



QUELLE CONTRIBUTION DE L'AGRICULTURE FRANÇAISE À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ?

POTENTIEL D'ATTÉNUATION ET COÛT DE DIX ACTIONS TECHNIQUES

Rapport de l'étude réalisée par l'INRA
pour le compte de l'ADEME, du MAAF et du MEDDE - Juillet 2013



Responsables scientifiques :

Sylvain Pellerin - INRA, département Environnement et Agronomie (EA), unité Transfert sol-plante et cycle des éléments minéraux dans les écosystèmes cultivés (TECM)

Laure Bamière - INRA, département Sciences Sociales, Agriculture & Alimentation, Espace & Environnement (SAE2), unité Economie publique

Directeur de la publication :

Philippe Chemineau - INRA, Directeur de la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes (DEPE)¹

Contacts :

Sylvain Pellerin, co-responsable scientifique de l'étude : Sylvain.Pellerin@bordeaux.inra.fr

Laure Bamière, co-responsable scientifique de l'étude : Laure.Bamiere@grignon.inra.fr

Bertrand Schmitt, Directeur de la DEPE : Bertrand.Schmitt@paris.inra.fr

Le présent document constitue le rapport de l'étude sollicitée conjointement par :

- l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), convention n° 11-60-C0021 et marché n°1214C0563

- le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF), convention n° DGPAAT 20-11-081

- le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE)

Producteur de données : Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère en charge de l'agriculture, convention de mise à disposition et d'utilisation des données individuelles Rica France 2010 n° 2012/04, Enquête pratiques culturales 2006 (Grandes cultures, Prairies et Viticulture) et Enquêtes bâtiments d'élevage 2008 (Bovins, Porcins, Volailles).

Le contenu du rapport et des documents de synthèse n'engage que la responsabilité de leurs auteurs.

Le rapport d'étude a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur le site institutionnel de l'INRA (www.inra.fr).

Pour citer ce document :

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*. Rapport d'étude, INRA (France), 454 p.

Conception graphique de la couverture : Patricia Perrot (MICOM)

¹ jusqu'au 31 mai 2013



Délégation à l'Expertise scientifique,
à la Prospective et aux Etudes (DEPE)

Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?

Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques

Rapport d'étude

Sylvain Pellerin, Laure Bamière,
Denis Angers, Fabrice Béline, Marc Benoît, Jean-Pierre Butault,
Claire Chenu, Caroline Colnenne-David, Stéphane De Cara,
Nathalie Delame, Michel Doreau, Pierre Dupraz,
Philippe Faverdin, Florence Garcia-Launay, Mélynda Hassouna,
Catherine Hénault, Marie-Hélène Jeuffroy, Katja Klumpp,
Aurélie Metay, Dominic Moran, Sylvie Recous,
Elisabeth Samson,
Isabelle Savini, Lénaïc Pardon

Juillet 2013

Sommaire

Avant-propos

Partie I – Contexte et méthode..... 5

1. Enjeux et objectifs de l'étude, positionnement international

2. Leviers d'atténuation et sélection des actions à instruire

3. Méthodologie d'analyse des actions

Partie II – Analyse des dix actions techniques..... 71

- ❶ Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O
- ❷ Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O
- ❸ Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol
- ❹ Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O
- ❺ Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale
- ❻ Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone
- ❼ Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique
- ❽ Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O
- ❾ Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage
- ❿ Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂

Partie III – Analyse comparée et conclusion..... 431

4. Analyse comparée des dix actions proposées

5. Synthèse et conclusion

Annexes

Avant-propos

Maintenant reconnue comme un des enjeux majeurs de l'évolution du climat de notre planète pour les cinquante années à venir, la maîtrise des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES, essentiellement CO₂, N₂O et CH₄²) représente un objectif majeur. La limitation des émissions en provenance du secteur agricole est difficile, mais elle deviendra de plus en plus indispensable au fur et à mesure que les autres secteurs économiques également émetteurs de GES parviendront progressivement à réduire les leurs. A l'inverse, l'agriculture pourrait significativement contribuer au stockage de carbone dans les sols et la biomasse.

Si les objectifs mondiaux de réduction sont atteints en 2050 sans que les émissions d'origine agricole diminuent, la part de ces dernières dans le total des émissions passera de 24%³ à plus de 75% des émissions totales, alors que l'agriculture ne représente que quelques points du PIB mondial. Rappelons que le contexte mondial de l'augmentation de la population et du changement des régimes alimentaires devra, dans le même temps, conduire à une augmentation d'environ 70% des disponibilités alimentaires (FAO 2009). Il faudra donc réduire les émissions et, en même temps, continuer à augmenter sensiblement la production agricole.

A l'instar de plusieurs autres pays de l'OCDE, la France s'est engagée dans une politique ambitieuse de réduction de ses émissions : par rapport à 1990, année de référence, l'Europe s'est engagée à réduire ses émissions de 20% en 2020, tandis que la France vise, elle, une réduction de 75% en 2050. Notre pays doit donc traduire cet effort dans les différents secteurs de l'économie, dont l'agriculture.

Au niveau national, l'agriculture représente environ 2% du PIB et environ 20% (en intégrant les émissions énergétiques) du total des émissions de GES (CITEPA 2012).

Mais les émissions du secteur agricole sont diffuses, contrairement à celles de nombreux autres secteurs. Le N₂O, par exemple, est émis sur la presque totalité des surfaces cultivées et tous les ruminants émettent du CH₄ associé à la digestion de leurs aliments. Les émissions d'origine agricole sont en outre imparfaitement connues et sujettes à des variations importantes d'un site à l'autre ou d'un système agricole à l'autre. Enfin, le grand nombre d'exploitations agricoles et leur grande diversité sur le territoire national compliquent non seulement les estimations de ces émissions, mais encore le dispositif que les pouvoirs publics pourraient mettre en place pour inciter à les réduire.

Plusieurs pays, comme les Etats-Unis, le Canada, l'Irlande ou le Royaume-Uni, ont travaillé sur les mesures à mettre en place afin de limiter les émissions de GES de leur secteur agricole. Ces démarches s'appuient sur des travaux scientifiques visant à mieux connaître les mécanismes d'émissions et à explorer des techniques permettant de les limiter. Elles constituent des références très utiles pour la situation française, mais ne permettent d'appréhender ni la réalité nationale des émissions, ni le chiffrage précis des réductions espérées, ni le coût des actions qui permettraient ces réductions.

C'est dans ce contexte que l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) et le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), ont demandé à l'INRA de réaliser une étude sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur agricole métropolitain. La finalité de l'étude est d'établir un état objectif et le plus exhaustif possible des connaissances sur les actions qui pourraient être potentiellement déployées afin de limiter les émissions de GES en agriculture, puis de sélectionner, avec des critères transparents et explicites, une dizaine d'actions pour lesquelles une instruction du rapport coût/efficacité sera réalisée de manière détaillée. Dans leur lettre de commande, les commanditaires précisent que le travail demandé est de déterminer et d'analyser une dizaine d'actions d'atténuation portant sur des pratiques agricoles. L'analyse consiste à estimer le potentiel d'atténuation de chacune de ces actions et les coûts ou gains associés en termes économiques.

Les résultats de l'étude ont vocation à pouvoir servir de base, le cas échéant, à l'élaboration de politiques publiques de réduction des émissions de GES. En revanche, l'identification des instruments de politiques à mettre en œuvre pour favoriser l'adoption des actions étudiées ne fait pas partie de la commande.

Le présent document constitue le rapport complet de l'étude. Une synthèse (92 p.) et un résumé (8 p.) ont par ailleurs été rédigés pour reprendre les résultats de manière plus synthétique.

Ce document présente dans un premier temps (Partie I) le contexte, l'organisation de l'étude et la méthodologie employée pour sélectionner les dix actions à instruire ; puis (Partie II) les fiches des 10 actions instruites par les experts décrites de manière exhaustive ; et enfin (Partie III), il présente une analyse comparée des 10 actions instruites.

² Gaz carbonique, protoxyde d'azote et méthane, respectivement

³ 13% issus de la production agricole elle-même et 11% du changement d'usage des sols

Partie I

Contexte et méthode

Auteurs

Sylvain Pellerin (INRA-EA)

Laure Bamière (INRA-SAE2)

Denis Angers (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Stéphane De Cara (INRA-SAE2)

Nathalie Delame (INRA-SAE2)

Pierre Dupraz (INRA SAE2)

Dominic Moran (Scotland's Rural College)

Lénaïc Pardon (INRA-DEPE)

Elisabeth Samson (INRA-SAE2)

Relecteurs internes

Philippe Chemineau (INRA-DEPE)

Relecteur scientifique externe

Frédéric Roy-Vigneault (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

1. Enjeux et objectifs de l'étude, positionnement international

Ce chapitre présente les éléments de contexte ayant motivé la conduite d'une étude sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en agriculture, les principes généraux de conduite de l'étude qui a été confiée à la Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE) de l'INRA, et enfin l'état de l'art international sur le sujet afin de positionner l'étude réalisée en France dans cet ensemble.

1.1. Le contexte et les enjeux

1.1.1. Le changement climatique et les gaz à effet de serre

Depuis le début de l'ère industrielle (1870), la température de surface sur la Terre a augmenté de $0,8 \pm 0,2^\circ\text{C}$, avec une tendance à l'accélération au cours de la période récente. Ce réchauffement climatique est dû à l'accroissement net des émissions vers l'atmosphère de gaz à effet de serre (GES) (principalement le dioxyde de carbone, CO_2 ; le protoxyde d'azote, N_2O ; le méthane, CH_4) résultant des activités humaines (combustion de combustibles fossiles, défrichage, agriculture...) (Figures 1 et 2). Du fait de l'augmentation attendue de la population mondiale, et du développement économique, il est très probable que les émissions de GES continueront d'augmenter au cours des décennies à venir, avec comme conséquence un accroissement de la température estimé entre $+1,8$ et $+4^\circ\text{C}$ à la fin du 21^e siècle par rapport à la période 1980-1999, selon les scénarios d'émission (GIEC, 2007). Ce réchauffement altèrera le fonctionnement général du climat (accroissement de la fréquence des événements extrêmes...), le fonctionnement des écosystèmes (extinction d'espèces...) et les activités humaines (rendements agricoles...), avec des effets variables selon les régions du globe. Cependant, l'intensité des changements, et les capacités d'adaptation des écosystèmes et des sociétés humaines, dépendront fortement de l'ampleur du réchauffement, et donc du degré de maîtrise des émissions de GES dans les décennies à venir.

1.1.2. Les engagements internationaux, européens et français

Face à ce défi, les gouvernements ont signé en 1992 lors du sommet de Rio de Janeiro la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. Plusieurs rencontres internationales ont eu lieu depuis (notamment Kyoto en 1997, Bali en 2007, Copenhague en 2009, Cancun en 2010, Durban en 2011). Le protocole de Kyoto prévoyait pour 38 pays industrialisés une réduction des émissions de GES de $-5,2\%$ en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, avec des objectifs variables selon les régions du monde (-8% pour l'union européenne, stabilisation pour la France). Malgré d'importantes difficultés, des négociations dites "post-Kyoto" se poursuivent pour élaborer un nouvel accord climatique international pour la période à venir.

De son côté, l'union européenne s'est engagée à réduire de 20% ses émissions d'ici à 2020 par rapport à l'année de référence 1990 (soit une baisse de 14% par rapport aux émissions de 2005). En cas d'accord international satisfaisant, elle pourrait s'engager à viser un objectif encore plus ambitieux (-30% au lieu de -20%). L'objectif de réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre a été incorporé à l'engagement des "trois fois vingt" du paquet énergie-climat (augmenter de 20% l'efficacité énergétique, porter à 20% la part des énergies renouvelables, réduire de 20% les émissions de GES). Pour les catégories d'émissions non couvertes par le système communautaire d'échange de quotas d'émissions⁴

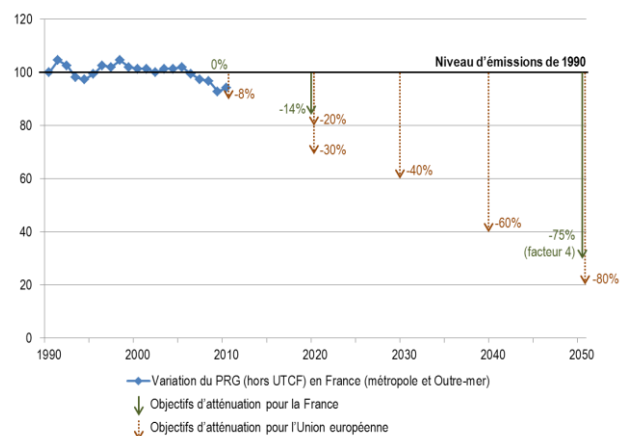


Figure 3. Evolution des émissions françaises et objectifs d'atténuation au niveau de la France et de l'UE (Source : CITEPA 2012 pour la variation des émissions)

⁴ Mécanisme de droits d'émissions de CO_2 mis en œuvre au sein de l'Union européenne. Chaque entreprise possède un certain quota de droits d'émission de CO_2 et peut acheter ou vendre des droits.

