercial moyen annuel des protéines végétales, évalué sur la période 2004-2008, représentait une perte annuelle pour la France et l'Union Européenne équivalente respectivement à 1 milliard d'euros et à 10,9 milliards d'euros (CGDD, 2010). Par conséquent, en plus de pouvoir atténuer les émissions de l'agriculture, l'introduction des légumineuses dans les assolements peut également être un moyen de conforter la compétitivité de l'agriculture française en favorisant son indépendance alimentaire. Par ailleurs, ces cultures sont d'autant plus amenées à se développer, que les engrais chimiques enregistrent une hausse tendancielle de leur prix depuis la fin des années 1980. En 2010, le prix des engrais et des amendements épandus par les agriculteurs en France était 65% plus élevé qu'en 1990. En effet, le prix des engrais chimiques est fortement corrélé à celui des combustibles fossiles et notamment celui du gaz naturel (Unifa, 2008) en raison de la forte quantité d'énergie nécessaire à leur production. Il apparaît donc vraisemblable, compte tenu de la raréfaction des ressources fossiles, que cette hausse se poursuive dans les années à venir, permettant par la même le retour de conditions favorables pour le développement des légumineuses.

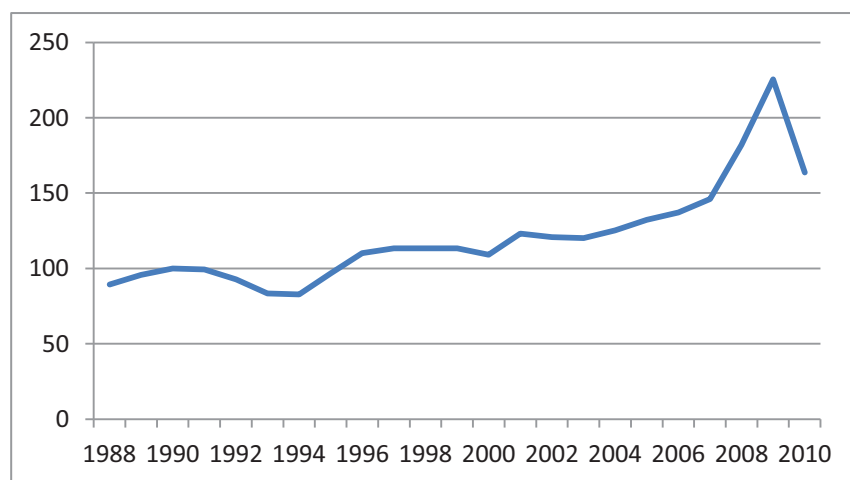


Figure 2 - Indice des prix des engrais et amendements (1990 : base 100) source : Agreste

Les autorités politiques étant sensibles à ces éléments, il existe actuellement un ensemble de signaux préfigurant un regain d'intérêt pour les légumineuses. La loi du 25 juin 2008 relative aux organismes génétiquement modifiés annonce dans son article 1 : « *un plan de relance de la production de protéines végétales alternatif aux cultures d'organismes génétiquement modifiés afin de garantir l'indépendance alimentaire de la France.* ». La loi du 3 août 2009 relative au Grenelle de l'environnement renforce également le rôle que doivent avoir ces cultures dans la réduction de la dépendance des systèmes de production animale vis-à-vis des matières premières importées. Au niveau de la PAC, l'article 68 du règlement R (CE) 73/2009 prévoit, en France, une aide à la production de protéagineux ou de nouvelles surfaces en légumineuses fourragères : une somme de 40 millions d'euros par campagne est allouée, soit une aide à l'hectare estimée entre 100 et 150 €. Enfin, il existe dans le second pilier de la PAC une mesure agro-environnementale dite rotationnelle,

encourageant le maintien des cultures de légumineuses à graines dans les rotations culturales. Ce volontarisme politique s'est traduit par un redressement de la courbe tendancielle de l'évolution de la surface en légumineuses. Ainsi, après avoir atteint en 2008 un niveau historiquement bas de 200 000 hectares, la surface en légumineuses à graines a augmenté pour atteindre 300 000 hectares en 2011.

B. Introduire un prix du carbone dans l'agriculture pour favoriser la compétitivité des légumineuses

Les signaux exprimés précédemment, préfigurant un regain d'intérêt pour les légumineuses, n'apparaissent cependant pas suffisants pour renverser à eux seuls les tendances lourdes qui ont conduit à la marginalisation de ces cultures dans les assolements. Le principal obstacle au redéploiement de ces cultures provient actuellement de la faible rentabilité de ces cultures par rapport aux cultures non-légumineuses. Celle-ci est due à la faiblesse de leur prix et de leur rendement qui ne compense pas leur faible besoin en engrais. Ainsi, la marge brute économique⁴ des légumineuses est de l'ordre de 2 à 6 fois moins importante que celle des cultures non légumineuses (voir tableau 1), ce qui n'est pas pour inciter les agriculteurs à insérer ces cultures dans leur assolement pour atténuer les émissions de leurs sols agricoles. Par conséquent, il convient de trouver des mécanismes capables de favoriser ces légumineuses. Parmi les possibilités, l'instauration d'un prix du carbone, passant par la mise en place d'une taxe carbone, d'un marché d'échange de permis d'émissions ou par des projets domestiques générant des crédits d'émissions, se révèle être la solution la plus efficace d'un point de vue économique (de Perthuis et Al., 2010). Il reste à évaluer les potentialités d'un tel prix du carbone à générer de réelles réductions d'émissions ainsi que les réductions d'émissions engendrées pour un niveau de prix donné. L'évaluation du coût marginal d'abattement des émissions permet d'effectuer une telle estimation, comme nous l'expliquons dans le paragraphe suivant.

Si un agent économique décide de mettre en place des mesures visant à réduire ses émissions, son niveau de profit ne va pas être le même. En l'occurrence, si un agriculteur décide de cultiver davantage de légumineuses sur ses parcelles, ses bénéfices risquent de diminuer par rapport à la situation actuelle de référence. Ainsi, la mise en place de nouvelles pratiques ou de nouvelles technologies réductrices d'émissions engendre un coût. Ce coût qui peut être positif ou négatif (nous reviendrons par la suite sur la signification des coûts négatifs) est généralement croissant à mesure que l'agent va réduire ses émissions. Cette croissance du coût provient du fait que les acteurs mettent d'abord en place les technologies au coût le plus faible. Dans le cas d'un secteur dans lequel il existe un prix du carbone, prenons l'exemple d'un secteur couvert par un système de projets domestiques, le prix du carbone compense le coût lié à la mise en place de nouvelles technologies, de sorte que les agents vont continuer à réduire leurs émissions tant que les coûts associés à cette réduction ne dépassent pas les bénéfices créés par la rente du carbone. Plus précisément, les agents vont réduire leurs émissions jusqu'à ce que le coût de la dernière tonne de CO₂ équivalent réduite, le coût marginal d'abattement, égalise la rémunération de cette tonne de CO₂ réduite, le prix du carbone. Ainsi le tracé des courbes de coût marginal d'abattement (MACC) permet d'estimer pour un niveau de prix du carbone donné, le volume de réductions d'émissions qui sera réalisé.

⁴ marge brute = (prix * rendement) - (charges_{phyto} + charges_{engrais} + charges_{semences})

Tableau 1 - Données économiques des principales céréales, oléagineux et protéagineux cultivés en France (source : Ecophyto 2009)

		Blé tendre	Blé dur	Orge d'hiver	Orge de Printemps	Maïs	Tournesol	Colza	Pois	Féveroles	Luzerne	Moyenne Légumineuses	
Prix base campagne 2006		€/t	125	146	90	110	110	240	240	115	130	70	-
Rendement		Q/ha	71	48	67	60	87	22	30	46	47	12	-
Charges opérationnelles	Phytosanitaires	€/ha	114	80	179	145	78	93	160	121	0	18	-
	Engrais		187	180	155	138	166	73	167	54	0	187	-
	Semences		50	65	65	65	125	86	37	80	95	40	-
Marge Brute (moyenne française)		€/ha	545	377	207	316	588	292	360	273	516	-161	122

II. Evaluer le coût de l'atténuation des émissions de GES par le biais des légumineuses

Pour pouvoir relier les réductions d'émissions au coût qu'induisent certaines options, nous proposons dans cette partie d'exposer une nouvelle méthode spécifique aux légumineuses. Nous en exposerons tout d'abord le principe, qui reprend celui de la méthodologie des projets domestiques en France d'insertion dans les assolements agricoles de légumineuses (InVivo, 2011), puis nous en présenterons les calculs auxquels nous ajouterons un exemple de département fictif pour faciliter la compréhension du lecteur. Cependant, il est bon d'effectuer préalablement une revue de la littérature scientifique pour comprendre en quoi l'état de l'art actuel sur l'évaluation des coûts d'abattement dans l'agriculture justifie la mise au point d'une telle évaluation.

A. L'état de l'art des méthodes pour estimer le coût marginal d'abattement dans l'agriculture

Deux approches principales se distinguent pour déterminer le coût marginal d'abattement. La première, appelée *approche économique*, est majoritairement étudiée dans la littérature scientifique. Elle consiste à modéliser généralement le fonctionnement économique d'un ensemble d'exploitations agricoles situées dans un périmètre géographique donné. Elle se fonde principalement sur des modèles d'optimisation consistant à maximiser le profit des exploitations soumises à un certain nombre de contraintes données, telles que la surface agricole disponible ou encore les surfaces en jachère à mettre en place sur chaque exploitation. L'introduction d'une taxe carbone dans le modèle permet d'obtenir ensuite la réponse de la région agricole modélisée en termes de réduction d'émissions. La taxe est ici apparentée à un coût et la réponse du modèle permet d'observer ensuite les conséquences de ce coût en termes de réductions d'émissions. A l'inverse, l'*approche technique* ou *ingénieur*, étudie le potentiel de chaque option de réduction tant sur leur coût que sur leur réduction d'émissions. Ici l'on étudie d'abord les réductions d'émissions liées à une technologie donnée et l'on en déduit ensuite le coût d'abattement en fonction du degré de mise en place des mesures de réduction. Les données nécessaires pour calculer le coût d'abattement sont collectées à partir d'un ensemble de fermes tests pour différentes techniques, ce qui permet d'obtenir des résultats généralement plus précis pour chaque option de réduction. Souvent, le nombre de techniques étudiées est également plus important dans le cas de l'approche ingénieur que dans le cas de l'approche économique.