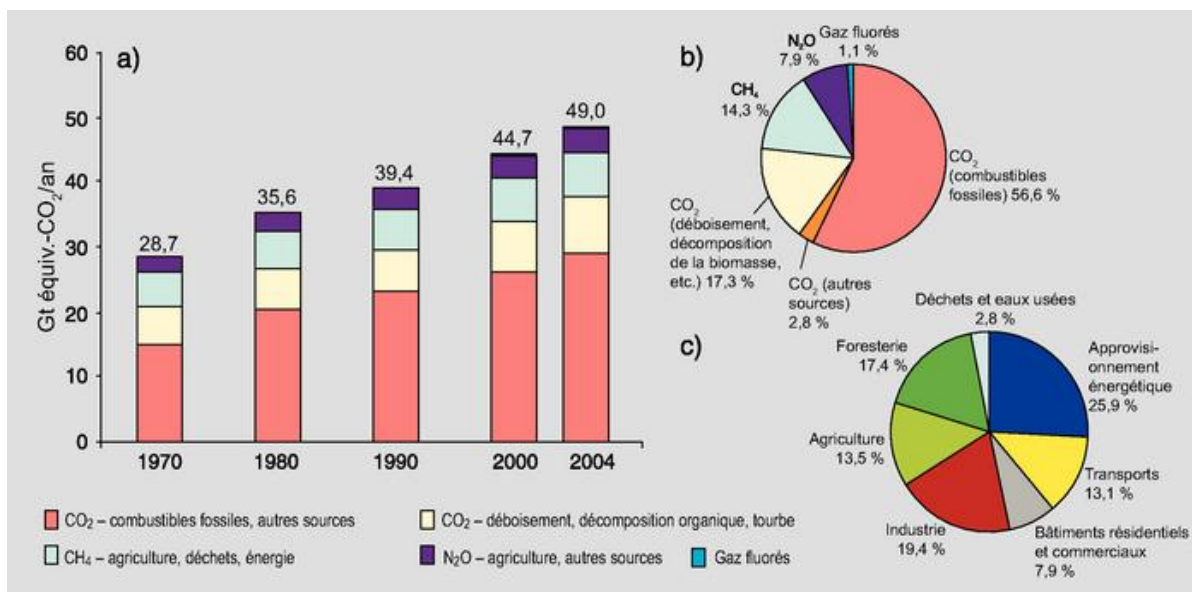
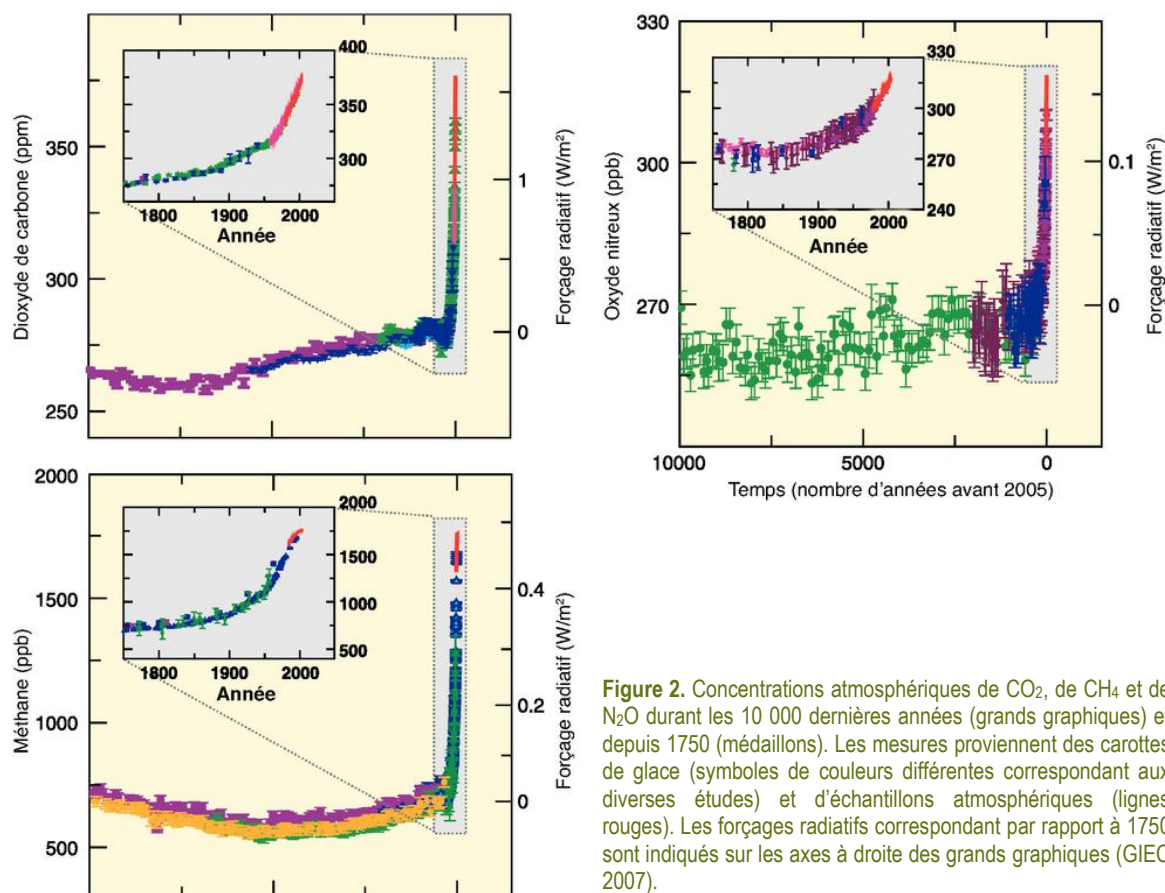


Figure 1. a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. (b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO₂. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent-CO₂. (La foresterie inclut le déboisement) (GIEC 2007)



(principalement les émissions des sources diffuses telles que celles liées au transport, au bâtiment et à l'agriculture), l'objectif global de réduction assigné à la France est de -14% en 2020 par rapport à 2005. L'atteinte de cet objectif suppose un effort de l'ensemble des secteurs émetteurs concernés, dont l'agriculture. A plus long terme, l'objectif de réduction des émissions au niveau européen est de -80% en 2050 par rapport au niveau de 1990, avec des étapes intermédiaires (-25% en 2020, -40% en 2030, -60% en 2040). Au niveau français, des objectifs ont été inscrits dans la loi de programme du 13 juillet 2005, confirmés dans la loi du 3 août 2009 relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement ("facteur 4": division par 4 des émissions en 2050 par rapport à 1990) (Figure 3).

1.1.3. La comptabilisation des émissions

Le suivi du respect des engagements internationaux requiert un certain degré d'harmonisation dans les modes de comptabilisation des émissions de GES. Le niveau et l'évolution des émissions de GES sont enregistrés dans des inventaires nationaux, pour lesquels, comme pour tout système comptable, il existe un certain nombre de conventions, de normes et d'hypothèses. Les nomenclatures et les règles de comptabilisation internationales sont élaborées par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) – IPCC en anglais (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) -, et périodiquement actualisées pour intégrer l'avancée des connaissances scientifiques. Le GIEC (Houghton *et al.*, 1996 ; Eggleston *et al.*, 2006) fournit ainsi des recommandations minimales concernant les modes de calcul (choix du périmètre, niveau de détail minimal, équations à utiliser et paramètres par défaut qui peuvent être retenus) et un cadre de rapportage commun auquel les pays doivent se conformer. Les inventaires d'émissions fournissent une base normalisée d'émissions qui facilite les comparaisons internationales et assure un cadre cohérent pour l'analyse des évolutions des émissions dans le temps. Les émissions qui y sont reportées font foi au regard des engagements internationaux.

L'application directe des lignes directrices du GIEC correspond à une méthode minimale dite de niveau (ou *tier*) 1. Chaque Etat a néanmoins une certaine latitude dans le choix du niveau d'agrégation, du degré de finesse retenu dans les modes de calcul et des facteurs d'émission applicables. Compte tenu des spécificités nationales, chaque Etat peut décider d'adopter une comptabilisation de niveau supérieur (2 ou 3) pour certaines sources en optant pour une désagrégation plus fine, des relations ou des facteurs d'émissions différents, voire en recourant à des modèles. Cette latitude est encadrée par la triple contrainte de transparence des modes de calculs utilisés, de disponibilité de données statistiques fiables et actualisables et de justification de modes de calculs/facteurs d'émission différents de ceux proposés par le GIEC sur la base de travaux validés scientifiquement. Les modes de calculs retenus dans les inventaires font par ailleurs l'objet d'un processus d'évaluation externe.

La logique générale de la comptabilisation des émissions repose sur des principes relativement simples. Chaque catégorie d'émission est décomposée en sources élémentaires. A chaque source i et chaque date t sont associés une variable d'activité (notée AV_{it}) et un facteur d'émission (notée EF_{it}). Les émissions sont calculées comme le produit $EM_{it} = EF_{it} \times AV_{it}$.

- **Un facteur d'émission** (Figure 4) est un coefficient multiplicateur qui permet d'estimer la quantité de GES émise du fait d'une activité humaine, c'est-à-dire de passer de la mesure de cette activité à la mesure de l'effet de serre qu'elle engendre. Dans les calculs de l'inventaire national, les équations contiennent plusieurs facteurs d'émission correspondant aux divers mécanismes émetteurs, et dont les valeurs rendent compte parfois des conditions de l'environnement (température...), ou du mode de gestion (des effluents, par ex.). C'est au niveau du choix de ces valeurs, en fonction des conditions ou des modes de gestion, que se joue la possibilité de prendre en compte, ou non, les effets d'une action dans les calculs.

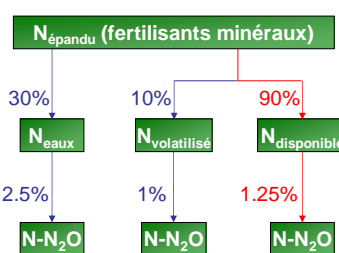


Figure 4. Exemple de schéma de calcul des émissions de N_2O dans la méthode actuelle du CITEPA (GIEC 1996).

Le facteur d'émission global à appliquer à la quantité d'azote épandue sous forme de fertilisants minéraux est dans cet exemple de 1,975%.

- **Les catégories d'émissions** retenues pour les inventaires ne recoupent pas exactement un découpage sectoriel. Ainsi, les émissions liées à l'utilisation d'énergie fossile dans le secteur agricole (par exemple tracteurs, chauffage, etc.) ne sont pas comptabilisées dans la catégorie « agriculture » des inventaires, mais dans la catégorie « énergie ». De même, les puits et sources associés aux changements d'usages des sols (par exemple retournement de prairies, conversions vers des usages non-agricoles) sont comptabilisés dans la catégorie « usage des terres, leurs changements et forêt » (UTCF). Le tableau 1 précise les catégories d'émissions couvertes par les inventaires qui sont directement liées aux activités agricoles.

Le système d'inventaire assure une certaine cohérence entre les données qui servent à calculer les émissions de chaque catégorie. Par exemple, le calcul des émissions de N_2O dues à la gestion des effluents d'élevage, qui repose sur la répartition de l'azote des effluents entre systèmes de gestion (lisier, fumier, pâture), nécessite également de disposer des effectifs animaux par catégorie afin de calculer les quantités totales d'azote excrétées. Ces quantités d'azote calculées

interviennent également dans le calcul des émissions de N₂O des sols agricoles associées à l'épandage des effluents d'élevage.

Pour la France, c'est le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) qui est en charge d'établir annuellement ces inventaires. Les derniers inventaires disponibles au moment de la réalisation de cette étude permettent de retracer les émissions françaises de 1990 à 2010 (CITEPA, 2012). Ils s'appuient sur les lignes directrices du GIEC de 1996⁵. La conversion des émissions de méthane et de protoxyde d'azote en équivalent CO₂ (CO₂e) repose sur leurs "pouvoirs de réchauffement global" (PRG) sur un horizon de 100 ans (PRG_{CO2} = 1, PRG_{CH4} = 21, PRG_{N2O} = 310 ; valeurs fournies dans le deuxième rapport du GIEC en 1995)⁶ ; à quantité égale émise dans l'atmosphère, du CH₄ aura ainsi un impact vingt-et-une fois plus important sur le réchauffement que du CO₂. Le périmètre géographique retenu (format dit "Kyoto"⁷) est celui des émissions produites directement par les activités ayant lieu sur le territoire national (incluant les DOM).

Catégories de l'inventaire	GES	Variables d'activité	Emissions (en CO ₂ e*)
1.A.4.c Agriculture, sylviculture, pêcheries	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	Energie consommée dans le secteur sous diverses formes (liquide, solide, gaz, biomasse)	10,88 Mt CO ₂ e
4.A Fermentation entérique	CH ₄	Effectifs animaux (bovins lait, bovins viande, ovins, caprins, porcins, équins, ânes)	28,60 Mt CO ₂ e
4.B Emissions liées à la gestion et au stockage des effluents d'élevage	CH ₄ N ₂ O	Effectifs animaux (bovins lait, bovins viande, ovins, caprins, porcins, équins, ânes) Quantités d'azote contenu dans les effluents par type de gestion des effluents (lisier, fumier)	18,87 Mt CO ₂ e
4.C Riziculture	CH ₄	Surfaces en riz	0,11 Mt CO ₂ e
4.D Sols agricoles	N ₂ O	Apports d'azote aux sols agricoles sous diverses formes (engrais azotés de synthèse, effluents d'élevage, résidus de cultures, légumineuses, boues de stations d'épuration)	46,74 Mt CO ₂ e
4.F Brûlage des résidus agricoles au champ	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	Quantités de résidus brûlés	0,03 Mt CO ₂ e
5 UTCF (conversion de prairies en cultures ou de terres agricoles vers d'autres usages, et inversement)	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	Surfaces concernées par des changements d'usage	8,91 Mt CO ₂ e

* PRG de 1995 (encore utilisés en 2010 par le CITEPA) : PRG_{CO2} = 1, PRG_{CH4} = 21, PRG_{N2O} = 310

Les émissions sont exprimées en tonnes dans ce document.

1 Mt (mégatonne) = 10⁶ t (tonnes) ; en unité internationale 1 t = 1 Mg (mégagramme)

Tableau 1. Emissions de GES du secteur agricole français en 2010 (CITEPA 2012)
(Inventaire national réalisé selon les règles définies par le GIEC en 1996)

Pour certaines sources agricoles, la comptabilisation des émissions françaises va au-delà des méthodes de niveau 1 (CITEPA, 2012). Ainsi, la désagrégation des catégories animales (utilisées pour le calcul des émissions de méthane dues à la gestion des effluents d'élevage et à la fermentation entérique) est plus fine que celle proposée par défaut par le GIEC (41 catégories au total). Les facteurs d'émission utilisés peuvent différer du facteur par défaut proposé par le GIEC. C'est le cas notamment des facteurs d'émission associés aux émissions de méthane entérique qui sont fondés sur les résultats de Vermorel *et al.* (2008). Dans le cas des vaches laitières, ce facteur d'émission est déterminé à partir des rendements laitiers moyens nationaux (CITEPA, 2012) pour refléter les effets de la productivité sur les émissions et est donc susceptible de varier dans le temps. Le tableau de l'annexe 1 synthétise les modes de calculs et les facteurs d'émissions utilisés par le CITEPA pour l'année 2010 (hors UTCF, cf. CITEPA, 2012 pour plus de détails). Les émissions correspondantes (exprimées en tonnes de gaz et en CO₂e pour deux jeux de valeurs des PRG) sont reportées dans le tableau de l'annexe 2.

⁵ Il est prévu que les nouvelles lignes directrices du GIEC (2006) soient appliquées pour la comptabilisation des émissions post-Kyoto (à partir de 2013). Les implications pour l'agriculture concernent principalement : un regroupement des émissions de la catégorie Agriculture et des puits/sources liées à l'UTCF en une seule catégorie (AFOLU, Agriculture, Forestry and Other Land Uses) pour donner une image plus fidèle du bilan net en émissions des activités utilisant des ressources en terres, une baisse du facteur d'émission de la catégorie « Sols agricoles » (de 1,25 à 1 tN-N₂O/tN) et l'abandon de la distinction entre plantes fixatrices d'azote et autres cultures dans la comptabilisation des émissions de N₂O dues aux apports d'azote des résidus de cultures restitués aux sols.

⁶ L'utilisation des nouvelles valeurs des PRG données par le GIEC (2007, PRG_{CO2} = 1, PRG_{CH4} = 25, PRG_{N2O} = 298) est également prévue pour la comptabilisation des émissions post-Kyoto.

⁷ Les inventaires du CITEPA sont fournis sous deux formats "CCNUCC" et "Kyoto". Ces deux formats diffèrent par le périmètre géographique couvert (le premier inclut les Collectivités d'Outre-Mer) ainsi que par des conventions de calculs différentes pour la comptabilisation des puits UTCF (articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto).

Les choix faits pour l'inventaire national (niveau de "tier" retenu) déterminent la possibilité de prendre en compte, ou non, les actions d'atténuation des émissions de GES qui pourraient être entreprises. Par exemple, le choix actuel de la France de ne pas comptabiliser le stockage de carbone dans les sols ne permet pas la prise en compte de certaines actions et affecte les émissions calculées pour la France et utilisées comme référence dans cette étude.

Dans le contexte des engagements internationaux, les Etats ont intérêt à développer des actions qui pourront effectivement être comptabilisées immédiatement dans leurs inventaires et donc à faire évoluer les règles de comptabilisation, en valorisant les progrès des connaissances.

Pour qu'une action puisse avoir un effet sur l'inventaire et permette de revendiquer une réduction d'émissions de GES, il faut que :

- l'efficacité de l'action soit démontrée et reconnue,
- son effet puisse être pris en compte par la méthode de calcul utilisée dans l'inventaire national,
- sa mise en œuvre puisse être prouvée et soit vérifiable (le contrôle est par ex. possible pour l'agroforesterie, visible sur les images satellitaires, mais souvent difficile pour une pratique culturale).

1.1.4. Les émissions de l'agriculture

A l'échelle planétaire, l'agriculture contribue pour 13.5% aux émissions (30.9% si on y ajoute le changement d'usage des sols, incluant la déforestation) (GIEC, 2007). En France, l'agriculture représente 2% du produit intérieur brut, mais 17,8% des émissions (hors consommation énergétique et changement d'usage des terres) estimées par l'inventaire national, avec 94 Mt de CO₂e sur un total de 528 MtCO₂e (Inventaire des émissions de 2010, CITEPA 2012).

Une spécificité des émissions agricoles est qu'elles sont majoritairement d'origine non énergétique, et contrôlées par des processus biologiques. Sur les 17.8% émis par l'agriculture, 9.8% sont liés aux émissions de protoxyde d'azote (N₂O), produit lors des réactions biochimiques de dénitrification et de nitrification, et 8.0% sont liées au méthane (CH₄) produit lors de fermentations en conditions anaérobies. L'agriculture est ainsi responsable de 86.6% des émissions françaises de N₂O hors UTCF : 35% liée aux émissions directes⁸ par les sols agricoles, 28% aux émissions indirectes, 15% aux productions animales et 8.6% lié à la gestion des déjections. De même, l'agriculture est responsable de 68% des émissions françaises de CH₄ hors UTCF : 46% proviennent de la fermentation entérique et 22% de la gestion des déjections.

Les 17.8% attribués à l'agriculture ne comprennent pas les émissions liées à sa consommation d'énergie, comptabilisées dans le secteur "Energie" de l'inventaire national. Si l'on tient compte de ces émissions (cf. tableau 1, rubrique 1A4C), la part de l'agriculture s'élève à environ 20% des émissions totales de GES françaises, le N₂O, le CH₄ et le CO₂ représentant respectivement 50%, 40% et 10% des émissions du secteur exprimées en CO₂e (Figure 5). Le poids des émissions de N₂O et de CH₄ tient à leurs PRG qui sont très élevés par rapport à celui du CO₂.

Compte tenu de son poids dans les émissions globales, l'agriculture est appelée à contribuer à l'effort général de réduction des émissions et à l'atteinte des objectifs fixés au niveau national et international. L'agriculture peut participer à l'amélioration du bilan net des émissions de GES *via* trois leviers : la réduction des émissions de N₂O et de CH₄, le stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse, et la production d'énergie à partir de biomasse (biocarburants, biogaz) réduisant les émissions par effet de substitution à des énergies fossiles. La plupart des auteurs s'accordent sur l'existence de marges de progrès importantes, mais étant donné le caractère majoritairement diffus des émissions, et la nature complexe des processus qui en sont à l'origine, l'estimation des émissions est assortie d'incertitudes fortes, et les possibilités d'atténuation sont à ce jour moins bien quantifiées que dans d'autres secteurs. L'exploration et la quantification des possibilités d'atténuation des émissions de l'agriculture est donc nécessaire mais difficile. De plus, l'agriculture se situe au carrefour de

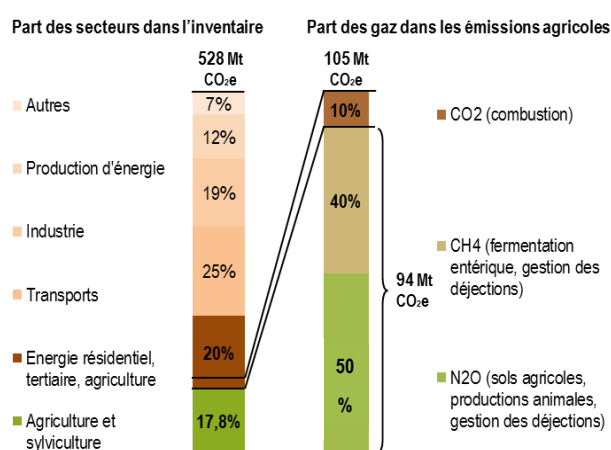


Figure 5. Emissions de GES en 2010, France métropolitaine et Outre-mer (Source : CITEPA 2012)

⁸ Les émissions directes se produisent sur l'exploitation, par opposition aux émissions indirectes se produisant sur les espaces naturels physiquement liés (lixiviation du nitrate entraîné par l'eau qui percole dans les sols et volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac; puis dénitrification hors de l'exploitation).

multiples enjeux (sécurité alimentaire, emploi et développement rural, biodiversité et paysage, qualité de l'eau et de l'air...), et comme dans d'autres domaines, l'objectif de réduction des émissions de GES ne peut pas être instruit indépendamment d'autres objectifs majeurs assignés ou liés à ce secteur.

1.2. L'étude confiée à l'INRA : dispositif, périmètre, méthode

Dans ce contexte, l'ADEME, ainsi que les ministères français en charge de l'agriculture et de l'écologie ont chargé l'INRA de conduire une étude dont l'objectif est de contribuer à évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de GES dans le secteur de l'agriculture, en proposant une liste d'une dizaine d'actions choisies parmi les plus efficaces quant à leur rapport coût/efficacité (coûts en Euros / potentiel d'atténuation en tCO₂e évitées). Le cadre méthodologique de l'étude est celui défini par la Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études (DEPE) de l'INRA ; il repose notamment sur une distinction claire entre les fonctions de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre, et sur l'indépendance et la responsabilité du collège d'experts scientifiques chargé de réaliser l'analyse.

1.2.1. Objectif et périmètre de l'étude confiée à l'INRA (voir cahier des charges en annexe 3)

Il a été convenu avec les commanditaires que les actions éligibles dans le cadre de cette étude devaient :

- porter sur une **pratique agricole**, relevant d'un choix de l'agriculteur ;
- viser en priorité une atténuation des émissions se produisant sur l'exploitation agricole même si, une fois l'action sélectionnée, les modifications éventuelles des émissions à l'amont ou à l'aval de l'exploitation sont chiffrées.

Le périmètre visé par l'étude est l'agriculture métropolitaine. La forêt et les cultures énergétiques dédiées valorisées en dehors de l'exploitation agricole sont exclues du périmètre de l'étude car ayant donné lieu à des études spécifiques. L'horizon temporel pour le calcul du potentiel d'atténuation est 2030.

Les actions analysées doivent :

- pouvoir faire l'objet de politiques publiques ou d'incitations économiques ultérieures, mais l'identification des mécanismes incitatifs à mettre en œuvre ne fait pas partie des attendus de l'étude ;
- concerner une diversité d'orientations productives agricoles ;
- pouvoir être mises en œuvre sans modifications majeures des systèmes de production et de leur localisation, et sans réduction majeure du volume de production. Certaines actions techniques étant cependant susceptibles d'entraîner une baisse du niveau de production, un seuil de 10% maximum a été fixé. Sont donc hors du champ de l'étude des actions systémiques affectant la nature des systèmes de production agricoles français et leur répartition géographique.

Sont également hors du champ de l'étude des actions portant sur les régimes alimentaires des consommateurs (par exemple leur niveau de consommation de produits d'origine animale), qui peuvent moduler fortement les émissions de GES du secteur agricole *via* leurs effets sur la demande. Des réflexions sur ces leviers de nature plus systémiques, complémentaires des leviers techniques examinés dans le cadre de cette étude, seront cependant livrées en fin du rapport.

1.2.2. Principes et méthode d'une étude conduite par la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes de l'INRA (DEPE)

Les études produites par l'INRA s'inscrivent dans sa mission d'appui aux politiques publiques, aux côtés des exercices d'expertise scientifique collective et de prospective également conduits par la DEPE. Expertises et études sont réalisées sous la responsabilité de l'INRA, à la demande de décideurs publics, généralement des ministères, par **un groupe pluridisciplinaire d'experts scientifiques**. Ces deux exercices ont pour objectif d'établir **un état des connaissances scientifiques** pertinent pour éclairer l'action publique, mais ils ne comportent pas d'avis ni de recommandations. Ils sont conduits selon les principes énoncés dans la charte de l'expertise scientifique institutionnelle de l'INRA : compétence, pluralité, transparence et impartialité.

Le collectif d'experts, constitué pour chaque expertise ou étude, a pour mission d'analyser la littérature scientifique internationale, d'en extraire et d'en assembler les éléments pertinents pour éclairer les questions posées, et de pointer, dans l'état des connaissances, les acquis, les incertitudes, les lacunes et les controverses. Les connaissances mobilisées sont en priorité celles de la bibliographie scientifique (articles publiés dans des revues à comité de lecture). Sont examinés les travaux en langue anglaise et française, de toutes origines géographiques, dans la limite où ils sont pertinents pour les conditions pédoclimatiques et agricoles du territoire français. La bibliographie technique est prise en compte dans la mesure où les sources sur lesquelles elle se fonde sont précisées et où le collectif d'experts les valide (données expérimentales publiées, conditions d'obtention clairement définies...).

Les "études" s'appuient sur le stock de connaissances existantes, mais traitent généralement de questions pour lesquelles la seule littérature académique s'avère insuffisante, et qui nécessitent d'élargir les outils d'analyse à des travaux complémentaires *ad hoc*. Une étude comporte donc un volet d'analyse bibliographique scientifique associé, selon les cas, à un traitement original de données, à un recours plus important à la littérature technique, ou à des travaux de simulations biotechniques ou économiques. Dans la présente étude, l'objectif d'une quantification des émissions de GES et des coûts a nécessité la réalisation de nombreux calculs. L'étude a exploré la faisabilité, l'impact et le coût potentiel des actions choisies parmi les plus efficaces (rapport coût/efficacité) pour réduire les émissions de GES du secteur agricole à l'horizon 2030. Les calculs portant sur l'atténuation des émissions de GES et les coûts liés à l'adoption d'une action ont nécessité que les experts formulent des hypothèses sur les scénarios de référence, l'assiette et la cinétique d'adoption des actions, le calcul du potentiel d'abattement, le calcul du coût des actions. Ces hypothèses ont été argumentées sur la base de données à la fois techniques (surfaces, effectifs animaux) et économiques (prix des intrants, des produits...), issues de sources diverses (instituts et centres techniques, statistique agricole...). Elles ont fait appel non plus seulement aux connaissances scientifiques de l'expert mais à ses compétences de terrain. Pour en garantir la robustesse, elles ont été systématiquement discutées dans le collectif d'experts puis soumises aux experts des instituts techniques qui en ont examiné le réalisme. Ces choix apparaissent dans l'étude de manière clairement explicitée et justifiée. Par ailleurs, l'étude s'engage à préciser les incertitudes, biais et limites des analyses et interprétations qu'elle produit.

1.2.3. Conduite de l'étude

1.2.3.1. Les principales phases de l'étude

L'étude s'est déroulée en quatre principales phases sur une durée d'environ 2 ans, de juillet 2011 à juillet 2013. La phase d'avant-projet a correspondu aux premiers échanges entre les commanditaires et l'INRA et a donné lieu à une lettre de commande délimitant la question posée. Puis la phase de lancement a permis de constituer les instances du projet, notamment un groupe d'experts scientifiques et un comité technique, et de construire le cahier des charges de l'étude. La phase de réalisation des travaux scientifiques (sélection et analyse des actions, puis analyse transversale) s'est étendue sur toute l'année 2012. Enfin la dernière phase a consisté à synthétiser les résultats et à préparer le colloque de restitution.

1.2.3.2. Les acteurs de l'étude et leurs rôles

Les principales instances constituées pour la réalisation et le suivi de l'étude ainsi que leurs rôles respectifs sont présentés dans le tableau 2.

Les maîtres d'ouvrage de l'étude, qui en ont formulé la demande et ont contribué à son financement, sont :

- l'**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)**, qui participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable ; la lutte contre le réchauffement climatique constitue l'un de ses domaines d'intervention ;
- le **Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF)** qui, dans le cadre des négociations et des engagements internationaux sur le climat (dont il assure le suivi pour le compte du MEDDE), et de la mise en place de la nouvelle PAC, est demandeur de résultats scientifiques sur le potentiel d'atténuation du secteur agricole ;
- le **Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE)**, qui conçoit et met en œuvre la politique relative au climat et à l'énergie dont l'un des objectifs est de réduire les émissions de GES ; cette politique est associée aux autres actions dans le domaine de la protection de l'environnement (eau, biodiversité...).

Un **comité de suivi** composé de représentants de ces commanditaires – et auquel l'INRA s'est associé au titre de son intérêt pour les retombées de l'étude pour la recherche – a assuré la liaison entre maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage : délimitation plus précise du périmètre de la question posée, suivi de l'avancement de l'étude et de l'adéquation entre le cahier des charges et le travail réalisé (présentations orales des étapes de l'étude puis documents écrits).

Un **comité technique** composé d'une quinzaine d'experts de terrain (de l'ADEME, des instituts techniques...), a par ailleurs été constitué. Il a été consulté sur le choix d'actions proposé par le groupe d'experts scientifiques, et sollicité pour fournir des données de la littérature grise, discuter la pertinence technique et la faisabilité des actions, et assurer une relecture de documents. La liste des membres du comité de suivi et du comité technique figure en fin du document.

Enfin, les commanditaires ont réuni un **groupe de porteurs d'enjeux** composé de représentants d'organisations ayant des intérêts relatifs aux émissions de GES agricoles : Organismes professionnels agricoles, acteurs économiques (coopératives...), associations et ONG. Les porteurs d'enjeux ont ainsi été informés de l'existence de l'étude.

La DEPE est garante de la méthode, du respect de la charte, des principes et procédures de l'exercice, ainsi que des engagements pris (délais...). Elle fournit un appui au collectif d'experts dans la conduite du projet et la production des documents. Cet appui est assuré par une **équipe projet** constituée d'ingénieurs et techniciens de la DEPE, qui contribuent à la coordination des travaux (planification et organisation des réunions), à la constitution du corpus bibliographique (ingénierie documentaire) et à la diffusion des résultats (appui éditorial pour le rapport, rédaction des documents de synthèse, organisation du colloque de présentation de l'étude), et prend en charge la logistique et le suivi budgétaire.

Le **groupe d'experts scientifiques** est constitué de chercheurs (ou enseignants-chercheurs) appartenant à des organismes publics de recherche ou d'enseignement supérieur ; ils sont choisis pour leurs compétences attestées par leurs publications académiques dans des revues scientifiques. Ces experts sont responsables, collectivement, du contenu de l'étude, dont ils signent le rapport et le présent document de synthèse.

Pour cette étude, le groupe était composé de 22 chercheurs de l'INRA et d'autres organismes, français et étrangers, couvrant une palette large de disciplines scientifiques ; deux d'entre eux (un agronome et une économiste), chargés de la conduite du groupe, ont exercé la fonction de responsables scientifiques de l'étude. La liste des experts figure en fin du document.

Quelques autres chercheurs ont été associés, de manière plus ponctuelle, à l'étude. Enfin, des relecteurs scientifiques, chercheurs n'ayant pas participé à la réalisation du travail, ont été mobilisés pour effectuer une relecture critique de parties du rapport d'étude.