En termes de résultat, une différence notable entre les deux approches se manifeste au niveau de l'approche technique par l'obtention de coûts marginaux d'abattement négatifs pour certaines options (Moran et Al., 2010 et MacKinsey et Al., 2009). L'existence de coûts négatifs réels est néanmoins remise en question. Vermont et De Cara (2010) estime en effet que ces derniers traduiraient plutôt l'absence de prise en compte de certains coûts cachés (diffusion de l'information, barrières administratives, etc.) plutôt qu'une réelle opportunité de diminuer les émissions tout en augmentant les marges économiques des agriculteurs. Les figures a et b de l'annexe 1 présentent des exemples de courbes de coût marginal d'abattement issues d'approches techniques. Un constat important est que chaque option est associée à un coût marginal constant – d'où la présence de paliers successifs. Ce constat sous-entend que le potentiel économique est le même au sein des sous-ensembles du territoire étudié ou encore que l'impact de chaque option sera le même quels que soient les zones, les terres, les exploitations considérées. Or, il semble difficile d'envisager un tel cas

de figure. En effet, dès lors que les types de sols, les systèmes agricoles, le climat et les rendements apparaissent très différents d'une région à l'autre, ces coûts marginaux d'abattement devraient apparaître variables, y compris pour une même option de réduction.

Les résultats des travaux menés selon la méthode économique apparaissent sous la forme de courbes lisses et croissantes, sans présence de coûts négatifs (En annexe 1 : Schneider et MacCarl 2007 ; DeCara 2005). Toutefois, le périmètre des différentes mesures envisagées apparaît relativement restreint comparé à l'éventail des solutions disponibles, comme le souligne Moran, 2010. La force de la méthode employée par DeCara et Al., 2005 réside dans le nombre important de types d'exploitations modélisées (50 000), mais seules une optimisation de l'alimentation animale, une baisse du nombre d'animaux, une réduction de la fertilisation et une conversion des terres en prairies ou en forêt ne sont envisagées pour réduire les émissions agricoles. Schneider et MacCarl (2006) envisage un nombre plus important d'options de réduction, mais leur évaluation se limite au périmètre géographique des Etats-Unis.

Parmi les différents travaux mentionnés ci-dessus, l'option des légumineuses a été étudiée plus spécifiquement par Moran et Al. (2010) pour la construction d'une courbe marginale d'abattement au niveau du Royaume-Uni. L'objectif de ce travail était de comparer le potentiel des différentes mesures d'atténuation des gaz à effet de serre (GES), sans pour autant se montrer exhaustif sur chacune d'entre elles. Ainsi, les données employées dans ce travail correspondent à des moyennes calculées au niveau du pays dans son ensemble. Le coût marginal d'abattement obtenu apparaît donc constant et atteint un niveau très important (14 280 £/tCO₂eq !) tandis qu'aucune distinction n'est opérée entre les différentes régions du Royaume-Uni. Les autres méthodologies de la littérature scientifique (approche économique), plus restrictives sur le champ des mesures à appliquer, n'envisagent tout simplement pas cette option. En France, il existe actuellement une évaluation économique du potentiel de réduction des légumineuses effectuée dans le cadre d'une méthodologie de projets domestiques. Cette méthodologie a été élaborée par la coopérative agricole InVivo et propose une analyse financière au niveau de trois départements français (InVivo, 2011). Si les principes retenus par cette étude sont intéressants, il reste à évaluer le potentiel économique des légumineuses à l'échelle de la France entière.

B. Proposition d'une méthodologie spécifique aux légumineuses

Compte-tenu de l'absence d'évaluation fine effectuée sur le coût de l'atténuation des GES par le biais des légumineuses dans la littérature scientifique, nous nous proposons d'étudier cette option au niveau de la France entière tout en évaluant la répartition géographique de ce coût entre les différents départements français. Sans opposer les deux approches d'évaluation du coût d'abattement identifiées dans la littérature scientifique, nous ne préjugeons pas de la pertinence de l'une par rapport à l'autre et les considérons plutôt comme complémentaires. Pour ce qui est de notre évaluation, nous choisissons ici d'adopter une démarche intermédiaire en analysant respectivement les coûts et le potentiel de réduction des légumineuses, ce qui s'apparente davantage à l'approche ingénieur. Toutefois, une composante comportementale des agriculteurs est incluse dans notre simulation (elle sera étudiée dans l'analyse de sensibilité de la partie III), ce qui éloigne ici notre étude d'une approche ingénieur pour la rapprocher de la démarche économique.

1. Un principe reprenant celui de la méthodologie des projets domestiques sur l'insertion des légumineuses

Le principe de la méthode employée repose sur le calcul de réductions d'émissions d'un côté et sur le calcul d'un coût de l'autre. Nous reprenons ici les effets retenus dans la méthodologie liée à l'introduction des légumineuses dans les rotations agricoles (InVivo, 2011) tout en utilisant d'autres variables d'entrées. Les réductions d'émissions reposent sur la capacité naturelle des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique pour assurer leur propre croissance, à la différence des autres cultures ne disposant pas de cette capacité. On ne tient pas compte ici des émissions liées à la fabrication industrielle des engrais en amont de l'agriculture, seules sont pris en compte ici les émissions au niveau de la parcelle agricole. Le coût de l'introduction des légumineuses est un coût d'opportunité lié au fait que les légumineuses sont des cultures moins rentables que les autres cultures dans la plupart des départements, comme il a été souligné précédemment dans cet article.

Compte-tenu de la résolution des données sources issues de bases de données publiques, nous avons dû fixer la résolution de notre simulation au niveau départemental. Chacun des départements français est donc considéré comme une ferme caractérisée par une certaine composition de son assolement agricole. De futurs approfondissements permettront d'accéder à une échelle plus fine, mais pour le moment nous considérerons que le panel de 96 départements fermes (notre étude se concentre uniquement sur les départements métropolitains), construit à partir des données publiques disponibles, suffit pour avoir une bonne représentation du coût d'abattement des légumineuses en France. L'agrégation des coûts et des potentiels de l'ensemble des fermes-départements permet par la suite d'obtenir une estimation du coût d'abattement au niveau de la France entière. Les calculs effectués sont détaillés dans la suite de cet article.

2. L'hypothèse de rationalité du comportement économique des agriculteurs.

L'introduction de surfaces supplémentaires en légumineuses, à la base de la simulation, suppose d'augmenter les surfaces initiales de légumineuses dans les fermes-départements. L'assolement total de chaque département ne pouvant augmenter, l'introduction de légumineuses doit par conséquent s'effectuer au détriment d'autres cultures non légumineuses.

Par ailleurs, les différentes espèces de cultures étudiées ici⁵, sont caractérisées par des émissions de gaz à effet de serre (GES) et par des marges économiques qui leur sont propres. Ces deux variables ont été déterminées pour chaque culture dans chaque région de France (voir le détail des calculs dans la partie suivante). Par conséquent, il est aisé de comprendre que le mode d'insertion des légumineuses dans les assolements, soit les espèces de cultures qui vont être remplacées par les surfaces supplémentaires de légumineuses, dans chaque ferme-département, sera un fort déterminant du coût d'abattement obtenu.

L'hypothèse qui a été retenue pour cette simulation est que les surfaces supplémentaires en légumineuses se substitueront en priorité aux cultures présentant une marge économique faible par unité de gaz à effet de serre émise. Cette hypothèse correspond à la représentation d'un comportement économique rationnel des agriculteurs : plus une culture détient une marge économique importante par émission, moins elle sera susceptible de céder des surfaces aux légumineuses (voir l'exemple de la Bourgogne en annexe 2). Nous considérons cependant une limite

⁵ Blé tendre, Blé dur, Orge d'hiver, Orge de Printemps, Maïs, Tournesol, Colza, Poil, Féveroles, Luzerne

de 30% au-delà de laquelle une telle substitution n'est plus possible. Ainsi une culture non légumineuse ne peut céder plus de 30% de sa surface initiale. Si l'introduction de surface de légumineuses dépasse cette limite, les légumineuses vont aller occuper des surfaces d'autres céréales en veillant également à ne pas dépasser cette limite. Cette limite de prise, appelée variable *limite*, est une des variables d'entrée de notre modèle. Nous lui affectons à présent une valeur de 30%, considérant que cette valeur est suffisamment faible pour ne pas trop perturber la composition des assolements agricoles actuels et notamment l'équilibre des prix, et considérant que ce niveau est suffisamment élevé pour que le coût d'abattement ne soit trop élevé en obligeant les légumineuses à remplacer rapidement des cultures à la marge brute élevée. L'influence de cette variable sur le coût d'abattement sera explicitée dans la partie d'analyse de sensibilité de la partie III.

Enfin, il est important de souligner que cette représentation de l'introduction des légumineuses par l'agriculteur correspond davantage à un raisonnement sur le choix des cultures sous forme d'assolement que sous forme de rotation. En effet, un raisonnement en termes de rotation intègre davantage la notion de succession temporelle des cultures sur plusieurs années, alors qu'un raisonnement sous forme d'assolement consiste plutôt à cultiver des cultures sur un an en fonction du prix des cultures sans nécessairement tenir compte des successions entre années. Deux raisons justifient ce choix. La première est d'ordre pratique : il est beaucoup plus facile de modéliser le choix de la composition en culture d'un département sur un an plutôt que de tenir compte d'une succession sur plusieurs années. La deuxième est liée au fait qu'en raison de la volatilité de plus en plus forte des prix agricoles, impliquant de fortes variations des prix agricoles d'une année sur l'autre, les agriculteurs sont de moins en moins enclins à adopter des raisonnements s'étalant sur plusieurs années et sont fortement influencés par les prix des différentes cultures dans leur décision.

3. Calcul du coût et du potentiel de réduction

En raison de la rémanence de l'azote fixé par les légumineuses dans les sols agricoles ne dépassant pas 17 mois (CGDD, 2010), il a été choisi de calculer de coût d'introduction des légumineuses et des réductions associées d'émissions pour deux années consécutives :

- Première année

La première année est celle de l'introduction des légumineuses. Ces dernières vont occuper des surfaces qui étaient préalablement investies par d'autres cultures. Il va donc y avoir sur ces surfaces un préjudice économique lié à la faible rentabilité des légumineuses, couplé à un bénéfice en termes d'atténuation des émissions de protoxyde d'azote dû à la moindre demande en engrais.