Les travaux ont alterné des phases de travail collectif (choix des actions, détermination de la méthodologie retenue, analyse comparée des résultats) et en groupe restreint par action (analyse bibliographique, mise en œuvre des calculs).

Pour chacune des 10 actions étudiées, un expert "responsable" agronome ou zootechnicien et un petit groupe d'experts, dont un économiste, ont réalisé le travail d'analyse ; la coordination par les responsables scientifiques et l'équipe projet a permis de garantir l'homogénéité des méthodes (règles de calcul, sources de données...) et la cohérence d'ensemble.

Chacun des experts responsables a assuré à la fois l'analyse de la bibliographie scientifique internationale et de publications techniques, l'application de cet état des connaissances à l'évaluation quantitative de l'action (réalisation des calculs d'atténuation) et l'intégration des estimations de coût effectuées par l'économiste.

Tableau 2. Rôles des acteurs ayant participé à la réalisation de l'étude

Acteurs	Membres	Principaux rôles
Commanditaires	Représentants des 3 organisations - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) - Ministère en charge de l'agriculture - Ministère en charge de l'écologie	Maîtrise d'ouvrage - Financement de l'étude - Délimitation du périmètre de la question posée - Suivi de l'adéquation entre le cahier des charges et le déroulement de l'étude
Equipe projet	Ingénieurs et techniciens de la DEPE (INRA)	Coordination des travaux – Maîtrise d'œuvre - Planification et coordination, organisation des réunions - Synthèse et diffusion des résultats (rédaction de la synthèse, colloque) - Ingénierie documentaire - Logistique, suivi budgétaire
Groupe d'experts scientifiques	Scientifiques choisis selon leur niveau d'expertise sur les sujets traités dans l'étude - 22 experts dont 2 responsables scientifiques (INRA, IRSTEA, AgroParisTech, AAC Canada, Supargo Montpellier, Scottish Agricultural College) - 8 experts associés, ayant contribué plus ponctuellement à l'étude	Réalisation des travaux scientifiques - Réflexion collective interdisciplinaire - Réalisation du contenu de l'étude (choix des actions, analyse bibliographique, mise en œuvre des calculs, analyse des interactions entre actions) - Garantie de la qualité scientifique des travaux
Comité technique (experts techniques)	Experts techniques choisis selon leurs compétences sur les sujets traités dans l'étude 15 experts (Ademe, AFAC, Arvalis, CETIOM, CRA Bourgogne, IDELE, IFIP, ITAVI)	Fourniture d'une expertise technique - Avis sur la validité technique du choix des actions et de la méthode d'instruction - Fourniture de données techniques - Relecture technique
Relecteurs scientifiques	Scientifiques choisis selon leurs compétences et leur indépendance 20 relecteurs (INRA, AAC Canada, CRA-W, EIFER, Solagro, Arvalis, IFIP)	Relecture scientifique critique Avis et retours critiques précis sur les différentes parties du rapport rédigées

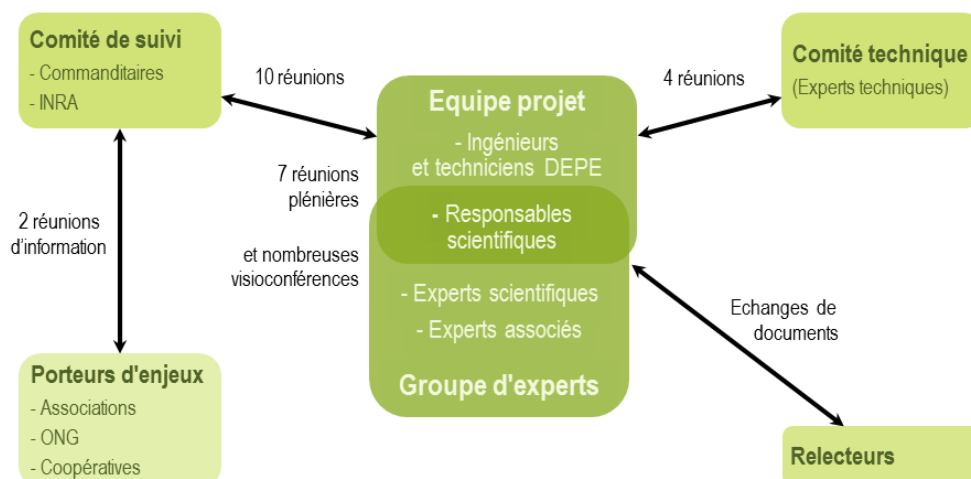
1.2.3.3. Interactions entre acteurs au cours de l'étude

Tout au long du déroulement des travaux, des interactions ont été organisées entre les acteurs (cf. Figure 6)

L'interface entre les commanditaires et les groupes opérationnels (équipe projet, groupe d'experts) a été assurée par un comité de suivi, composé à l'initiative des commanditaires. Les experts, représentés par les 2 responsables scientifiques, y étaient invités pour présenter l'avancement des travaux.

L'équipe projet et les deux responsables scientifiques ont joué le rôle d'interface entre le groupe d'experts scientifique et les acteurs chargés d'apporter une analyse critique sur la pertinence et la qualité des travaux (comité technique, relecteurs). Ce mode d'interaction a permis de préserver l'indépendance du travail des experts scientifiques, tout en permettant les retours sur les travaux en cours grâce à des comptes rendus assurant le transfert d'informations entre les acteurs.

Figure 6. Le dispositif d'interactions entre acteurs au cours de l'étude



1.2.3.4. Les produits de l'étude

Les livrables de l'étude sont :

- un rapport en français, constitué d'une présentation de la méthodologie, des fiches par action, des calculs d'atténuation et de coûts et d'une analyse transversale de l'ensemble des actions. Ce document, qui comporte les références bibliographiques sur lesquelles s'est appuyée l'analyse, a été rédigé et signé par les experts ;
- une synthèse de 92 pages reprenant les principaux résultats et conclusions du rapport,
- un résumé de 8 pages,
- un colloque de présentation des résultats de l'étude ouvert à la communauté scientifique et technique, ainsi qu'aux porteurs d'enjeux, a été organisé en clôture du travail (2 juillet 2013).

1.3. Méthodologie des évaluations nationales d'actions d'atténuation des émissions agricoles de GES

Dans un contexte où les pays s'efforcent d'atteindre des objectifs d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) de plus en plus contraignants, tous les secteurs de l'économie sont appelés à prendre part à l'effort national dans ce domaine. Bien que l'agriculture ait été généralement exclue de nombreux accords formels, le potentiel de réduction des émissions dans ce secteur est désormais examiné attentivement par les décideurs politiques. Afin de faire avancer l'élaboration de politiques nationales rationnelles d'atténuation dans ce secteur, plusieurs pays ont réalisé des études techniques et socio-économiques adaptées aux spécificités de leurs conditions climatiques et agricoles. La littérature concernant ces questions est de plus en plus abondante, avec notamment des travaux récents en Irlande, en Angleterre et aux États-Unis.

Ces études ont en commun un certain nombre de questions abordées :

- **Quel est le potentiel biophysique ou technique de réduction des émissions dans le secteur de l'agriculture ; quels sont les leviers disponibles au niveau de la gestion des sols, des productions végétales et des productions animales ?**

- **Quel est le potentiel économique associé à la mise en œuvre de telles mesures ; autrement dit quelles sont les mesures actuellement rentables en termes relatifs, et par rapport aux mesures d'atténuation existant dans d'autres secteurs ?**
- **Quelles mesures peut-on encourager dans le cadre d'une politique réaliste, visant à ce que les exploitants agricoles les mettent en œuvre ou les respectent ?**

Ce chapitre a pour objectif de situer l'étude de l'INRA dans ce contexte international.

1.3.1 Potentiel d'atténuation biophysique (ou technique)

Les actions techniquement réalisables pour atténuer les émissions dans le secteur de l'agriculture et de la gestion des terres sont, entre autres, la sélection génétique des animaux, les stratégies d'alimentation optimisées, l'utilisation plus efficace de l'azote, l'utilisation des sources d'énergie alternatives pour réduire les émissions imputables aux carburants fossiles et l'amélioration du captage du CO₂ atmosphérique via la séquestration dans le sol et les puits de carbone végétaux.

L'estimation de l'efficacité technique des mesures (c'est-à-dire la quantité de CO_{2e} par hectare ou par animal) s'appuie sur un grand nombre de résultats expérimentaux obtenus dans diverses conditions biophysiques. Pour déterminer le potentiel maximal (d'atténuation) biophysique dans un pays ou une région donnée, la sélection *a priori* des preuves expérimentales est généralement conditionnée par les conditions agronomiques régionales spécifiques. Pour un pays donné, ce potentiel technique est essentiellement limité à la fois par des paramètres généraux, tels que les surfaces cultivables disponibles ou le nombre de têtes de bétail, et par des conditions biophysiques locales plus spécifiques qui influent sur la chimie des sols et les possibilités d'approvisionnement en matière d'alimentation animale.

Dans la plupart des pays, les données expérimentales de base sont incomplètes et il est souvent nécessaire de transférer des données entre sites et entre pays en tenant compte, bien entendu, des différences biophysiques concernant par exemple les types de sol, le climat ou les pratiques de gestion. Ce transfert a été facilité par des études qui, après méta-analyse des données, ont calculé des estimations régionales sur lesquelles on peut se baser pour évaluer le potentiel d'atténuation des mesures. Il convient de noter que ces données correspondent à une combinaison de données de niveau 1 et 2. L'analyse à l'échelle mondiale la plus connue a été réalisée sous l'égide du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) : *Changements climatiques 2007*, quatrième Rapport d'évaluation des Nations Unies. Le chapitre 8 (Smith et al 2007) rassemble les connaissances accumulées par la communauté internationale en ce qui concerne l'atténuation des émissions dans le secteur agricole. Il évalue les mesures d'atténuation régionales et mondiales⁹ en se basant sur une liste restreinte de mesures applicables au niveau mondial.

La vision d'ensemble est forcément alimentée par les analyses spécifiques des pays. De nombreux pays ont donc commencé à perfectionner les estimations du niveau national d'atténuation. Ils peuvent le faire soit dans le cadre de l'inventaire national et des communications qu'ils soumettent à la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique, soit pour des raisons plus spécifiques liées aux décisions de politique intérieure concernant les émissions du secteur de l'agriculture. De bons exemples sont disponibles pour les États-Unis (Eagle et al 2012, entre autres).

1.3.2 Potentiel économique et coût marginal d'atténuation

Il s'agit ici d'évaluer le coût (ou le bénéfice) de la mise en œuvre des actions. Quelles sont celles qui sont les moins coûteuses et comment se situent elles par rapport aux actions d'atténuation existant dans d'autres secteurs ? Le coût estimé peut être le coût, ou le gain, de la mise en œuvre de l'action pour l'agriculteur, mais aussi pour l'Etat s'il s'agit de soutenir le développement de l'action.

Lorsqu'ils décident de mettre en place une activité d'atténuation, les producteurs doivent prendre en compte les coûts directs (investissements et coûts de fonctionnement nécessaires pour modifier les pratiques de production) et les éventuels coûts d'opportunité indirects (tels que la baisse de rendement). Lorsqu'ils ont plusieurs options d'atténuation possibles, ils doivent également comparer les bénéfices attendus, les coûts, et les risques (par exemple au niveau des rendements) des différentes options entre elles et par rapport aux revenus des systèmes de culture conventionnels. Les coûts des mesures d'atténuation peuvent être modélisés de manière plus ou moins sophistiquée pour refléter ces éléments.

Le potentiel économique d'atténuation est à rapprocher de la notion d'efficacité en coûts : Quelle est la combinaison d'actions permettant d'atteindre un objectif donné de réduction des émissions au coût total le plus faible ? La notion de coût marginal d'atténuation ou d'abattement (*marginal abatement cost*, MAC) est utile pour répondre à cette question. En termes

⁹ 22 régions, la France faisant partie de l'Europe occidentale

très généraux, le coût marginal d'atténuation (exprimé en euros par tCO₂e) correspond au coût le plus faible auquel on peut réduire les émissions d'une unité supplémentaire. Symétriquement, le potentiel économique d'atténuation est la plus grande réduction d'émissions que l'on peut obtenir à un « prix » des émissions donné.¹⁰

Potentiel économique d'atténuation et coût marginal d'abattement sont donc liés. La courbe de coût marginal d'abattement décrit la relation entre les quantités d'émissions évitées et le coût associé à la dernière réduction d'émissions qu'il est efficace d'entreprendre. Cette relation est a priori non décroissante, l'efficacité requérant que les actions de réduction les moins coûteuses soient entreprises en priorité.

Le potentiel économique d'atténuation n'inclut donc que l'atténuation permise par les actions techniquement faisables et qui peut être obtenue à un coût marginal inférieur à un seuil donné. Ce seuil peut représenter par exemple le coût d'atténuation qui peut être obtenu dans les autres secteurs de l'économie et/ou le "prix" unitaire que la société est prête à payer pour atténuer les dommages dus au changement climatique. Le potentiel économique d'atténuation est, ainsi, par construction, plus faible que le potentiel technique, les réductions d'émissions techniquement faisables mais caractérisées par un coût marginal supérieur à ce seuil ne permettent pas de contribuer efficacement à l'effort d'atténuation.

1.3.3 Panorama des approches utilisées dans la littérature

Les coûts marginaux d'atténuation ne sont pas directement observables. Dans la littérature, plusieurs stratégies ont été utilisées pour les évaluer. Vermont et De Cara (2010) identifient trois grandes catégories d'approches : les modèles micro-économiques de l'offre agricole, les modèles d'équilibre (partiel ou général) et les approches de type « ingénieur ».

La première catégorie correspond à une classe de modèles économiques qui décrivent le comportement d'offre (assolement et conduite des cultures, effectifs animaux et conduite de l'élevage) d'un ensemble d'agriculteurs maximisant leur profit compte tenu de paramètres économiques (prix des produits, des intrants, aides, etc.) et sous un certain nombre de contraintes techniques et politiques. Des exemples de ce type d'approche peuvent être trouvés dans Breen (2008), De Cara et Jayet (2000, 2011), De Cara et al (2005), et Lengens et Britz (2012) par exemple. En intégrant un « prix » des émissions pris en compte explicitement par chaque agriculteur, ce type de modèles peut décrire la réponse efficace en termes de réductions d'émissions. Chaque agriculteur représenté ajuste en effet le niveau de ses activités jusqu'à ce que la dernière unité d'émission évitée soit obtenue à un coût égal au prix des émissions, compte tenu des contraintes prises en compte par le modèle. Le coût marginal d'atténuation s'apparente alors à un coût d'opportunité, ie à la perte de revenu associée à la prise en compte de la contrainte sur les émissions. En faisant varier le prix des émissions et en le mettant en regard des quantités d'émissions réduites, on décrit la courbe de coût marginal d'abattement (au niveau de chaque agriculteur représenté ou à un niveau plus agrégé). Compte tenu de la structure de ce type de modèle, ces courbes doivent s'interpréter à contextes économique (prix des intrants et des produits) et technologique (reflété par les contraintes techniques) donnés. Du fait de la prise en compte explicite de la diversité des conditions de productions pour un ensemble d'agents, ce type d'approche est adapté à l'analyse des conséquences de l'hétérogénéité des potentiels et des coûts d'abattement individuels sur la définition des instruments de politique publique (De Cara et al, 2005).

L'évaluation des coûts marginaux d'atténuation dans les modèles d'équilibre partagent certains des principes exposés ci-dessus. En particulier, modèles d'offre et d'équilibre ont en commun de supposer la rationalité des agents et donc, par construction, l'égalité entre coût marginal d'abattement et prix des émissions. Néanmoins, à la différence des modèles d'offre, les modèles d'équilibre incluent une description de la demande des produits agricoles et des ajustements de marché dus aux modifications sur l'offre et/ou la demande induites par une politique d'atténuation. Dès lors, les modèles de cette catégorie intègrent les effets en retour des prix sur les coûts marginaux d'abattement. Cette approche a été utilisée par exemple par McCarl et Schneider (2001), Schneider et al (2007), Perez-Dominguez et al (2009), Golub et al. (2009). Les modèles d'équilibre sont caractérisés par une couverture géographique plus large (souvent mondiale), mais une résolution (spatiale et en termes de types d'agriculteurs représentés) généralement plus faible et un contenu technique moins détaillé que les modèles d'offre.

La troisième approche utilisée dans la littérature pour évaluer les coûts marginaux d'abattement s'appuie sur une logique que Vermont et De Cara (2010) qualifient « d'ingénieur ». Les études dans cette dernière catégorie compilent les informations techniques et scientifiques associées à un ensemble d'actions visant à réduire les émissions. Pour chacune d'entre elles, sont ainsi rassemblées les informations sur le potentiel technique d'atténuation unitaire, l'assiette sur laquelle la mesure est applicable, ainsi que le coût total associé (pertes ou gains de revenus associés à la mise en place de l'action, ensemble des coûts en capital, d'exploitation, de maintenance, de transaction). Le coût moyen d'atténuation associé à

¹⁰ A titre d'illustration, Schulte et Donnellan (2012) ont procédé à une évaluation comparative des mesures d'atténuation en fixant le prix du carbone à 33 € par tonne de CO₂e. Moran et al (2008) ont considéré une analyse de sensibilité pour divers prix du carbone, allant de 20 à 100 livres par tonne de CO₂e.

chaque action considérée est ensuite calculé comme le rapport entre son coût total et son potentiel d'atténuation. Ce coût unitaire représente la valorisation minimale des émissions (en euros par tCO_{2e}) nécessaire pour que l'action soit rentable. Les courbes de coût marginal d'abattement sont obtenues en classant les actions par coût unitaire d'atténuation croissant et en mettant en regard ce coût et le potentiel cumulé d'atténuation. Il est à noter que, pour une action donnée, le coût marginal est ainsi assimilé au coût moyen de l'action et est considéré comme constant en fonction de la quantité d'émissions évitées, d'où la forme 'en escalier' de la MACC (voir figure 7). Le terme 'marginal' dans cette approche doit donc être compris comme se rattachant à l'action elle-même, et non à la dernière unité d'émission évitée. Cette approche a été utilisée par exemple dans Smith et al (2007), McKinsey & Co (2009), Moran et al. (2008, 2009, 2010), Schulte et Donnellan (2012)¹¹. L'étude conduite en France et présentée dans ce rapport relève de ce type d'approche.

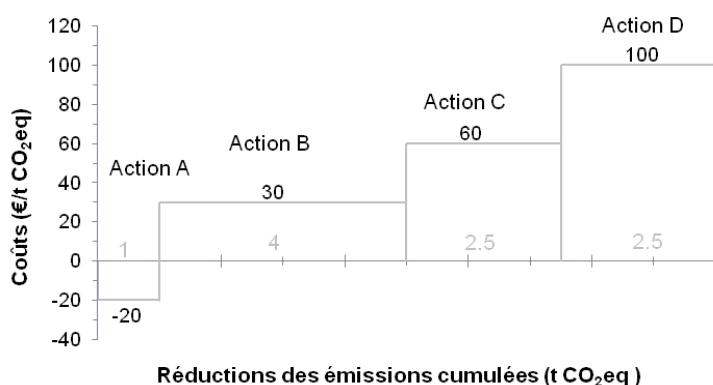


Figure 7. Exemple de MACC portant sur quatre mesures d'abattement.

Note : Le potentiel d'abattement cumulé et individuel (t CO_{2e}) est représenté sur l'axe des abscisses et les coûts spécifiques par unité de CO_{2e} sur l'axe des ordonnées. De gauche à droite les mesures d'abattement sont de moins en moins rentables. La mesure A permet d'économiser de l'argent, alors que les mesures B, C et D représentent des coûts additionnels.

Cette approche repose plus sur une logique comptable que sur une logique économique. En particulier, à la différence des deux premières approches, elle ne nécessite pas explicitement l'hypothèse de comportement rationnel de la part des agents. Une conséquence importante est que rien n'empêche dans les études de ce type d'aboutir à des mesures qui permettent à la fois de réduire les émissions de GES et d'améliorer les revenus des agents. Ces actions sont donc caractérisées par un "coût négatif". Ce double gain, à la fois économique et environnemental, peut s'expliquer par la présence d'inefficacités dans la situation initiale (par exemple, si les agents utilisent déjà plus d'intrants azotés que ne l'exigerait la prise en compte de leurs intérêts propres). Il peut également résulter de la difficulté de comptabiliser et d'intégrer certaines composantes des coûts (coût d'opportunité des ressources finies comme la terre, prime de risque associée à certaines actions, coût lié à l'apprentissage et à la formation). Par construction, les modèles économiques (d'offre ou d'équilibre), fondés sur l'hypothèse que l'utilisation des ressources par les agents est efficace dans la situation initiale, ne font pas apparaître de tels coûts négatifs.

Les trois approches diffèrent également par le type d'actions d'atténuation qui peuvent être prises en compte. Certaines réductions des émissions peuvent être obtenues par une réallocation des ressources utilisées pour la production (réduction de l'utilisation d'intrants, modification de l'assolement, etc.) sans nécessairement requérir de modification radicale de la technologie. Les modèles économiques, qui reposent sur une description de l'ensemble des possibilités de production, permettent d'intégrer relativement facilement ce type de réductions. Certaines options d'atténuation en revanche résultent de l'adoption de nouvelles pratiques et/ou d'investissements dans de nouvelles technologies et peuvent impliquer des coûts fixes. Elles sont plus facilement prises en compte dans les approches de type "ingénieur". En outre, ces dernières ont l'intérêt de permettre d'analyser des actions au contenu technique très détaillé et de mettre en lumière des leviers d'action concrets pour les décideurs publics. Elles permettent également de prendre en compte plus facilement que ne le font les modèles économiques des actions qui ne sont pas actuellement déployées mais pour lesquelles on dispose de références techniques.

Les émissions de GES d'origine agricole sont caractérisées par de nombreuses interactions entre les sources. A titre d'illustration, les effectifs animaux ont un effet à la fois sur les émissions liées à la fermentation entérique, sur celles dues à la gestion des effluents d'élevage mais aussi sur l'assolement (en particulier sur le partage entre surfaces dédiées à l'alimentation animale et humaine) et donc sur les quantités d'intrants azotés et les émissions de N₂O par les sols agricoles. Par ailleurs, certaines actions d'atténuation sont mutuellement exclusives car elles nécessitent d'utiliser les mêmes ressources (par exemple la terre). Les modèles d'offre peuvent rendre compte des interactions qui ont lieu au niveau de l'exploitation (à travers la prise en compte explicite de contraintes de surfaces et/ou de contraintes liées à l'alimentation des animaux). D'autres interactions sont dues à des interactions de marché : par exemple, une baisse de l'utilisation d'azote, si

¹¹ Ces deux dernières études ont été réalisées par des agences gouvernementales, à savoir, respectivement, le *Committee on Climate Change* (Comité sur le changement climatique) au Royaume-Uni et le *Department of Environment, Community and Local Government* (ministère de l'Environnement, des Communautés et du Gouvernement local) en Irlande.

elle implique une baisse de l'offre de certains produits, peut contribuer à en augmenter le prix, entraînant alors une modification des prix de l'alimentation animale et du comportement des éleveurs, et *in fine* des émissions liées à l'élevage. De telles interactions sont prises en compte de manière endogène dans les modèles d'équilibre. L'approche analytique (action par action) qui caractérise les approches de type "ingénieur" rend moins aisée l'analyse des interactions entre actions¹². Elle nécessite de s'assurer *ex-post* de la cohérence d'ensemble des actions menées à la fois en termes d'effets sur les coûts et les potentiels d'atténuation et en termes d'utilisation des ressources. Cet aspect n'est pas toujours clairement documenté dans les études disponibles. Une exception notable est l'étude de Moran et al (2008) (reprise dans McLeod et al, 2010 et Moran et al, 2010) qui proposent explicitement une démarche itérative permettant de prendre en compte une partie des interactions.

Compte tenu de la variabilité des coûts et des potentiels d'atténuation, il est clair que le niveau de détail retenu dans la description du contexte biophysique et technique joue un rôle important pour rendre compte des spécificités qui s'appliquent à l'échelle d'un territoire ou d'un pays. A cet égard, la démarche ascendante (*bottom-up*) qui caractérise les modèles d'offre et les approches de type "ingénieur" présente l'avantage de permettre d'intégrer une plus grande richesse d'informations que ne peuvent le faire les modèles d'équilibre, de conception descendante (*top-down*) et plus agrégée. Une conséquence est néanmoins que, à l'instar des modèles économique de l'offre agricole et au contraire des modèles d'équilibre, ce type d'approche ne prend pas en compte l'effet des actions d'atténuation sur les marchés, et donc néglige les possibles effets en retour des variations de prix sur les coûts d'atténuation.

Les instruments de politique d'atténuation que ces différentes approches permettent d'analyser sont différents. Les modèles économiques (d'offre ou d'équilibre) privilégient l'analyse d'instruments assis directement sur les émissions. Les instruments économiques auxquels ces analyses se réfèrent, qu'il s'agisse d'instruments en prix (taxe, subvention) ou d'instruments en quantités (marché de quota), visent à inciter les agents à modifier leur comportement afin de réduire leurs émissions. Les instruments économiques constituent ainsi un signal qui pousse les agents à intégrer dans leurs décisions de production et/ou de consommation la "valeur" des émissions. Compte tenu de ce signal, chaque agent, en arbitrant entre les gains qu'il peut retirer de son activité et de la valeur des émissions dont il est responsable, décide de son niveau de réduction et des changements à opérer pour y parvenir. Si cette logique est cohérente avec la recherche de l'efficacité en coût, elle peut se heurter à des difficultés de mesure. D'un point de vue politique, elle permet moins facilement d'identifier a priori les leviers techniques de réduction des émissions. La logique "action par action" qui prévaut dans les approches de type "ingénieur" privilégie des instruments assis sur les pratiques plutôt que directement sur les émissions. Elle se prête donc plus facilement à l'examen de leviers techniques et les instruments correspondants s'apparentent donc plus à des instruments de type réglementaire (*command and control*).

Enfin, il est clair que le périmètre retenu et les modes de calculs utilisés pour comptabiliser les émissions jouent un rôle non seulement sur l'évaluation du potentiel d'atténuation mais aussi sur le coût. Certaines études intègrent les émissions liées à l'agriculture mais aussi aux changements d'usages des sols incluant les émissions de CO₂ dues à la combustion (par exemple McCarl et Schneider, 2001 ; Schneider et McCarl, 2006 ; Moran et al, 2010). D'autres se restreignent aux seules émissions agricoles de N₂O et de CH₄ (De Cara *et al.*, 2005, De Cara et Jayet, 2011 ; Perez Dominguez *et al.*, 2009). D'autres enfin se limitent aux émissions d'un sous-secteur (Lengers et Britz, 2012). Ces différences dans le périmètre retenu pour analyser les actions rendent parfois difficile une comparaison directe entre les résultats des différentes études. Intuitivement, il ressort néanmoins que, plus le périmètre est large, plus les possibilités d'atténuation sont nombreuses et donc plus le coût marginal d'atténuation est faible pour une quantité d'émissions évitées donnée. A ces différences dans le périmètre des émissions prises en compte, se superposent celles dans les modes de comptabilisation. Certaines études se conforment directement aux méthodes de niveau 1 proposées par le GIEC (Perez Dominguez *et al.*, 2009). D'autres utilisent des méthodes de niveau supérieur, pouvant impliquer le recours à des modèles pour tout ou partie des sources (par exemple McCarl et Schneider, 2001 ; De Cara et al, 2005 ; Schneider et McCarl, 2006 ; Durandau et al, 2010 ; Lengers et Britz, 2012 ; Schulte et Donnellan, 2012). Certaines études enfin peuvent intégrer les émissions induites sur l'amont ou sur l'aval en s'écartant ainsi de la logique des inventaires et se rapprochant de celle des analyses en cycle de vie (ACV, Schulte et Donnellan, 2012). Ainsi, par exemple, on peut penser que, toutes choses égales par ailleurs, une diminution de l'utilisation de l'azote entraîne une diminution des émissions liées au processus de fabrication et de transport. La littérature consacrée aux impacts de nombreux produits agricoles sur le cycle de vie est abondante (par exemple, Bellarby et al 2012). Schulte et Donnellan (2012) ont utilisé une partie de ces informations pour calculer une MACC basée sur le cycle de vie et la comparer à celle basée sur les méthodes du GIEC. Bien que cela constitue un élargissement intéressant de la MACC basée uniquement sur l'exploitation, l'application de la logique ACV à l'analyse des options d'atténuation soulève des questions sur la responsabilité des exploitants dans l'ensemble des émissions induites par la chaîne d'approvisionnement et sur leur capacité à infléchir les émissions aval et amont.

¹² Les interactions au sein d'une même action (dans le cas par exemple où une action a des conséquences sur plusieurs catégories d'émissions) sont toutefois prises en compte assez aisément dans cette approche.

Quel est l'effet d'adopter telle approche ou telle autre sur l'évaluation des potentiels et des coûts d'atténuation ? La méta-analyse conduite par Vermont et De Cara (2010) permet, une fois les résultats harmonisés en termes d'unités et de périmètre (restreint aux émissions agricoles de N₂O et de CH₄), de contrôler les différences dans les hypothèses retenues dans les 21 études disponibles offrant une base de comparaison suffisante. L'analyse statistique des évaluations collectées a mis en évidence des différences importantes entre les résultats des trois approches identifiées ci-dessus en termes de coûts et potentiels de réduction dans le secteur agricole. En particulier, il ressort que les approches de type "ingénieur" aboutissent, toutes choses égales par ailleurs, à des potentiels d'atténuation plus élevés pour un prix donné des émissions (symétriquement à un coût marginal plus faible pour un objectif d'atténuation donné). Ce résultat est notamment lié à la présence d'actions à coût négatif qui, en général, fournissent une part importante de la réduction d'émissions dans ce type d'études.

La Figure 8 illustre les résultats en termes de MACC issues d'études caractéristiques de chacune des trois approches (panels a, b et c), ainsi que la courbe "moyenne" correspondant à la situation européenne prédite par la méta-régression.