Calcul du potentiel de réduction des émissions

Le calcul du potentiel d'abattement s'effectue en comparant les émissions du scénario dans lequel on introduit des légumineuses, le scénario *atténuation*, aux émissions du scénario de référence. Dans chacun de ces scénarios les émissions sont obtenues en multipliant dans chaque département la surface de chaque céréale $S_{k,i}$ par un facteur d'émissions $f_{k,i}$ qui lui est propre. Seule la variable $S_{alt,k,i}$ varie entre les deux scénarios.

$$\Delta_{\text{émissions,an1}} = \text{Emissions}_{\text{atténuation}} - \text{Emissions}_{\text{référence}}$$

$$\text{Emissions}_{\text{atténuation}} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (f_{k,i} \times S_{alt,k,i})$$

$$\text{Emissions}_{\text{référence}} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (f_{k,i} \times S_{\text{réf},k,i})$$

$S_{\text{alt},k,i}$: Surface de la culture i dans le département k dans le scénario *atténuation* d'introduction de légumineuses.

$S_{\text{réf},k,i}$: Surface de la culture i dans le département k dans la situation de référence qui correspond à l'état de l'assolement en 2010. L'information est issue de la base de données Agreste

$f_{k,i}$: Facteur d'émissions de la culture i au sein du département k exprimé en kgCO₂eq par hectare. Ce facteur intègre les émissions liées à la fertilisation minérale et à l'épandage des déjections animales. Le niveau de résolution est ici régional, c'est-à-dire que les données utilisées sont les mêmes pour les différents départements d'une même région. Les informations concernant les doses d'azote apportées sous forme d'engrais minéral pour chaque culture sont issues des dernières enquêtes des Pratiques Culturelles de l'Agreste de 2006. Les doses d'azote apportées sous forme d'engrais organique ont été calculées par la Chaire Economie du Climat en fonction du nombre d'animaux d'élevage dans chaque région française. A partir de ces doses d'azote apportées et suivant la méthode préconisée par le GIEC dans les lignes directrices pour les inventaires nationaux⁶, les émissions de protoxyde d'azote ont été calculées.

Calcul du coût de réduction

Suivant le principe du calcul du potentiel de réduction, le calcul du coût d'abattement s'effectue en comparant, au niveau de chaque ferme-département, la marge dans le scénario *atténuation* à la marge obtenue dans le scénario de référence. Dans chacun de ces scénarios, les émissions sont obtenues en multipliant dans chaque département la surface de chaque céréale $S_{k,i}$ par une marge $\text{marge}_{k,i}$ qui lui est propre. Seule la variable $S_{\text{alt},k,i}$ varie entre les deux scénarios. Le coût d'abattement présenté ici correspond au coût d'opportunité sur les surfaces sur lesquelles les cultures de légumineuses remplacent les cultures non-légumineuses.

$$\Delta_{\text{marge},\text{an1}} = \text{Marge}_{\text{alternatif}} - \text{Marge}_{\text{référence}}$$

$$\text{Marge}_{\text{atténuation}} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (\text{marge}_{k,i} \times S_{\text{alt},k,i})$$

$$\text{Marge}_{\text{référence}} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (\text{marge}_{k,i} \times S_{\text{réf},k,i})$$

$\text{marge}_{k,i}$: Marge brute (€/ha) de la culture i dans le département k. Cette donnée est la même parmi les départements d'une même région. Elle est calculée à partir des données du rapport EcophytoR&D 2009. Elle se calcule de la manière suivante :

$$\text{marge}_{k,i} = (\text{prix}_{k,i} * \text{rendement}_{k,i}) - (\text{charges_phyto}_{k,i} + \text{charges_engrais}_{k,i} + \text{charges_semences}_{k,i})$$

Prix (€/q) : Le niveau de résolution de cette donnée est national.

⁶ Soit la prise en compte des émissions ayant lieu directement sur le champ, mais également des émissions indirectes ayant lieu après lessivage ou vaporisation, les émissions liées également aux résidus des cultures.

Rendement (q/ha) : Le niveau de résolution de cette donnée est régional. Il en résulte que, au niveau de chaque département, le rendement de chaque culture est considéré comme constant.

Charges Phyto (€/ha) : Le niveau de résolution de cette donnée est régional.

Charges Engrais (€/ha) : Le niveau de résolution de cette donnée est régional.

Charges Semences (€/ha) : Le niveau de résolution de cette donnée est régional.

- Deuxième année

Lors de la deuxième année, l'introduction de légumineuses dans l'assolement agricole se poursuit. On retrouve alors les deux effets entrant en jeu lors de la première année, mais aussi deux autres effets sur les surfaces de cultures non légumineuses précédées par les légumineuses introduites lors de cette première année. Ces deux derniers effets sont liés à la rémanence dans le sol de l'azote des légumineuses qui permet de réduire pour les cultures suivantes l'apport en engrais minéral, entraînant alors une baisse des émissions liée à l'effet précédent et à un allègement des charges.

Calcul du potentiel de réduction

Le calcul du potentiel de réduction lors de la deuxième année s'effectue en comparant, comme lors de la première année, les émissions de la deuxième année du scénario *atténuation* aux émissions du scénario de référence. Les émissions du scénario *atténuation* sont obtenues en multipliant le facteur d'émissions par hectare de chaque culture par la surface occupée. Une distinction est toutefois effectuée entre les cultures précédées par des légumineuses la première année auxquelles sont attribuées un nouveau facteur d'émissions $f_{k,i,pré}$ et les cultures non précédées par des légumineuses, qui conservent leur facteur d'émissions $f_{k,i}$.

$$\Delta_{\text{émissions},an2} = \text{Emissions}_{\text{atténuation},an2} - \text{Emissions}_{\text{référence}}$$

$$\text{Emissions}_{\text{atténuation},an2} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n \left((f_{k,i,pré} \times S_{k,i,pré}) + (f_{k,i} \times S_{k,i,nonpré}) \right)$$

$f_{k,i,pré}$: Facteur d'émissions des surfaces de la culture i (en kgCO₂eq/ha) dans le département k précédées par des légumineuses. Il a été calculé en fonction de l'effet précédent des légumineuses se traduisant par une baisse d'apport en azote de -20 à -40 kgN/ha pour un même objectif de rendement (CGDD, 2009).

$S_{k,i,pré}$: Surface de la culture i dans le département k précédées par des légumineuses la première année.

$S_{k,i,nonpré}$: Surface de la culture i dans le département k non précédées par des légumineuses la première année.

Calcul du coût d'abattement

Le calcul du coût de réduction lors de la deuxième année s'effectue en comparant, comme pour la première année, le profit de chaque ferme-département lors de la deuxième année du scénario *atténuation* au profit du scénario de référence. Le profit du scénario *atténuation* est obtenu en multipliant la marge par hectare de chaque culture par la surface occupée. Une distinction est effectuée entre les cultures précédées par des légumineuses la première année auxquelles sont

attribuées une nouvelle marge $marge_{k,i,pré}$, plus importante que la marge de la première année, et les cultures non précédées par des légumineuses, qui conservent leur marge $marge_{k,i}$.

$$\Delta_{marge, an2} = Marge_{atténuation, an2} - Marge_{référence}$$

$$Marge_{atténuation, an2} = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n ((marge_{k,i,pré} \times S_{k,i,pré}) + (marge_{k,i} \times S_{k,i,nonpré}))$$

$marge_{k,i,pré}$: Marge brute de la culture i dans le département k précédées par des légumineuses. Elle a été calculée en fonction de l'effet précédent des légumineuses se traduisant par une baisse d'apport en azote et donc par une baisse des charges en engrais.

- Coût moyen d'abattement

Le coût moyen d'abattement correspond aux réductions engendrées divisées par le coût de ces d'abattement. Il est exprimé en €/tCO₂eq.

$$Coût\ moyen\ d'abattement = \frac{\Delta_{émissions}}{\Delta_{marge}}$$

4. Illustration des effets considérés dans la simulation au sein d'un département fictif

La figure 3 illustre les différents effets représentés dans la simulation. Nous prenons ici le cas illustratif d'un département k dont l'assolement agricole est composé de trois cultures (la culture de la céréale i, la culture de la céréale j et les légumineuses représentées en vert dans le schéma). Dans ce département, la surface initiale de légumineuses représente 20% de la sole agricole du département. Le scénario alternatif consiste à doubler cette surface, ce qui porte la part totale des surfaces en légumineuses à 40%.

La culture ayant la marge la plus haute étant la culture i, c'est d'abord la culture j qui va céder sa surface aux légumineuses. La limite maximale fixée de prise de surface des légumineuses sur les cultures non légumineuses s'élève à 30% de la surface des céréales, comme il a été souligné précédemment. Ainsi, la culture j cède 30% de sa surface et le reste des surfaces de légumineuses à introduire est affecté sur la culture i.

Pour la deuxième année, l'hypothèse retenue est que l'introduction de légumineuses supplémentaires n'a pas lieu sur les mêmes parcelles que lors de la première année. On suit ici la pratique culturale conduite par les agriculteurs consistant à instaurer une rotation quinquennale entre les différentes parcelles cultivées en légumineuses afin d'éviter la prolifération des parasites. Ainsi, la totalité de l'azote restant dans le sol la première année bénéficiera aux cultures non-légumineuses et ces surfaces sont réparties de manière proportionnelle entre les cultures.

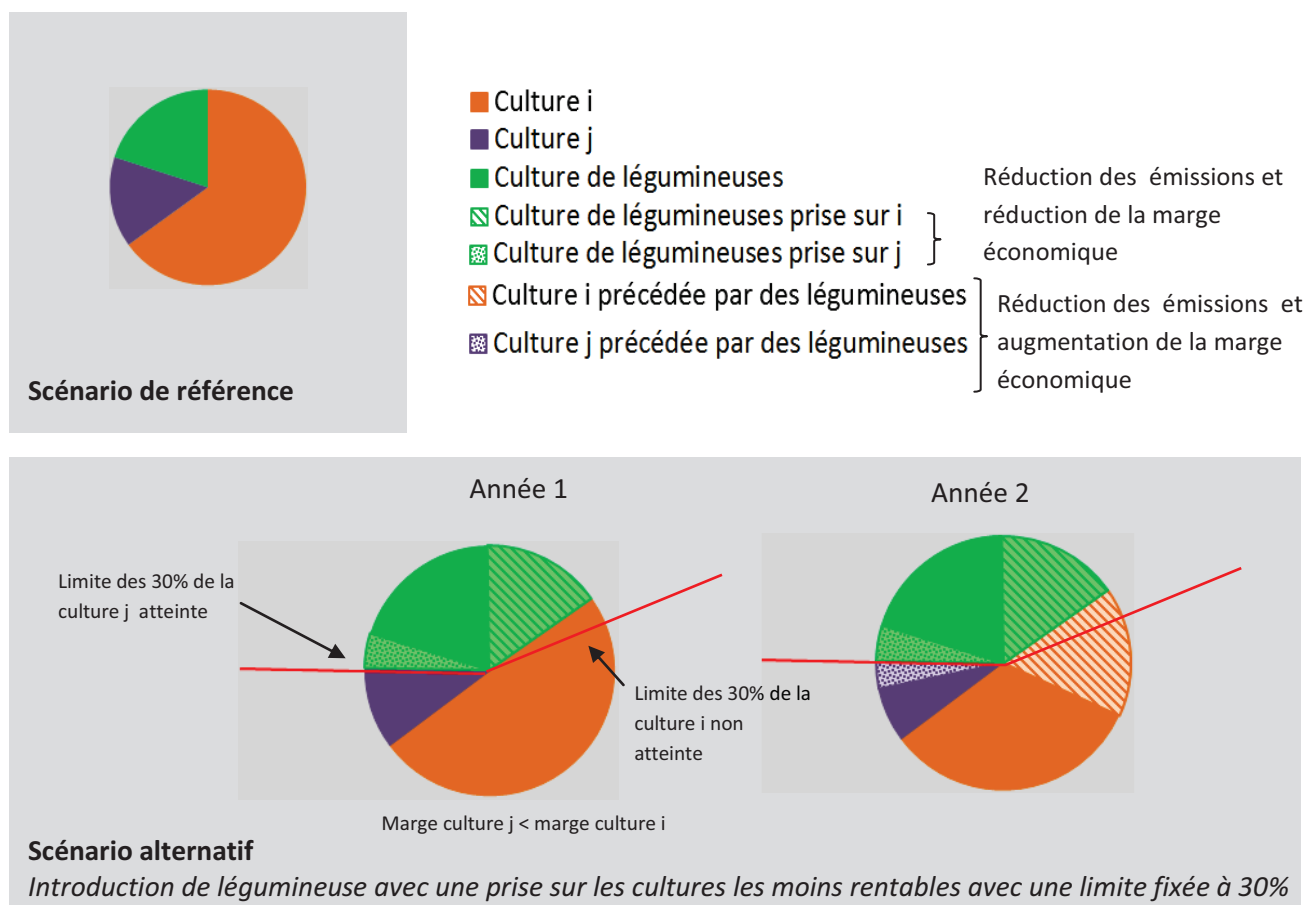


Figure 3 - illustration des effets représentés dans la simulation au niveau d'un département k fictif dont l'assolement agricole est composé de 3 cultures

III. Présentation des résultats

Il existe deux manières de procéder pour simuler l'introduction des légumineuses dans les assolements à l'aide notre méthode. La première consiste d'abord à augmenter dans chaque département les surfaces de légumineuses par un même coefficient pour ensuite observer les réductions d'émissions et les coûts engendrés. La deuxième méthode consiste d'abord à fixer un même coût à atteindre parmi tous les départements, pour ensuite observer les émissions engendrées et les surfaces introduites.

Nous verrons que ces deux méthodes permettent d'obtenir des résultats en termes de coûts et de réductions d'émissions significativement différents l'une de l'autre. Nous commençons par exposer la méthode consistant à augmenter dans chaque département la surface en légumineuses par un même facteur.

A. Première approche : doublement uniforme des légumineuses dans chacun des départements

Le rapport du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD, 2009) propose pour limiter la dépendance de la France dans son approvisionnement en protéines végétales de réorienter les rations des animaux d'élevage. Dans ce but, il suggère de diminuer en France la consommation de soja et d'utiliser davantage de légumineuses métropolitaines. Il estime ainsi que les filières avicole, porcine et bovine pourraient diminuer respectivement leur consommation de tourteaux de soja d'environ 29, 820 et 300 kilotonnes. Une telle substitution nécessiterait l'incorporation de près de 1,82 million de tonnes de légumineuses à graines et de 1,30 de légumineuses fourragères dans les rations, soit une implantation supplémentaire de 514 000 hectares, selon le rapport. Cet ajout de surface reviendrait à doubler la surface actuelle, portant alors la surface totale en légumineuses à celle cultivée en 1990.

Dans la continuité de leur évaluation, nous proposons ici de mettre en application notre méthodologie de calcul pour déterminer le volume des réductions d'émissions en jeu et les coûts associés à la réalisation de cet objectif d'approvisionnement. Nous choisissons ici de doubler la surface en légumineuses dans chaque département, donc d'augmenter de manière proportionnelle la surface de légumineuses initiale, afin de tenir compte de l'organisation actuelle des filières dans chaque département, plutôt que d'augmenter significativement les légumineuses dans des départements qui ne bénéficient pas des structures nécessaires.

i. Résultats obtenus pour le potentiel de réduction

Les résultats obtenus pour le potentiel de réduction sont présentés dans la figure 4. On constate tout d'abord que les départements qui présentent les potentiels de réduction les plus importants sont les départements du nord-est de Paris. Cette observation s'explique par le fait que les surfaces supplémentaires en légumineuses sont proportionnelles à la surface initiale en légumineuses dans chaque département. Par conséquent, les départements qui présentent le potentiel le plus élevé sont donc ceux dont la surface en légumineuses est initialement la plus élevée.

Au niveau de la France entière, le potentiel global de réduction est de 1,02 MtCO₂eq (approximativement 1% des émissions de GES de l'agriculture française) pour la première année. Le passage à la deuxième année s'accompagne d'une augmentation de ce potentiel de réduction à hauteur de 8% pour l'ensemble des départements. Le potentiel est alors porté à 1,11 MtCO₂eq.

ii. Résultats obtenus pour le coût de réduction : l'obtention de coûts négatifs dans certains départements

Les résultats obtenus pour le coût de l'introduction de légumineuses sont présentés dans la figure 5. On observe une répartition très hétérogène du coût entre les différents départements français. De manière générale, les coûts les moins élevés de cette introduction sont situés au centre, à l'est et nord de la France. Il apparaît même dans les régions situées dans la région parisienne et au nord-est de la France un coût négatif, soit un bénéfice, lié à l'introduction des légumineuses. Ceci est dû au fait que les légumineuses remplacent d'abord de l'orge qui dans le contexte économique de ces régions est moins rentable que les légumineuses. Au niveau national, le coût lors de la première année est de 158 millions d'euros tandis que celui de la deuxième année est de 141 millions d'euros.

L'obtention de coûts négatifs doit nous conduire à nous interroger sur la construction de notre modèle. En effet, pourquoi les agriculteurs dans la situation actuelle se refuseraient à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) si cela les conduirait à augmenter leur marge économique ? La présence de ces coûts négatifs va à l'encontre de notre hypothèse sur le comportement rationnel des agents économiques du modèle. Par conséquent, cela nous amène à en déduire que certaines barrières, impliquant *de facto* des coûts, n'ont pas été prises en compte dans notre simulation. Ces coûts, autres que les coûts d'opportunité étudiés ici, peuvent être des coûts d'administration, des coûts liés à la diffusion de l'information dans un secteur qui présente une très forte atomicité ou encore des coûts liés à la réorganisation de la filière agricole. Dans la littérature économique, ces coûts cachés sont souvent regroupés sous le terme de coûts dits de « transaction ».

iii. Résultats pour le coût moyen par tonne

Ce coût, au niveau national, atteint 155 €/tCO₂eq la première année et 122 €/tCO₂eq la seconde. Notons qu'il ne s'agit pas d'un coût marginal d'abattement, i.e. le coût de réduction de la dernière tonne réduite, mais le coût moyen de réduction c'est-à-dire égal au coût total de l'introduction divisé par la quantité totale de réductions obtenues. Il s'agit par ailleurs d'un coût moyen au niveau de la France entière qui masque de fortes hétérogénéités entre les départements. La figure 6 ci-dessous permet d'observer la répartition de ce coût moyen entre les différents départements français. On constate ainsi une ligne de clivage nord-sud, avec au nord des coûts moyens de réduction relativement faibles, parfois négatifs dans les régions au nord-est de Paris, et au sud des coûts très élevés de réduction. On en déduit ainsi que les régions où le coût d'introduction des légumineuses est le moins élevé ne sont pas forcément celles au plus fort potentiel de réduction (voir figure 4) (exemple : région Midi-Pyrénées / région Auvergne).