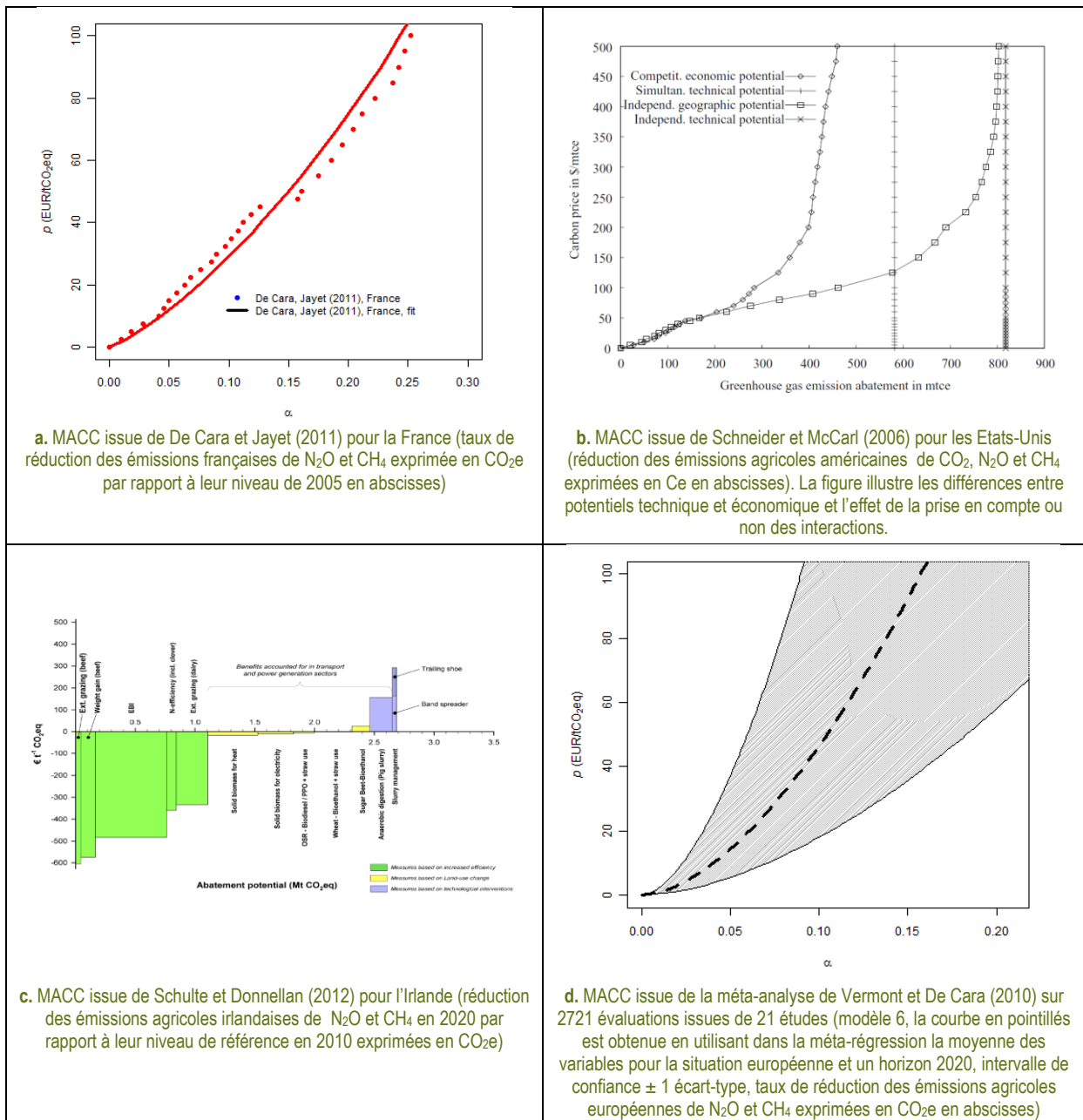


Figure 8. Exemples de MACC issues (a) d'un modèle micro-économique de l'offre agricole, (b) d'un modèle d'équilibre partiel du secteur agricole, (c) d'une approche de type "ingénieur", (d) d'une méta-analyse de la littérature.

2. Leviers d'atténuation et sélection des actions à instruire

2.1. Méthode de sélection

2.1.1. Critères d'éligibilité des actions

La sélection des actions à instruire de manière approfondie s'est opérée en fonction de critères d'éligibilité inscrits dans le cahier des charges de l'étude, et des performances attendues des actions. Les critères étaient les suivants :

- **Éligibilité de l'action au regard du cahier des charges de l'étude.** L'action doit porter sur une pratique agricole, relevant d'une décision de l'agriculteur, avec une atténuation escomptée se situant au moins en partie sur l'exploitation agricole, sans remise en cause majeure du système de production ni baisse supérieure à 10% des niveaux de production. Ont donc été considérées hors périmètre de l'étude des actions qui soit visent un secteur en amont ou en aval de la production agricole (action portant sur la consommation alimentaire, par ex.), soit visent bien le secteur agricole mais ont leur principal effet escompté en amont ou en aval de l'exploitation (réduire la consommation électrique du secteur agricole par ex.) ou auraient un impact fort sur la production nationale (réduction du cheptel de ruminants, forte extension de l'agriculture biologique).
- **Importance a priori du potentiel d'atténuation dans le contexte agricole français.** N'ont pas été instruites des actions dont le potentiel peut être considéré comme faible du fait d'une atténuation unitaire modeste (parce que l'amélioration déjà réalisée des pratiques réduit la marge de progrès, par ex.) et/ou d'une assiette limitée en France (action portant sur les sols de rizières pour limiter les émissions de CH₄ par ex.). Le potentiel peut aussi être jugé trop incertain par manque de références scientifiques ou techniques couvrant la gamme des situations de terrain.
- **Disponibilité actuelle des techniques** nécessaires à la mise en œuvre de l'action et des connaissances scientifiques validées établissant son efficacité. N'ont ainsi par exemple pas été retenues, car encore **au stade de la recherche** et non techniquement applicables dans l'état actuel des connaissances : la production de dihydrogène à partir d'effluents d'élevage pour produire de l'énergie (pas encore techniquement au point à l'échelle d'une exploitation), l'introduction de charbon d'origine végétale (biochar) dans le sol pour y stocker du carbone (procédé non maîtrisé, le temps de résidence du carbone apparaissant très variable et dépendant notamment du procédé de fabrication) ou les adaptations des cultures ou des animaux nécessitant une amélioration génétique encore à réaliser.
- **Applicabilité de l'action**, qui peut être problématique du fait d'une faisabilité technique faible à large échelle (modification des conditions physico-chimiques des sols pour réduire les émissions de N₂O à l'échelle de la France, par ex.), de "risques" (avérés ou suspectés) pour la santé ou l'environnement, d'une incompatibilité avec une réglementation en vigueur (sur l'usage des hormones et des antibiotiques en élevage, par ex.) ou d'une acceptabilité sociale faible (technique utilisant la transgénèse ; élimination des protozoaires du rumen pour limiter la fermentation).
- **Synergies ou antagonismes éventuels avec d'autres objectifs majeurs assignés à l'agriculture.** Ce critère, secondaire, a surtout contribué à consolider le choix d'actions présentant déjà de bonnes propriétés vis-à-vis des critères précédents (lutte contre l'érosion ou préservation de la biodiversité des sols renforçant l'intérêt du non-labour), ou au contraire à ne pas sélectionner d'autres actions (impliquant par ex. une "intensification" des systèmes de production allant à l'encontre des objectifs de réduction d'usage d'intrants).

2.1.2. Les étapes de la sélection

La première étape du processus de sélection des actions retenues pour une instruction approfondie dans le cadre de cette étude a été l'établissement d'une liste aussi exhaustive que possible des actions d'atténuation des émissions agricoles de GES examinées dans les études nationales et internationales existantes. Ce travail d'inventaire a abouti, après élimination d'actions "hors périmètre", et regroupement d'actions techniquement proches, à une liste de 35 actions "candidates" (voir section 2. Leviers d'atténuation et sélection des actions à instruire). Les actions de cette liste préliminaire ont été examinées individuellement par le(s) expert(s) compétent(s) sur le sujet, afin de disposer d'un premier diagnostic sur leur potentiel d'atténuation des émissions de GES et sur la disponibilité de références scientifiques et techniques permettant, ou non, de mener une analyse. Les experts scientifiques avaient comme mission :

- de compléter la liste s'ils y repéraient des manques.
- de sélectionner parmi les actions candidates, une vingtaine d'actions parmi les 35,
- puis, après une instruction plus approfondie, de sélectionner une dizaine d'actions parmi les 20.

Ce travail a été réalisé en deux étapes afin de permettre la recherche d'informations complémentaires entretemps. Les résultats intermédiaires et finaux du processus de sélection ont été présentés aux experts techniques (en comité technique) et aux commanditaires (en comité de suivi). Les interactions au sein de ces deux instances ont permis d'amender et de consolider la liste des actions retenues pour faire l'objet d'une instruction plus approfondie dans le cadre de l'étude. Il s'avère a posteriori que les deux dernières catégories de critères, plus subjectifs que les trois premières, ont été peu déterminantes dans l'élimination d'actions candidates, sauf dans quelques cas précis (par exemple l'utilisation d'antibiotiques ionophores en alimentation animale). Ces critères ont par contre consolidé le choix de certaines actions présentant par ailleurs de bonnes propriétés vis-à-vis des trois premiers critères.

L'inventaire des actions susceptibles de réduire les émissions de GES, établi à partir des études nationales et internationales existantes, est structuré par les composantes de l'activité agricole concernées (production végétale, production animale, gestion des effluents et de l'énergie) et par les atténuations d'émissions de GES visées (gaz ciblés : CO₂, CH₄ ou N₂O). Quatre classes (notées I à IV) sont ainsi définies, en fonction de l'activité agricole et des gaz majoritairement concernés, au sein desquelles différents leviers d'action peuvent être mobilisés. Ce classement des actions candidates facilite aussi la prise en compte de l'objectif d'un panel d'actions visant une diversité de productions agricoles.

Les mécanismes biophysiques mis en jeu dans les émissions agricoles de GES, et sur lesquels agissent les leviers et les actions d'atténuation, sont présentés dans l'Encadré 1.

2.2. Les actions retenues et les actions non instruites

L'application, à la liste préliminaire de 35 actions, du classement puis des critères de sélection illustre la démarche suivie, qui aboutit au choix des dix actions retenues pour une analyse approfondie (notées ① à ⑩) et explicite le principal motif de non-sélection des actions non retenues (⊗). Un argumentaire complet reprenant l'ensemble des actions et les principaux motifs est disponible en annexe 4.

I. Production végétale et réduction des émissions de GES du sol

Cette classe contient des actions visant les réactions biochimiques émettrices de N₂O (nitrification et dénitrification) et de CH₄ (fermentation) dans les sols, soit par modification des conditions physico-chimiques (principalement l'aération), soit par diminution des apports de fertilisants.

I.1. Modifier les conditions physico-chimiques du sol pour défavoriser les réactions productrices de CH₄ et de N₂O

⊗ *Optimiser les conditions physico-chimiques du sol pour limiter les émissions de N₂O* (par ex. optimiser le pH par du chaulage, limiter le tassement du sol). Action non retenue car les émissions de N₂O des sols résultant de nombreux facteurs (propriétés intrinsèques des sols, événements climatiques, activité humaine), il n'est actuellement pas facile de prévoir comment la variation de ces paramètres modifie les flux de N₂O et d'agir sur ces flux à l'échelle de la France.

⊗ *Modifier les communautés microbiennes des sols en introduisant des microorganismes réduisant le N₂O en N₂* (introduction de souches de *Rhizobia* vivant en symbiose avec des légumineuses, par ex.). Action non retenue car expérimentée en laboratoire et en serre, mais pas encore testée en plein champ.

⊗ *Favoriser l'aération des sols de riziculture pour défavoriser les réactions de fermentation et limiter les émissions de CH₄* (diminuer la profondeur des rizières, les vider plusieurs fois par an, par ex.). Action non retenue malgré un potentiel d'atténuation unitaire non négligeable, car l'assiette en France est très réduite (environ 20 000 ha de rizières).

I.2. Diminuer les apports de fertilisants azotés sur les cultures

⊗ *Améliorer génétiquement l'efficacité de prélèvement et d'utilisation de l'azote par les plantes* pour permettre la diminution des apports de fertilisants azotés. Action non retenue car elle nécessite un travail d'identification des caractères et de sélection génétique préalable, et n'est donc pas applicable à court terme.

① *Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques.* Le potentiel de cette action est a priori important, elle est convergente avec d'autres objectifs agri-environnementaux et peut être mise en place rapidement. Action retenue.

② *Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N₂O.* Cette action peut aussi être appliquée dès maintenant. Action retenue.

Encadré 1. Les principaux mécanismes d'émission de GES et de stockage de carbone dans le secteur agricole

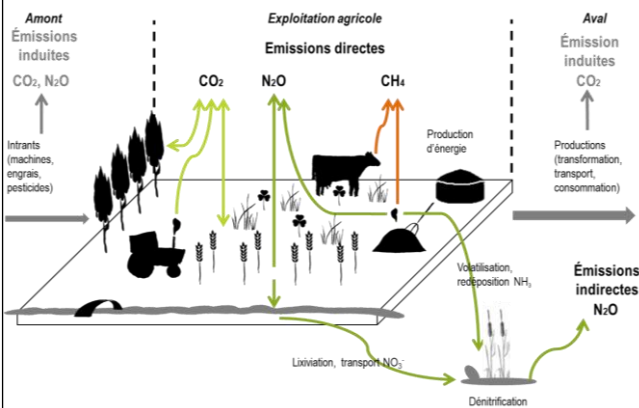


Figure 9

Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂)

La combustion des molécules carbonées (fioul, gaz, bois, CH₄...), qui s'accompagne d'une libération d'énergie, émet aussi du CO₂. Lorsque la molécule carbonée est d'origine fossile, le CO₂ libéré s'accumule dans l'atmosphère et participe au réchauffement climatique ; lorsqu'elle est d'origine renouvelable, on considère que le CO₂ émis a été prélevé dans l'atmosphère et ne contribue pas à l'accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique (cycle court du carbone).

La combustion est utilisée pour produire de l'énergie (ex. combustion de CH₄ dans un méthaniseur), effectuer un travail (ex. fonctionnement du tracteur) ou réaliser des réactions chimiques (ex. synthèse de fertilisants azotés). Les actions mises en œuvre sur l'exploitation peuvent induire une modification des émissions de CO₂ hors de celle-ci (la moindre consommation d'intrants par l'exploitation diminue leur production en amont ; la production d'énergie renouvelable peut se substituer à de l'énergie fossile en aval de l'exploitation).

Le stockage de carbone (C)

Les molécules organiques produites par la photosynthèse, donc à partir de CO₂ capté dans l'atmosphère, constituent un stock de carbone dans les biomasses aérienne (tiges et feuilles) et souterraine (racines). Après la mort du végétal, cette matière organique restant ou retournant au sol est décomposée sous l'action de micro-organismes. Toutefois, cette décomposition étant lente et partielle, du carbone se trouve transitoirement stocké dans le sol, sous différentes formes (biomasse microbienne, humus...) avant sa minéralisation et le retour du carbone dans l'atmosphère sous forme de CO₂. La biomasse végétale et le sol peuvent ainsi

constituer des puits de carbone et contribuer à réduire la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

Les choix faits sur l'exploitation (usage des sols, techniques culturales mises en œuvre) peuvent modifier les stocks de carbone sur l'exploitation, mais aussi hors de l'exploitation, voire hors du territoire français (la modification de la ration alimentaire des animaux peut agir, via la culture de soja, sur la déforestation au Brésil, par ex.).