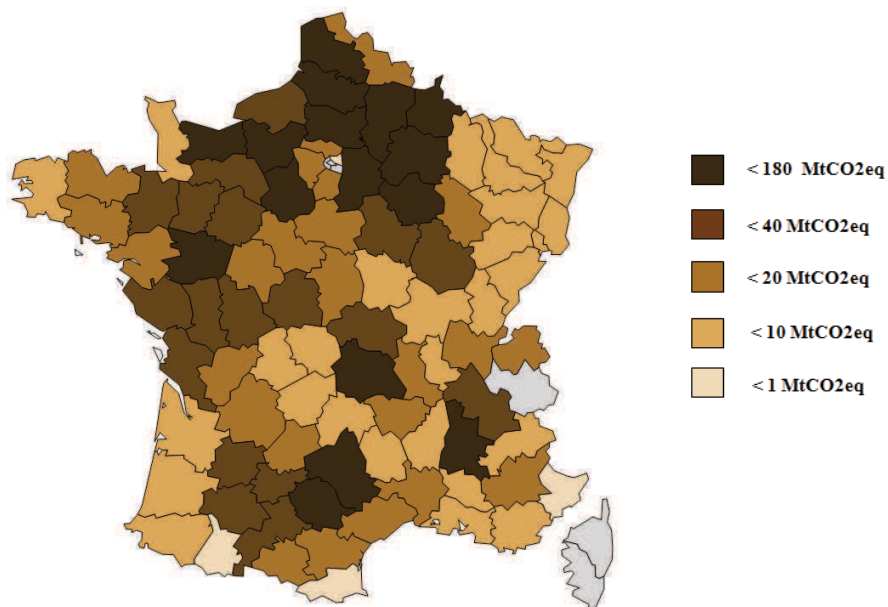


Figure 4 – Potentiel de réduction des émissions liées aux sols agricoles en doublant la surface en légumineuses (la variable *limite* de prise sur chaque culture est portée à 30%) – somme des années 1 et 2

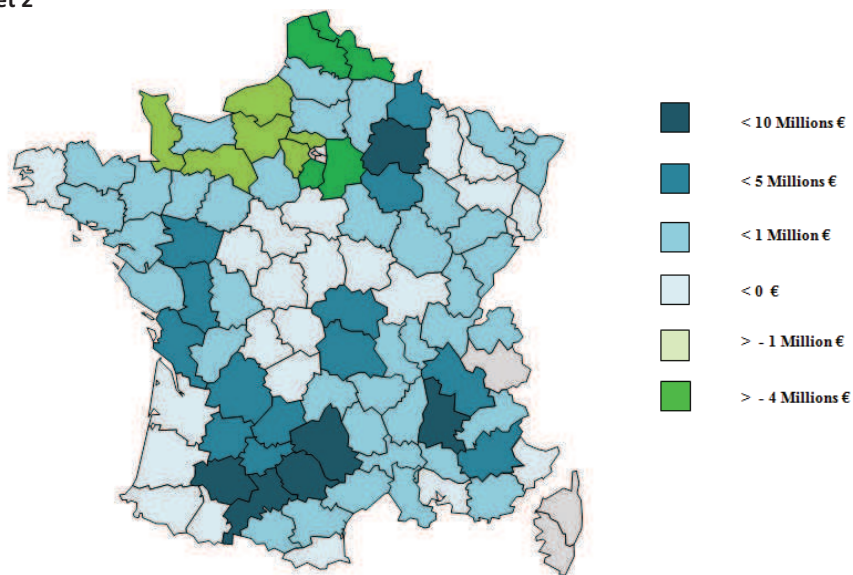


Figure 5 – Coût d'opportunité lié à un doublement de la surface en légumineuses dans chaque département (la variable *limite* est portée à 30%) – somme des années 1 et 2

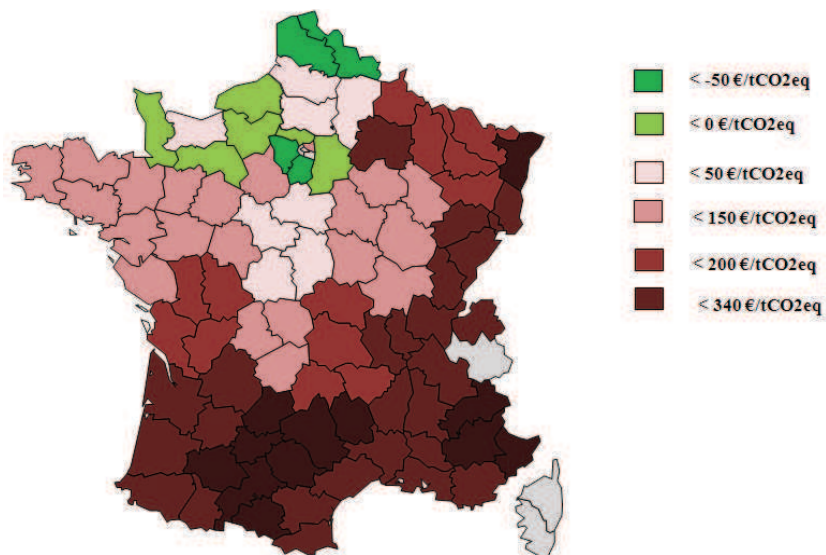


Figure 6 – Coût moyen d'abattement lié à un doublement de la surface en légumineuses (la variable *limite* est portée à 30%) – année 1 et 2

B. Deuxième approche : introduction des légumineuses par égalisation du coût marginal d'abattement.

Dans une démarche inverse, nous proposons cette fois-ci d'augmenter la part des légumineuses dans chaque département tant qu'un certain coût, identique entre les départements, par tonne de CO₂ équivalent n'a pas été atteint. Ici nous n'augmentons pas de manière uniforme la part des légumineuses dans tous les départements. Nous privilégions ainsi les départements où les conditions économiques sont les plus favorables pour l'implantation des légumineuses. Cette approche permettra d'améliorer l'efficacité économique de cette mesure.

Cet exercice commence au niveau de chaque département métropolitain par la construction de courbes de coût marginal d'abattement. Ainsi, nous augmentons dans chaque département la part des légumineuses par un même coefficient, en l'occurrence de 10%. Si le coût marginal que nous avons fixé comme objectif n'est pas atteint, alors nous continuons à augmenter de 10% la part des légumineuses. Les résultats obtenus sont affichés dans la figure 7 pour trois départements illustratifs de l'hétérogénéité existant en France. Ainsi dans le cas de l'Orne, il est économiquement plus facile d'introduire des légumineuses que dans la Haute-Vienne ou les Côtes d'Armor. Dans ces deux derniers départements, dès les premières parcelles introduites de légumineuses le coût marginal d'abattement est immédiatement très élevé (respectivement de 80 et 110 €/tCO₂eq). Il faudrait par conséquent que le prix du carbone soit supérieur respectivement à 80 €/tCO₂eq et 110 €/tCO₂eq pour que ces départements commencent à introduire des légumineuses dans leurs assolements.

L'hétérogénéité des résultats rend compte de la difficulté à appliquer un objectif uniforme entre les différents départements. Par exemple, si un objectif de réduction des émissions de 50 000 tCO₂eq était assigné pour chacun de ces trois départements, le coût total serait très important. A l'inverse, si un seul département, en l'occurrence l'Orne, réduisait seul 150 000 tCO₂eq, le coût total d'abattement serait minimal. Par conséquent, cette simulation démontre bien la nécessité de mettre en place des instruments prenant en compte l'hétérogénéité des coûts d'abattement entre les différentes régions françaises.

Par la suite, les courbes de coût marginal d'abattement obtenues pour chaque département français ont été agrégées pour obtenir une courbe marginale d'abattement au niveau national (figure 8). Elle permet ainsi de montrer les réductions obtenues, par l'intermédiaire des légumineuses, si un prix du carbone était appliqué dans l'agriculture. La figure 9 représente les différentes réductions d'émissions obtenues à partir d'un même prix du carbone (30 €/tCO₂eq). On observe approximativement la même répartition géographique de la figure 6 avec de plus grandes réductions d'émissions dans la partie nord de la France.

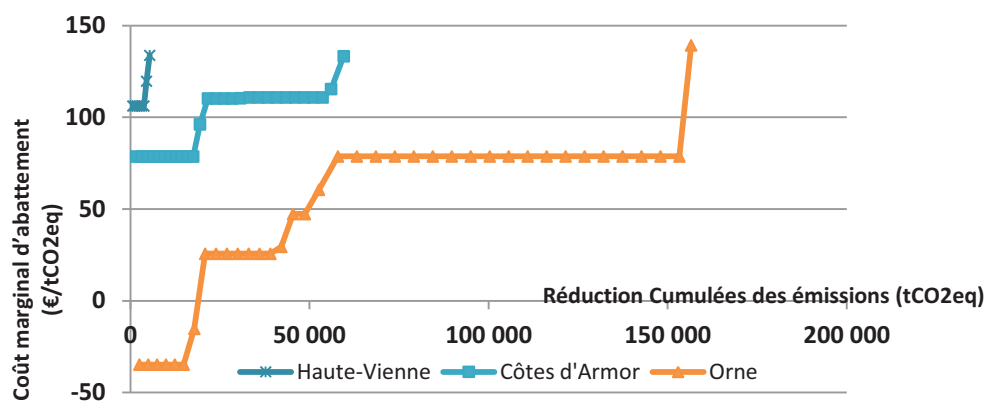


Figure 7 - Exemples de courbes de coût marginal d'abattement de trois départements –

- Chaque point sur les courbes correspond à 10% de légumineuses supplémentaires.
- Chaque palier correspond à une culture remplacée par des légumineuses, ainsi ce sont d'abord les cultures les moins rentables qui sont remplacées par les légumineuses. Il a été décidé que les cultures de légumineuses ne peuvent au maximum remplacer que 30% des surfaces d'une culture.
- L'aire sous la courbe correspond au coût total de réduction

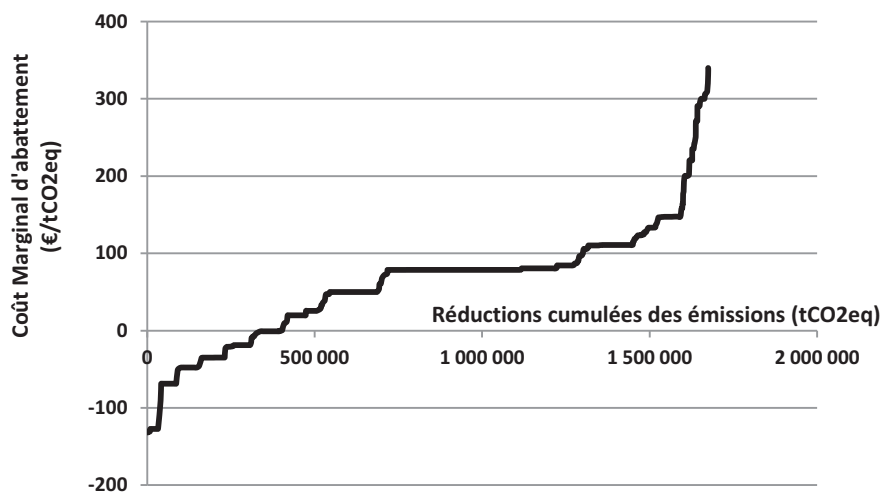


Figure 8 - Evolution du coût de réduction au niveau national par introduction de légumineuses supplémentaires dans l'assolement agricole