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O)

Certaines bactéries présentes dans le sol et dans les effluents d'élevage sont le siège de réactions biochimiques : la nitrification transformant l'ammonium (NH₄⁺) en nitrate (NO₃⁻) et produisant du N₂O (favorisée en conditions aérobies), et la dénitrification transformant le NO₃⁻ en N₂O puis N₂ (favorisée en conditions anaérobies).

L'urée contenue dans les déjections des animaux se minéralise facilement en NH₃, puis la transformation en N₂O est favorisée lorsque certaines parties sont aérobies et d'autres anaérobies (cas du fumier solide aéré) et défavorisées par blocage de la nitrification en milieu complètement anaérobie (cas du lisier liquide). Dans les sols, les conditions d'aération et les apports de fertilisant azoté organique ou minéral (et donc de NO₃⁻ et/ou de NH₄⁺) agissent sur les réactions et sur la production de N₂O. Les émissions de N₂O sur l'exploitation sont dites "directes" ; les émissions ayant lieu sur les espaces physiquement liés, soit après lixiviation du NO₃⁻ par percolation de l'eau dans le sol puis dénitrification, soit après volatilisation de NH₃, redépôt puis nitrification/dénitrification, sont dites "indirectes".

Les émissions de méthane (CH₄)

En milieu anaérobie (sans oxygène pour la respiration), certains microorganismes utilisent des molécules organiques pour s'approvisionner en énergie par fermentation, en émettant du CH₄.

Chez les ruminants, la dégradation des glucides (ex. la cellulose de l'herbe) dans le système digestif (rumen) fait intervenir des microorganismes qui les décomposent par fermentation, produisant du CH₄ évacué par éructation. Au stockage en conditions anaérobies (cas du lisier), la matière organique non digérée contenue dans les déjections des animaux peut être transformée en CH₄ par fermentation. Enfin, dans un sol trop compacté ou gorgé d'eau, l'absence d'oxygène peut favoriser la fermentation de la matière organique. A l'inverse, des sols aérobies peuvent oxyder le méthane atmosphérique.

Conditions aérobies (présence de O ₂) - Fumier (en partie aérobie) - Traitement par torchères ou méthanisation - Sol (aéré, peu hydromorphe)	Eléments chimiques (et localisation de la réaction)	Conditions anaérobies (rareté de O ₂) - Rumen - Lisier - Fumier (en partie anaérobie) - Sol (compacté, hydromorphe, inondé)
CO ₂ ←	Molécule carbonée ou CH ₄ (fioul, gaz, bois) (déjections)	←
CO ₂ ←	Matière organique (rumen, déjections stockées, sol)	→ CH ₄
N ₂ O ↔	NH ₄ ⁺ /NH ₃ , fertilisants (urine, déjections, sol)	
NO ₃ ⁻ →	NO ₃ ⁻ , fertilisants (sol, déjections)	→ N ₂ O → N ₂

Figure 10. Sources des émissions de GES

II. Production végétale et stockage de carbone dans le sol et la biomasse

Actions ciblant l'accumulation de matière organique, soit en augmentant la production de biomasse pérenne par photosynthèse et/ou l'apport de matière organique dans les sols, soit en ralentissant sa minéralisation.

II.1. Réduire les pertes de carbone en diminuant les flux allant de la biomasse et du sol vers l'atmosphère

⊗ *Limiter l'exportation de matière organique hors des parcelles cultivées, pour limiter les pertes de carbone des sols* (ex. ne pas brûler les résidus des cultures au champ, les restituer au sol). Action non retenue car son assiette est faible, le brûlage n'étant que très peu pratiqué en France et les résidus de culture étant en général déjà restitués au sol.

③ *Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol*. Action retenue car elle présente un potentiel unitaire et une assiette *a priori* élevés (mais sujet à controverses).

⊗ *Eviter la culture de zones humides pour limiter le relargage de CO₂ stocké dans la matière organique*. Action non retenue malgré un potentiel unitaire non négligeable, car l'assiette des zones cultivées qui pourraient être remises en eau est probablement faible en France.

II.2. Augmenter les entrées de carbone par une production accrue de biomasse, en augmentant alors les flux de l'atmosphère vers la biomasse et le sol

⊗ *Accroître la production de biomasse en optimisant les facteurs de production, pour augmenter le retour au sol de carbone*. L'augmentation de la production implique une fertilisation ou une irrigation accrues qui favorisent les émissions d'autres GES. Le potentiel d'atténuation est incertain, l'action est potentiellement antagoniste avec d'autres politiques publiques et n'a donc pas été retenue. Une sous-action de l'action 6 (gestion des prairies) mobilise cependant ce levier (intensification modérée des prairies les plus extensives).

⊗ *Ajuster le choix des espèces cultivées pour accroître le retour au sol de carbone* (cultures à restitution plus importante, plantes à enracinement profond ou pluriannuelles, par ex.). Action non retenue parce qu'elle aurait un effet important sur la nature des productions et que son potentiel est incertain, notamment pour l'enracinement profond.

④ *Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O*. Action retenue.

⑤ *Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale*. Action retenue.

⑥ *Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone et réduire les émissions de N₂O*. Action retenue.

⊗ *Restaurer les sols dégradés pour augmenter la production de matière organique et stocker du carbone dans les sols* (sols acidifiés, érodés, salés...). Action non retenue car son assiette est faible.

⊗ *Épandre du carbone "inerte" (par ex. des biochars, charbon d'origine végétale) sur les sols cultivés pour stocker du carbone*. Action non retenue car son potentiel unitaire est incertain, et les conséquences sur les sols et la production agricole sont encore peu connues.

III. Production animale et réduction des émissions de CH₄ et de N₂O

Actions visant la fermentation (principalement entérique mais aussi celle des déjections) et la nitrification/dénitrification des déjections, en agissant sur la productivité du troupeau, le fonctionnement du rumen, ou l'alimentation des animaux.

III.1. Accroître la productivité animale pour diminuer les émissions de CH₄ et de N₂O par unité de produit

⊗ *Sélectionner des animaux sur les traits de vitesse de croissance, de production laitière, de prolificité*. Action non retenue du fait de la forte compensation entre diminution du CH₄ et augmentation des émissions des deux autres GES, et parce que la sélection sur la productivité est déjà pratiquée.

⊗ *Sélectionner les bovins sur des critères de consommation alimentaire résiduelle (efficacité d'utilisation des nutriments) ou directement sur les émissions de CH₄*. Action non retenue du fait d'un manque de recul sur ces critères de sélection et d'un manque de connaissances sur la sélection directe sur les émissions de CH₄.

⊗ *Améliorer la conduite et la santé du troupeau pour accroître la productivité animale*. Action non retenue car le potentiel d'atténuation est faible puisque ce travail sur la conduite du troupeau est déjà mené.

⊗ *Utiliser des produits augmentant la production (viande ou lait) par animal. Action non retenue car l'utilisation de la somatotropine bovine, seul additif dont l'efficacité sur la production laitière a été prouvée, est interdite dans l'Union européenne.*

⊗ *Développer des races mixtes ou des croisements industriels chez les bovins pour diminuer les émissions de GES par unité de produit. Action non retenue, parce qu'elle modifierait de manière importante les systèmes d'élevage et que le potentiel est incertain.*

III.2. Agir sur le fonctionnement du rumen pour diminuer les émissions de CH₄ entérique

⊗ *Réguler les populations de microorganismes favorisant la production de méthane dans le rumen à l'aide d'antibiotiques. Action non retenue car l'utilisation d'antibiotiques à des fins non curatives est interdite dans l'Union européenne depuis 2006.*

⊗ *Agir sur les microorganismes du rumen en régulant les populations de bactéries, protozoaires et méthanogènes par des biotechnologies : par ex., vaccin anti-méthanogène, inoculation par des souches spécifiques de levures et bactéries, additifs chimiques (dérivés chlorés ou bromés) ou naturels (huiles essentielles, extraits de plantes). Action non instruite parce que les biotechnologies permettant de modifier l'écosystème microbien du rumen sont encore au stade de recherche, que les autres additifs n'ont pas montré d'effet *in vivo* systématique et à long terme et que certains d'entre eux ont une acceptabilité sociale faible.*

III.3. Modifier la ration pour réduire les émissions de CH₄ et de N₂O

⊗ *Modifier les caractéristiques nutritionnelles des fourrages en favorisant les composants non méthanogènes pour limiter les émissions de CH₄ entérique (augmenter la teneur en sucres ou en tanins des fourrages...). Action non retenue car au stade de la recherche ; la démonstration des effets *in vivo* n'est pas encore réalisée.*

⊗ *Accroître le pourcentage d'aliment concentré dans les rations. Action non retenue en raison des compensations partielles entre GES, et des questionnements actuels sur la durabilité de systèmes basés sur l'utilisation de rations riches en concentré chez les ruminants.*

⑦ *Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique. Action retenue.*

⑧ *Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O. Action retenue.*

IV. Gestion des effluents, production et consommation d'énergie sur l'exploitation

Actions ciblant la production de CO₂ par combustion et les émissions des déjections (fermentation, nitrification, dénitrification), soit en diminuant la consommation d'énergie fossile ou en augmentant la production d'énergie renouvelable, soit en modifiant les conditions de stockage des déjections. La consommation d'énergie en tant que telle n'est pas visée lorsqu'elle ne s'accompagne pas d'une émission de CO₂ d'origine fossile sur l'exploitation.

IV.1. Réduire le stockage des effluents ou leurs émissions de GES

⊗ *Diminuer la quantité d'effluents d'élevage stockés, pour réduire les émissions de CH₄ dues à la fermentation des déjections. Action non retenue car son potentiel est plus faible que celui d'autres actions. Une partie de l'effet attendu est obtenu par une sous-action de l'action 6 (allongement de la durée de pâturage)*

⊗ *Optimiser le type d'effluent produit pour obtenir un équilibre CH₄/N₂O minimisant le pouvoir de réchauffement par unité de déjection (favoriser le fumier plutôt que le lisier, le compostage des effluents...). Action non retenue car son potentiel d'atténuation est incertain, des données manquant notamment sur les systèmes fumier.*

⊗ *Optimiser la gestion et le stockage des effluents pour réduire les émissions de N₂O et de CH₄. Action initialement retenue mais abandonnée du fait de difficultés techniques d'instruction.*

IV.2. Produire de l'énergie à partir de biomasse ou d'effluents d'élevage

⊗ *Produire du dihydrogène à partir des effluents d'élevage par voie anaérobie et le valoriser énergétiquement, pour limiter les émissions de CH₄ et les émissions de CO₂ issues de la combustion d'énergie fossile. Action non retenue car elle est au stade de recherche pour lever des verrous technologiques, notamment l'instabilité chronique des procédés.*

⊗ *Produire de l'énergie sur l'exploitation par combustion de biomasse pour diminuer les émissions de CO₂ issues de la combustion d'énergie fossile. Action non retenue car en partie couverte par l'action 5 (valorisation énergétique du bois des haies). La production de biomasse dédiée à la production d'énergie est hors du cadre de l'étude.*

⑨ Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage. Action retenue.

IV.3. Réduire la consommation d'énergie fossile sur l'exploitation agricole

⊗ Utiliser l'énergie solaire pour sécher naturellement des produits agricoles et diminuer les besoins en énergie pour le séchage post-récolte (ex. diminuer le taux d'humidité du maïs à la récolte). Action non retenue car pour une partie importante de l'assiette l'effet escompté se situe à l'aval de l'exploitation.

⑩ Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂. Action retenue.

2.3. Les dix actions instruites

2.3.1. Les actions et les sous-actions

Chaque action, définie par un levier en fonction des ateliers de l'exploitation concernés et des mécanismes ciblés, est divisée en sous-actions correspondant à la déclinaison de cette logique : application à des surfaces ou des cheptels différents, mise en œuvre de différentes techniques contribuant au même objectif... Au total, 26 sous-actions sont ainsi examinées (Tableau 3).

Les potentiels d'atténuation de ces sous-actions sont en règle générale cumulables, dans la mesure où elles portent sur des assiettes différentes (cheptel bovin pour l'une, porcine pour l'autre...), ou sont applicables simultanément à une même assiette (modifications compatibles de la ration des ruminants ou de la fertilisation...). Cette additivité n'est en revanche pas possible lorsqu'il s'agit d'options techniques alternatives qui ne peuvent pas être mises en œuvre simultanément. Dans ce cas, les différentes options techniques sont étudiées, mais seule l'une d'elles est retenue pour les comparaisons entre actions.

2.3.2. Les particularités du processus de sélection des actions et comparaison avec d'autres études

Le processus de sélection dont les résultats sont présentés dans la section précédente induit plusieurs spécificités dans le choix des actions instruites par rapport à d'autres études visant le même objectif mais ayant un cahier des charges différent.

Un processus de réflexion et de débat entre scientifiques de l'INRA et d'autres organismes a permis d'établir une liste réduite de 10 actions d'atténuation applicables, dont le potentiel technique pouvait être renseigné dans le contexte de l'agronomie française et pour lesquelles il existait des données de recherche relativement reconnues. Cette approche est semblable à celle de l'étude irlandaise (Schulte et Donnellan 2012), qui a utilisé le même type de méthode pour établir une MACC concernant 10 mesures d'atténuation (Tableau 4). Cependant, à partir du rapport présenté, il est difficile de déterminer à quel degré de débat scientifique et de consensus est associée l'élaboration de cette liste réduite. La qualité du débat constitue un atout de l'étude française.

Dans les deux cas, le potentiel d'atténuation technique implicitement pris en compte dans l'applicabilité des mesures est limité par la sélection d'une liste réduite de mesures actuellement admises. La MACC du Royaume-Uni est très différente (Moran et al 2008), car elle étudie non seulement des mesures actuellement applicables mais aussi des mesures qui pourraient être mises en œuvre si elles étaient mieux connues (autrement dit, si d'autres recherches étaient entreprises en vue de confirmer les estimations de leur potentiel d'atténuation) et des mesures qui sont actuellement interdites en raison de barrières juridiques. L'étude du Royaume-Uni porte sur une liste réduite de 30 mesures. Si de telles mesures étaient prises en compte, on augmenterait le potentiel technique hypothétique. Il est important de noter que l'étude d'un plus grand nombre de mesures permet de définir les priorités de recherche qu'il convient d'adopter pour élargir le potentiel d'atténuation dans le secteur de l'agriculture.

La présente étude avait pour objectif de déterminer des actions ne modifiant pas ou peu les systèmes de production et suffisamment renseignées pour en chiffrer le potentiel d'atténuation et le coût. Ce critère aboutit par construction à des propositions relativement "conservatrices", puisque les actions actuellement au stade de la recherche ou dont les effets paraissent encore incertains ont été écartées. Ce choix de techniques suffisamment documentées permet en revanche une instruction approfondie et suffisamment précise du potentiel d'atténuation et du coût des actions retenues.