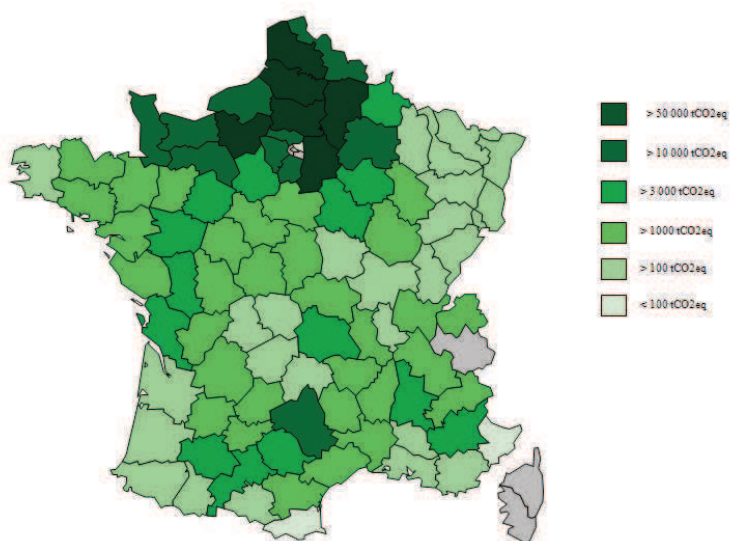


Figure 9 - Répartition géographique du potentiel de réduction via les légumineuses pour un coût marginal de 30 €/t (limite : 30%)

C. Comparaison des deux approches

Nous pouvons maintenant faire une comparaison des deux approches présentées ci-dessus. Cette comparaison s'effectue pour un doublement de la surface en légumineuses par rapport à la surface actuelle (voir tableau 2) dans les deux cas de figure. Cette comparaison a pour but de mettre en regard deux approches divergentes dans la mise en place de politique agricole. S'il est difficilement envisageable qu'un gouvernement puisse proclamer, pour atteindre un objectif d'atténuation, de multiplier la surface en légumineuses par deux dans tous les départements français, la première approche, visent à représenter la logique d'un objectif réglementaire uniforme. A l'inverse, la deuxième approche vise à représenter les effets d'une politique climatique par le biais d'un prix du carbone. La comparaison de ces deux approches vise à montrer les pertes d'efficacité potentielle d'une mesure réglementaire, vis à vis d'une mesure incitative par les coûts ; cette perte d'efficacité étant due à l'absence de prise en compte des spécificités départementales des agriculteurs.

Nous démontrons ainsi que l'approche favorisant l'introduction de légumineuses par égalisation du coût marginal d'abattement permet d'atteindre davantage de réduction d'émissions pour un même coût global (autour de 300 millions d'euros). Il en résulte un coût moyen d'abattement inférieur de 30 % au cas considérant un doublement uniforme dans tous les départements.

Tableau 2 - Comparaison des coûts et des réductions d'émissions pour doubler les surfaces de légumineuses en France entre deux possibilités de mode d'insertion des légumineuses dans les assolements départementales

		Doublement uniforme de la surface des légumineuses	Doublement par égalisation du coût marginal
Surface finale	Millions hectares	1,5 (12% de la SAU)	
Coût total	Millions d'euros	300	302
Coût marginal dans chaque département	€/tCO ₂ eq	-	133
Emissions réduites	Millions tCO ₂ eq	2,13	3,2
Coût moyen	€/CO ₂ eq	141	93

D. Sensibilité du coût marginal d'abattement aux variables agricoles

La présentation des courbes de coût marginal d'abattement dans la littérature scientifique laisse penser bien souvent que ces courbes sont immuables et invariantes. Dans cette partie, nous démontrons qu'il n'en est rien et que le tracé des courbes de coût marginal d'abattement est fortement sensible aux variables d'entrée de la simulation. Nous analysons ici cette sensibilité en fonction de divers degrés de rationalité économique des agriculteurs, de l'évolution de l'ensemble des prix des céréales puis de l'évolution des prix des intrants.

Une forte sensibilité à la rationalité économique des agriculteurs

En raison de la grande diversité du monde agricole, des systèmes de cultures et des types d'agricultures, entre les départements, mais également au sein des départements eux-mêmes, la réponse des agriculteurs aux mêmes signaux économiques ne va pas être la même. Pour certains agriculteurs, les marges engrangées sur les différentes cultures seront un déterminant majeur

lorsqu'ils vont décider la composition de leur assolement de l'année qui suit, quand pour d'autres, ces données ne seront qu'un paramètre parmi d'autres dans la prise de leur décision.

Cette variabilité des comportements face aux mêmes signaux économiques s'explique tout d'abord par une variabilité de l'accès à l'information des agriculteurs. Certains agriculteurs structurés en coopérative ou bien ayant reçu la formation adéquate se tiennent régulièrement au fait de l'évolution des prix agricoles, quand d'autres, non regroupés en coopératives ou bien chez lesquels se posent encore des problèmes d'accès pratique à l'information (lié à la distance ou bien à une absence de connexion internet), ne peuvent suivre de manière continue le cours des prix. Cette variabilité s'explique également par une différence de systèmes agricoles. Les agriculteurs, cultivant exclusivement des céréales dans leur exploitation, exportent leur production vers l'extérieur et ont donc tout intérêt à tenir compte des prix agricoles, quand les agriculteurs gérant des exploitations en polyculture et élevage utilisent une partie de ce qu'ils cultivent pour l'alimentation du bétail et doivent, par conséquent, conserver quelques cultures, mêmes si ces dernières ne présentent pas la marge la plus élevée.

Cette variabilité de la réponse peut être illustrée dans la simulation à travers la variable *limite* qui permet de fixer la possibilité donnée à l'agriculteur à exploiter les parcelles de cultures les moins rentables pour cultiver des légumineuses. Cette variable *limite* a été introduite dans la partie numéro II de ce rapport et correspond à la limite jusqu'à laquelle les légumineuses peuvent prendre des surfaces sur les autres cultures. Nous rappelons que, jusqu'à présent, cette limite a été fixée à 30% de manière uniforme pour toutes les fermes-départements. Ainsi, lorsque des surfaces de légumineuses sont introduites, elles ne peuvent recouvrir plus de 30% de la surface d'une culture, après quoi l'agriculteur affecte les légumineuses sur d'autres cultures. Si maintenant, la variable *limite* est rehaussée, l'agriculteur aura alors davantage d'accès au coût d'abattement les plus faibles. Ce cas de figure correspondra davantage à l'illustration d'un comportement économiquement rationnel. Inversement, plus la variable *limite* est abaissée, moins l'agriculteur utilise les parcelles les moins rentables, et donc plus il adopte un comportement économique visant à la diversification de ses activités.

La sensibilité à cette variable des courbes de coût marginal d'abattement est ici observée (voir figure 10). Nous observons alors que, plus il est donné la possibilité aux légumineuses de prendre des surfaces sur les cultures moins rentables (par exemple pour une variable *limite* fixée à 70% ou 90%), soit plus la variable *limite* augmente, plus la pente de la courbe d'abattement diminue. On observe ainsi une fourchette d'incertitude très large allant, pour un prix du carbone de 30 €/tCO₂eq, de 0,2 à 1,5 millions de tonnes CO₂ équivalent, liée aux différentes hypothèses retenues sur la rationalité de l'ensemble des agriculteurs. Nous rappelons ici que, dans les différents scénarios présentés dans la figure 10, la rationalité est la même pour l'ensemble des agriculteurs du panel. Faute d'accès à des données plus informatives, la variable *limite* a été fixée de manière exogène et de manière uniforme entre tous les départements français. Nous assistons ainsi à une limite de notre simulation. Par ailleurs, l'accès à un niveau de résolution interdépartemental aurait permis de pouvoir distinguer plusieurs groupes d'agriculteurs, chacun caractérisé par une variable *limite* spécifique. L'accès à ce niveau de résolution constitue une piste d'approfondissement de ce travail.

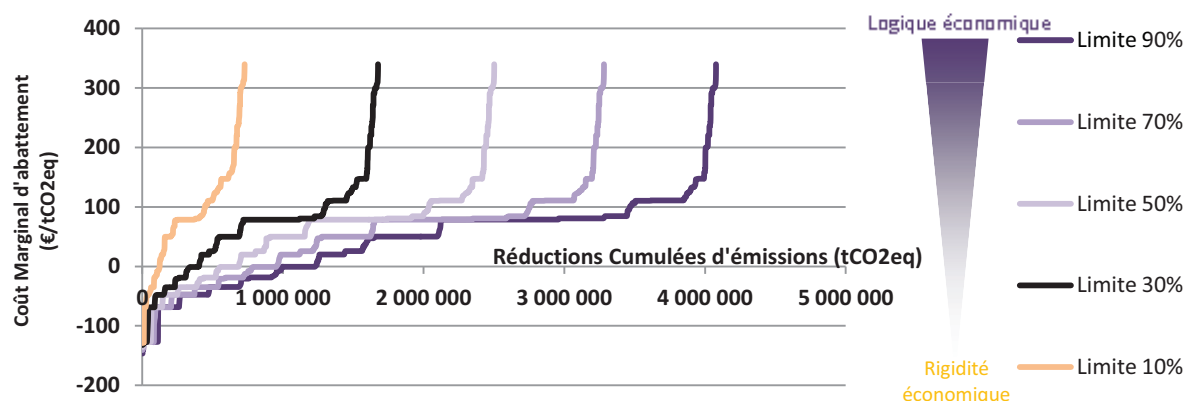


Figure 10 - Evolutions du coût marginal d'abattement en fonction du pourcentage de légumineuses introduites

Sensibilité du coût d'abattement aux données économiques

Les courbes de coût d'abattement, présentées précédemment, ont été calculées à partir des prix des céréales aux producteurs tels qu'ils étaient pour la campagne de 2006 (Blé tendre (125€/t), blé dur (146€/t), orge d'hiver (90€/t), orge de printemps (110€/t), maïs (110€/t), tournesol (240€/t), colza (240€/t), prix des légumineuses (115€/t en moyenne), qui correspondent relativement aux prix de 2006 et actuels. Nous regardons ici l'évolution de cette courbe en fonction de différentes variations des prix des cultures non-légumineuses (voir figure 11). On observe ainsi une forte sensibilité du coût marginal d'abattement à cette variable. Un doublement du prix des céréales suffit à rendre l'introduction de légumineuses très onéreuse et donc en dehors de toute considération. A l'inverse, une baisse de prix rend l'introduction de légumineuses dans les assolements très attractive. A titre d'exemple, une baisse du prix des céréales de 20%, permet pour un même prix du carbone à 30 €/tCO₂eq de faire passer les réductions induites de 500 000 à 3 000 000 de tonnes CO₂ équivalent. En revanche, une hausse de 50% du prix des céréales, induit des réductions nulles pour un même niveau du prix du carbone.

Ces observations rendent compte de la difficulté à pouvoir prédire les impacts que pourrait avoir un prix du carbone dans le contexte actuel de la forte volatilité des prix des céréales. Une évolution de – 20% des prix est souvent observée d'une année à l'autre. De même, des augmentations de l'ampleur de 50%, si elles ont été relativement isolées dans l'évolution des cours des céréales de ces 20 dernières années, n'en sont pas moins impossibles comme le prouve le pic observé des prix entre l'année 2007-2008. Ce constat plaide ainsi pour la mise en place d'instruments de régulation innovants permettant de lisser davantage les prix sur plusieurs années.

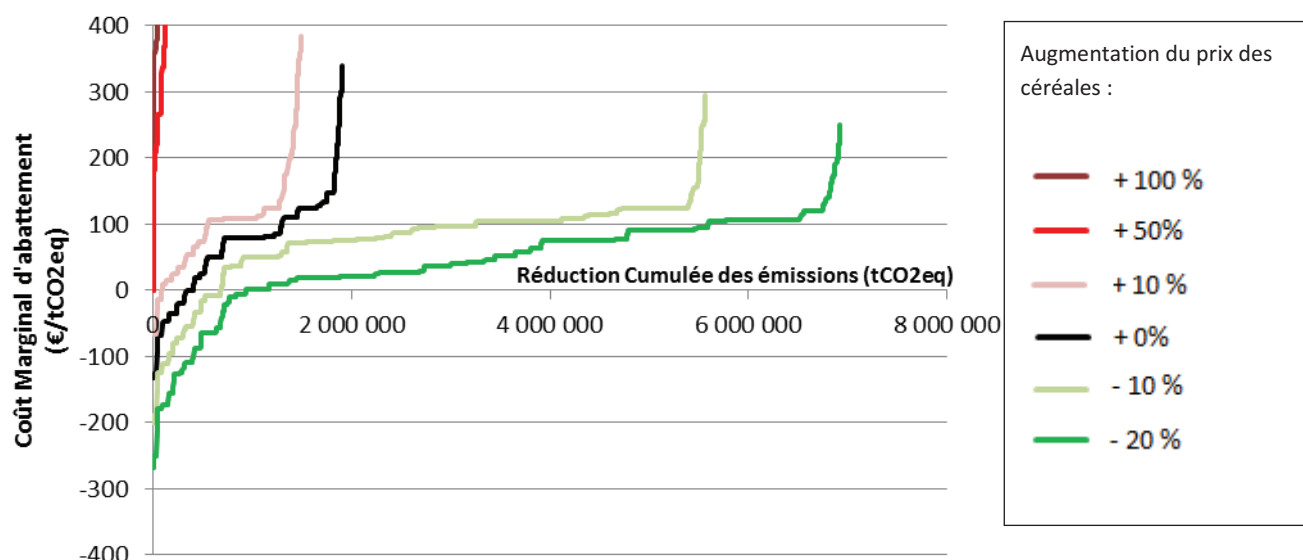


Figure 11 – Sensibilité du coût d'abattement à la variation de l'ensemble des prix des céréales (autres que légumineuses) – variable limite à 30%

Il est à noter également une très grande sensibilité du coût d'abattement au prix des intrants (figure 12). Ainsi, une augmentation de 20% du prix des intrants favorise l'introduction des légumineuses en diminuant le coût d'abattement. Une augmentation beaucoup forte de 100% du prix des intrants pour un niveau du prix du carbone fixé à 30 €/tCO₂eq fait passer les réductions induites de 500 000 à 2 500 000 tonnes CO₂ équivalent.

Contrairement au prix des céréales, le prix des intrants ne connaît pas une très forte volatilité. Certes, les prix des intrants ont également connu un pic en 2008-2009, mais celui-ci fait figure d'exception (voir figure 2) dans la tendance actuelle qui est plutôt à la hausse. La perspective de l'augmentation du prix des matières premières, nécessaires à la fabrication des engrais et des produits phytosanitaires, laisse pressentir une hausse de leur prix, et donc une baisse du coût d'abattement.

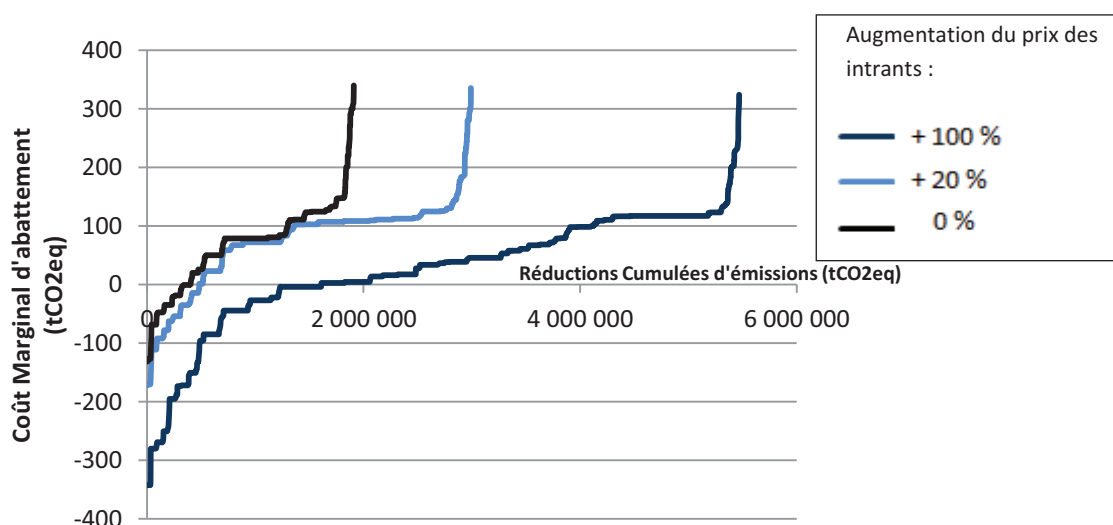


Figure 12 - Sensibilité du coût d'abattement au prix des intrants – variable limite à 30%

Conclusion sur l'analyse de sensibilité du coût d'abattement

Nous avons montré ici que les courbes de coût marginal d'abattement sont fortement tributaires des variables retenues pour effectuer la simulation. Une augmentation des prix de l'ensemble des prix des céréales provoque une augmentation importante du coût d'abattement. A l'inverse une augmentation des prix des intrants (engrais et produits phytosanitaire) induit une baisse du coût d'opportunité des légumineuses et donc favorise leur insertion. La variable *limite* est également un déterminant important du niveau du coût d'abattement.

Conclusion

Cette étude permet de quantifier les réductions d'émissions et les coûts associés à la mise en place de légumineuses dans les assolements, par le biais un prix du carbone dans le secteur agricole français. Nous adoptons ici une démarche hybride, intermédiaire des approches top-down et bottom-up de la littérature scientifique.

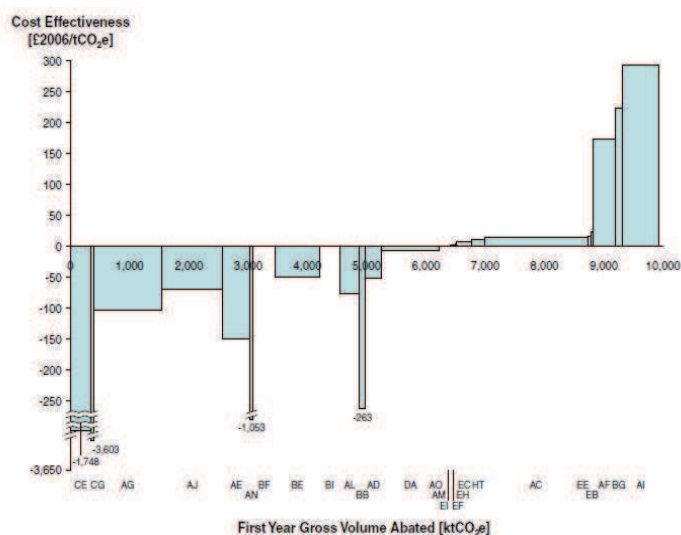
Le périmètre défini s'applique à 96 départements métropolitains et la quantification des coûts et des réductions d'émissions s'effectue au sein de la parcelle agricole. Ainsi, il n'y a pas de prise en compte de l'impact de l'introduction de légumineuses dans les filières en amont et en aval de l'exploitation agricole. Si ce périmètre a été déterminé pour avoir une meilleure vision des coûts d'opportunité, il est également opportun d'en rappeler les limites, ce qui engage à approfondir le travail de recherche. Tout d'abord, l'obtention de coûts négatifs, autrement dit des bénéfices, liés à l'implantation de surfaces nouvelles en légumineuses dans certains départements français doit nous alerter. L'absence de prise en compte des coûts liés à la diffusion de l'information dans le secteur agricole et liés à l'organisation des filières ne permet pas d'affirmer si ces coûts négatifs représentent effectivement de réelles opportunités pour les agriculteurs d'augmenter leurs marges ou bien s'il n'y aurait pas en définitive des coûts cachés liés à l'implantation des légumineuses. Ensuite, cette étude se concentre sur les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) ayant lieu à l'intérieur du périmètre de la parcelle agricole et ignore les émissions liées à la production des engrais par les industries, tout comme les réductions d'émissions de méthane (CH_4) issues de la fermentation entérique des animaux consommant des légumineuses. Une prise en compte de ces sources d'émissions permettrait d'évaluer les conséquences en termes de coûts et de bénéfices sur l'ensemble de la filière agricole. Troisièmement, il n'y a pas de prise en compte de la rétroaction de l'augmentation de la production des légumineuses sur les prix, ainsi que de la perte de production des céréales cédant leur surface aux légumineuses. L'importance de la prise en compte de cet effet a été notamment soulignée dans la littérature économique par Schneider et McCarl, 2006.

Toutefois, notre analyse apporte un éclairage nouveau et intéressant sur 3 points qu'il convient de souligner. Tout d'abord, on observe, compte-tenu des hypothèses retenues dans notre modèle, qu'un prix du carbone à 20 €/tCO₂eq pourrait être associé à une réduction d'un million de tonnes CO₂ équivalent en France. Ceci souligne l'importance que peuvent représenter les légumineuses dans la lutte contre les émissions au niveau de la France. Toutefois cette option représente une opportunité partielle car, avec un tel prix, elle ne parvient à réduire qu'un 1% des émissions de l'agriculture française. La mise en place d'un plan climat par l'intermédiaire des légumineuses doit donc s'inscrire dans un dispositif plus large incluant d'autres mesures d'atténuation des émissions.

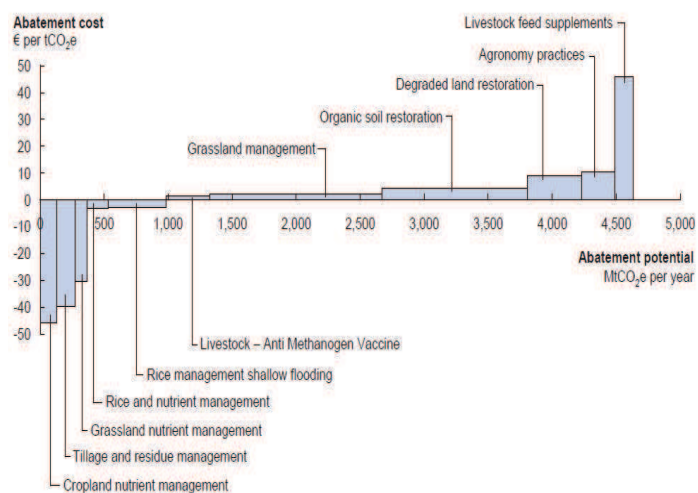
Deuxièmement, cette étude a pu également démontrer l'hétérogénéité des coûts entre les différents départements français liée à la variabilité des rendements des différentes cultures, des pratiques de fertilisation, des charges des engrais et des produits phytosanitaires entre les différents territoires français. Ainsi un même coût d'introduction des légumineuses en France se traduira par d'avantage de réductions d'émissions dans les départements situés au nord de la France et dans le pourtour de la région Ile-de-France, que dans le reste du pays. Par conséquent, ceci confirme la nécessité de privilégier dans les politiques de lutte contre le changement climatique des instruments économiques disposant d'une souplesse, tels que le prix du carbone.

Enfin, cette étude souligne l'importante variabilité du coût d'abattement lié à l'introduction des légumineuses. Une hausse du cours des céréales, analogue à celle des prix de 2008, conduit ainsi à augmenter le coût d'abattement en dehors de toute proportion. Dans le même temps, le coût d'abattement est également très sensible aux variations des prix des intrants. La perspective de l'augmentation du prix des matières premières dans les prochaines années pourrait permettre une réduction de ce coût d'abattement. Ainsi, l'effectivité d'une éventuelle politique de stimulation de l'introduction de légumineuses sera fortement conditionnée par un certain nombre de variables exogènes et hors du contrôle du régulateur et des agriculteurs.

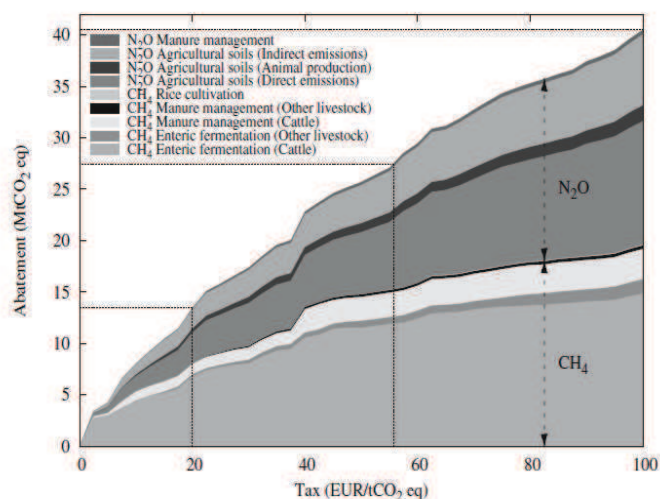
Annexe 1 – Exemple de quelques courbes de coût marginal d'abattement de la littérature scientifique



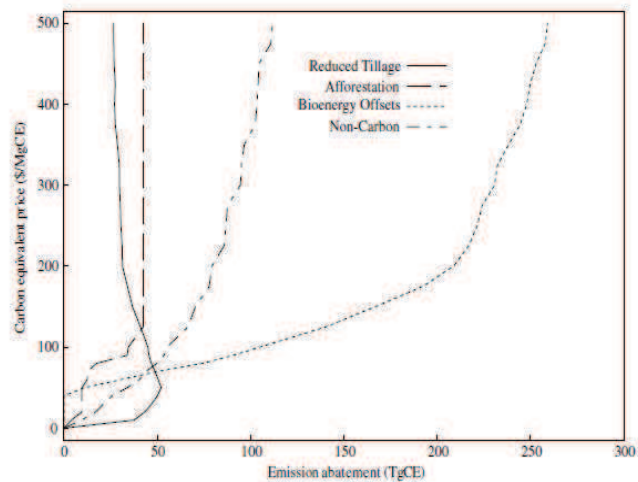
a. Moran et Al. pour le Royaume-Uni (2010). Chaque colonne correspond à une option de réduction d'émissions particulière



b. McKinsley & Compagny (2009). Observation du potentiel au niveau mondial. Chaque colonne correspond à une option de réduction d'émissions particulière.



c. De Cara et Al. (2005) pour l'Union Européenne à 15.



d. Schneider et al. (2007) pour les Etats-Unis.

Annexe 2 – Observation du ratio marge brute/émissions des différentes cultures non légumineuses pour la région Bourgogne.

Marge/émissions

€/tCO₂eq

Blé tendre	Blé dur	Orge	Maïs	Tournesol	Colza	Autres
0,3226	0,1805	0,1581	0,2168	0,1967	0,1511	0,2048

Commentaire : Les légumineuses vont remplacer dans l'ordre successif les cultures de la manière suivante : Colza, Orge, Blé dur, Tournesol, Autres, Maïs, Blé tendre.

Bibliographie

- Commissariat General au Développement Durable (2009). Emilie Cavaillès. 'La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéine : quels bénéfices environnementaux ?'. Etude et Documents. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/E_D15.pdf
- CITEPA (2012), 'Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto'.
- Christian de Perthuis, Suzanne Shaw, Stephen Lecourt (2010). 'Normes, écotaxes, marchés de permis : quelle combinaison optimale face au changement climatique ?'. Les Cahiers de la Chaire Economie du Climat.
- De Cara, S.; Houz, M. & Jayet, P. (2005), 'Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs', *Environmental and Resource Economics* **32**(4), 551--583.
- Vermont, B. & De Cara S. (2010), 'How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture? A meta-analysis', *Ecological Economics* 69 (10), 1371—1386.
- Dequiedt, B. (2012), 'Emissions de gaz à effet de serre et politique agricole commune : quel ticket gagnant?', *Les Cahiers de la Chaire Economie du Climat*, n°13.
- ECCP (2001). 'European climate change program'.
- FAOstat. Site Internet. <http://faostat.fao.org/>
- Griffon, M. (2011). 'Pour des agricultures écologiquement intensives'. *L'aube poche*.
- INRA (2009). 'Ecophyto R&D – Vers des systèmes de production économes en produits phytosanitaires'. http://www.inra.fr/l_institut/etudes/ecophyto_r_d/ecophyto_r_d_resultats
- In Vivo (2011). 'Méthodologie spécifique aux projets de réduction des émissions de N₂O dues à la dénitrification des sols agricoles par l'insertion de légumineuses dans les rotations agricoles'. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/110614_M%C3%A9thodologie%20l%C3%A9gumineuses_VF.pdf
- Schneider, A. (2000). 'AGRICULTURAL SECTOR ANALYSIS ON GREENHOUSE GAS EMISSION MITIGATION IN THE UNITED STATES'. A dissertation Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University
- MacKinsey and Compagny (2009), 'Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve'.
- Moran, D. & Al. (2010), 'Developing carbon budgets for UK agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022', *Climatic Change*.
- Schneider, U. & McCarl, B. (2006), 'Appraising agricultural greenhouse gas mitigation potentials: effects of alternative assumptions', *Agricultural Economics* **35**(3), 277--287.
- Schneider, U. McCarl, B. & Schmid, E. (2007), 'Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry', *Agricultural Systems* **94**(2), 128--140.

Série Information et Debats

n° 19 • Octobre 2012

n° 19 Octobre 2012

Réduire les émissions de l'agriculture : l'option des légumineuses
par Benjamin Dequiedt

n° 18 Juillet 2012

Overview of Climate Change Policies and Prospects for Carbon Markets in China
par Wen Wang

n° 17 Juillet 2012

Forest carbon: tackling externalities
par Gabriela Simonet, Guillaume Bouculat and Anabelle Oliveira (Astrum services)

n° 16 Juin 2012

The EU ETS Phase 3 preliminary amounts of free allowances: introducing Phase 3 allowance allocating rules and the outcome of their application in the case of French installations
par Stephen Lecourt

n° 15 Juin 2012

Green growth: from intention to implementation
par Christian de Perthuis and Pierre-André Juvet

n° 14 • Mars 2012

The European CO₂ allowances market: issues in the transition to Phase III
par Christian de Perthuis and Raphaël Trotignon

n° 13 • Janvier 2012

Emissions de gaz à effet de serre et politique agricole commune : quel ticket gagnant ? (in French only)
par Benjamin Dequiedt

n° 12 • Novembre 2011

Conférence climatique de Durban : l'enjeu de la mesure des flux de carbone forestier (in French only)
par Gabriela Simonet

Nous contacter :

Chaire Economie du Climat - Palais Brongniart (4^e étage)
28 Place de la Bourse, 75 002 Paris, France
Tel : +33 (0)1 73 01 93 42
Fax : +33 (0)1 73 01 93 28
Email : contact@chaireeconomieduclimat.org

Directeur de la publication : Christian de Perthuis
Les opinions exposées ici n'engagent que les auteurs. Ceux-ci assument la responsabilité de toute erreur ou omission

La Chaire Economie du Climat est une initiative de CDC Climat et de l'Université Paris-Dauphine