La sélection d'actions reflète également des choix de société, du fait des critères d'applicabilité de l'action (notamment acceptabilité sociale, réglementation en vigueur...) et d'adéquation avec d'autres objectifs majeurs assignés à l'agriculture : orientation des évolutions de l'agriculture vers des modes de production plus économes en intrants et réduisant ses impacts



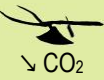







	Actions	Sous-actions
Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés		
 ∨ N ₂ O	① Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O	A. Réduire la dose d'engrais minéral en ajustant mieux l'objectif de rendement B. Mieux substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques C1. Retarder la date du premier apport d'engrais au printemps C2. Utiliser des inhibiteurs de la nitrification C3. Enfourer dans le sol et localiser les engrais
 ∨ N ₂ O	② Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O	A. Accroître la surface en légumineuses à graines en grande culture B. Augmenter et maintenir des légumineuses dans les prairies temporaires
Stocker du carbone dans le sol et la biomasse		
 ∨ CO ₂	③ Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du C dans le sol	3 options techniques : passer au semis direct continu, passer au labour occasionnel, passer au travail superficiel du sol
 ∨ CO ₂ ∨ N ₂ O	④ Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O	A. Développer les cultures intermédiaires semées entre deux cultures de vente dans les systèmes de grande culture B. Introduire des cultures intercalaires en vignes et en vergers C. Introduire des bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou en périphérie de parcelles
 ∨ CO ₂	⑤ Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale	A. Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres B. Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles
 ∨ CO ₂ ∨ N ₂ O	⑥ Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone et réduire les émissions de N₂O	A. Allonger la période de pâturage B. Accroître la durée de vie des prairies temporaires C. Réduire la fertilisation azotée des prairies permanentes et temporaires les plus intensives D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement animal
Modifier la ration des animaux		
 ∨ CH ₄	⑦ Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique	A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations B. Ajouter un additif (nitrate) dans les rations
 ∨ N ₂ O	⑧ Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O	A. Réduire la teneur en protéines des rations des vaches laitières B. Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies
Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile		
 ∨ CH ₄	⑨ Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage	A. Développer la méthanisation B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères
 ∨ CO ₂	⑩ Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂	A. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments d'élevage B. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des serres C. Réduire la consommation d'énergie fossile des engins agricoles

Tableau 3. Actions et sous-actions instruites

sur l'environnement (cf. le plan gouvernemental sur l'agroécologie); réticence de la société française vis-à-vis des options "biotechnologiques" en agriculture. *A contrario*, l'étude anglaise privilégie, pour l'élevage, une logique d'intensification de la production par animal (voir point III.1 dans la section précédente) et le recours à des solutions "technologiques" (transgénèse, modifications de la flore du rumen).

Enfin, le processus de pré-sélection choisi a privilégié une entrée sur les critères biotechniques (potentiel d'atténuation) plutôt qu'économiques (les estimations de coût n'intervenant que lors de l'instruction ultérieure). Ce choix pourrait avoir eu pour effet de présélectionner des actions au potentiel d'atténuation *a priori* élevé (sous réserve de vérification) mais qui s'avèreront coûteuses et, à l'inverse, d'écarter des actions peu coûteuses mais au potentiel d'atténuation faible. Par conséquent, la liste des 10 actions retenues ne peut être considérée comme la liste des actions ayant la meilleure efficacité (rapport coût/atténuation) puisqu'elle a été établie à dire d'experts dans un premier temps, principalement sur des critères de potentiel d'atténuation (et non de coût), donc sous réserve des résultats de leur instruction ultérieure.

Il résulte de la démarche mise en œuvre :

- que cette liste n'intègre pas, du fait du nombre volontairement limité d'actions en faisant partie, l'ensemble des actions permettant de réduire les émissions de GES en agriculture et qui auraient été compatibles avec le cahier des charges de l'étude. Un critère essentiel de sélection des actions a été l'assiette concernée, dont dépend fortement l'atténuation attendue à l'échelle du territoire national, ce qui excluait d'emblée des actions portant sur des filières représentant une surface ou un effectif trop faible à l'échelle du territoire français. Cela ne doit pas disqualifier ces actions qui gardent tout leur intérêt à l'échelle de filières ou de régions particulières.
- que certaines actions prometteuses pour l'avenir peuvent avoir été écartées du fait de l'insuffisance des données actuellement disponibles pour calculer, même approximativement, leur potentiel d'atténuation et le coût associé. Pour autant, ces actions pourraient présenter un potentiel d'atténuation important dès lors que les recherches nécessaires auront été conduites.
- que du fait du périmètre de l'étude et des critères d'éligibilité des actions, certains leviers majeurs de maîtrise des émissions de GES par l'agriculture, se situant en amont ou en aval de l'activité agricole, ou supposant une évolution marquée des systèmes de production agricole, de leur localisation ou de leur niveau de production ne sont pas évoqués (par exemple l'évolution des régimes alimentaires, la ré-association agriculture-élevage dans les territoires, etc.)

Tableau 4. Comparaison des actions retenues dans différentes études

France	Irlande	Royaume-Uni
<p>1. Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O</p> <p>2. Accroître la part des légumineuses en grandes cultures et en prairies temporaires pour réduire les émissions de N₂O</p>	<p>5. Other gains in nitrogen efficiency (incl. use of clover)</p> <p>6. Use of nitrification inhibitors</p>	<p>1. Using biological fixation to provide N inputs (clover)</p> <p>2. Reduce N fertiliser</p> <p>3. Improving land drainage</p> <p>4. Avoiding N excess</p> <p>5. Full allowance of manure N supply</p> <p>6. Species introduction (including legumes)</p> <p>7. Improved timing of mineral fertiliser N application</p> <p>8. Controlled release fertilisers</p> <p>9. Nitrification inhibitors</p> <p>10. Improved timing of slurry and poultry manure application</p> <p>11. Adopting systems less reliant on inputs (nutrients, pesticides etc.)</p> <p>12. Plant varieties with improved N-use efficiency</p> <p>13. Separate slurry applications from fertiliser applications by several days</p>
<p>3. Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol</p> <p>4. Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O</p> <p>5. Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale</p> <p>6. Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone</p>	<p>7. Minimum tillage techniques</p> <p>8. Use of cover crops</p> <p>3. Extended grazing season</p>	<p>14. Reduced tillage / No-till</p>
<p>7. Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique</p> <p>8. Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et réduire les émissions N₂O</p>	<p>1. Accelerated gains in the genetic merit of cows (as measured by the Economic Breeding Index)</p> <p>2. Higher daily weight gain in beef cattle</p>	<p>16. Increasing concentrate in the diet - Dairy</p> <p>17. Increasing maize silage in the diet - Dairy</p> <p>18. Propionate precursors – Dairy</p> <p>19. Probiotics – Dairy</p> <p>20. Ionophores – Dairy</p> <p>21. Bovine somatotropin – Dairy</p> <p>22. Genetic improvement of production - Dairy</p> <p>23. Genetic improvement of fertility - Dairy</p> <p>24. Use of transgenic offsprings – Dairy</p> <p>25. Increasing concentrate in the diet - Beef</p> <p>26. Increasing maize silage in the diet - Beef</p> <p>27. Propionate precursors – Beef</p> <p>28. Probiotics – Beef</p> <p>29. Ionophores – Beef</p> <p>30. Genetic improvement of production - Beef</p>
<p>9. Développer la méthanisation, et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage</p> <p>10. Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂</p>	<p>4. Manure management</p> <p>9. Bio-fuel/bioenergy crops</p> <p>10. Anaerobic digestion of pig slurry</p>	<p>15. Use composts, straw-based manures in preference to slurry</p>

3. Méthodologie d'analyse des actions

Les 10 actions retenues ont fait l'objet d'un travail collectif de formulation de leur objectif, de délimitation de leur périmètre et, le cas échéant, de décomposition en sous-actions correspondant au grain permettant de réaliser les calculs d'atténuation et de coût.

Cette partie présente de manière détaillée la méthodologie appliquée à l'instruction des actions. Le périmètre d'analyse des actions y est précisé (éléments pris en compte dans les calculs d'atténuation et de coûts). La situation de référence par rapport à laquelle les actions sont comparées y est définie. Les méthodes de calcul mises en œuvre sont explicitées (calcul de l'atténuation, du coût, de l'assiette et de la cinétique de diffusion de l'action à l'échelle de la France). Enfin la nature et la source des différentes données mobilisées pour réaliser ces calculs sont présentées.

3.1. Variables calculées et situation de référence

3.1.1. Les variables calculées

Le potentiel d'atténuation et le coût associés aux actions proposées ont été calculés en distinguant plusieurs étapes :

- 1- évaluation du potentiel unitaire d'atténuation des émissions de GES (par animal, par hectare...),
- 2- évaluation du coût unitaire,
- 3- combinaison des valeurs unitaires pour obtenir l'efficacité unitaire de l'action (coût de la tonne de CO₂e évité),
- 4- évaluation de l'assiette (nombre d'unités, animaux, hectares, concernés) et d'un scénario d'atteinte de cette assiette,
- 5- combinaison des valeurs unitaires et de l'assiette pour obtenir une évaluation à l'échelle du territoire national et sur la période 2010-2030.

Pour rendre compte des incertitudes associées aux calculs, des "fourchettes" (valeur basse, valeur haute) sont indiquées pour les principales variables calculées

Ces calculs ont été effectués à l'échelle des sous-actions, puis agrégés par action lorsque les sous-actions sont cumulables.

3.1.2. Situation de référence

3.1.2.1. Emissions de référence et scénario de base

Les potentiels d'atténuation et les coûts associés doivent nécessairement se mesurer relativement à une situation de référence. L'objectif étant ici d'estimer l'atténuation potentielle d'ici à 2030, il convient de se référer à la situation qui aurait prévalu sans incitations ni mesures supplémentaires d'atténuation dirigées vers les émissions du secteur agricole. Deux éléments doivent être distingués à ce niveau : le choix des *émissions de référence* et celui du *scénario de base* (ou « *sans mesures additionnelles* » dans la terminologie de la CCNUCC (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques), c'est-à-dire avant mise en œuvre des actions d'atténuation). Comme on le verra dans cette section, ces deux choix ne sont pas forcément indépendants.

Le choix des émissions de référence relève principalement d'une convention de calcul. Il consiste à déterminer les émissions (notées \hat{E}_t) par rapport auxquelles sont calculés les potentiels d'atténuation sur l'horizon considéré pour chaque année $t = 2010, \dots, 2030$. Les réductions d'émissions sont alors simplement définies comme la différence $\hat{E}_t - E_t$ où E_t représente les émissions à la date t une fois pris en compte l'effet des mesures d'atténuation.

Le choix de la référence en termes d'émissions est parfois source de confusion dans la comparaison des travaux existants. Selon les études en effet, cette référence peut être *statique* ou *dynamique*. Dans le premier cas, les émissions de référence sont simplement fixées à leur niveau observé à une date donnée (par exemple $\hat{E}_t = E_{2010}$). Dans le second, elles peuvent évoluer au cours du temps en fonction des hypothèses qui définissent le scénario de base. Le choix d'une référence dynamique permet de neutraliser l'effet de changements exogènes qui seraient advenus sans mesures additionnelles d'atténuation (par exemple dû à la croissance démographique ou à un progrès technique indépendant des politiques d'atténuation). Dans le cas d'une référence dynamique, l'interprétation des résultats nécessite de connaître les hypothèses sous-tendant le scénario de base. Le choix d'une référence statique permet de s'affranchir de la dépendance des calculs d'atténuation à ces hypothèses.

Le choix du scénario de base a des implications importantes tant pour le calcul des potentiels d'atténuation que pour celui des coûts qui y sont associés. Outre les paramètres sous-tendant le calcul des émissions (variables d'activité et facteurs

d'émission), le calcul des coûts d'atténuation nécessite de disposer des valeurs futures des revenus et des coûts associés aux activités agricoles en l'absence de politique d'atténuation. Cela requiert, en particulier, de mobiliser des trajectoires de prix des produits et des facteurs de production et de productivité. Ces trajectoires doivent résulter de *projections* intégrant l'effet des mesures déjà en place (éventuellement aussi de celui des mesures déjà décidées et dont la mise en œuvre est prévue à une date future) et de paramètres exogènes concernant des variables susceptibles d'évoluer indépendamment de toute mesure additionnelle d'atténuation. De telles projections peuvent être obtenues soit à partir de simulations de modèle économique (par exemple le modèle FAPRI-Ireland dans Schulte et al, 2012), soit à partir d'un jeu d'hypothèses *ad hoc* basées sur des analyses prospectives (McKinsey & Co, 2008 ; Moran et al, 2010). Dans tous les cas, ces projections doivent constituer un tout cohérent assurant notamment la disponibilité des ressources utilisées et la compatibilité entre évolutions des prix et équilibre offre/demande sur l'ensemble des marchés. En outre, les paramètres qu'elles renseignent doivent être disponibles à une échelle, une résolution et un horizon temporel compatibles avec les calculs menés au niveau de chaque action.

3.1.2.2. Projections disponibles

La plupart des exercices de prospective sur les émissions de GES se concentrent principalement sur les émissions de CO₂ des secteurs de l'énergie et des transports (Mathy et al., 2010). Parmi ceux qui examinent explicitement les émissions du secteur agricole, les projections menées par SOLAGRO (2011) et le Centre d'Analyse Stratégique (2012) s'inscrivent dans l'objectif de division par quatre des émissions totales françaises à l'horizon 2050. Outre le fait qu'ils se situent sur un horizon sensiblement plus long que celui qui nous intéresse ici, ces deux exercices ne fournissent pas de projections des données nécessaires au calcul des coûts d'atténuation (notamment prix des produits et des intrants). De plus, l'ampleur des réductions des émissions agricoles françaises examinées implique la mise en œuvre d'instruments de régulation des émissions. Les scénarios examinés ne peuvent donc s'apparenter à un scénario de référence "sans mesures additionnelles".

Les projections fournies par Vert et Portet (2010) se situent à un horizon compatible avec celui de la présente étude (2030). Les quatre scénarios examinés d'évolution du secteur agricole français à l'horizon 2030 sont assez contrastés et résultent de combinaisons de jeux d'hypothèses en fonction du contexte international, des politiques agricoles, des évolutions de la demande, etc. Les conséquences en termes de consommation d'énergie et d'émissions de GES (directes et indirectes) du secteur agricole y sont quantifiées à l'aide de l'outil Climaterre. Néanmoins, là encore, aucun des scénarios examinés ne peut être vraiment interprété comme un scénario « sans mesures additionnelles », chacun combinant différents éléments de rupture peu compatibles avec une projection de type *business-as-usual*.

De Cara, Thomas et al. (2008) et Forslund et al. (2009) utilisent plusieurs scénarios d'évolution, dont un scénario de « référence » qui pourrait s'apparenter plus aisément à un « scénario sans mesures additionnelles ». Les prix agricoles (produits et intrants) sont tirés de simulations d'un modèle d'équilibre général qui intègre l'effet du contexte macro-économique et des politiques agricoles et commerciales indépendamment de politiques d'atténuation. Ils sont ensuite introduits dans un modèle d'offre du secteur agricole qui détermine les variables d'activité et en déduit les émissions du secteur à une résolution régionale. Dans ces deux travaux, les émissions agricoles sont influencées par les modifications dans l'allocation des sols dues aux changements dans le secteur forestier et/ou le développement des cultures dédiées à la production de biomasse énergétique, deux éléments qui ont été délibérément écartés du périmètre de la présente étude. En outre, les hypothèses retenues dans cet exercice datant de 2007-2008, elles n'apparaissent plus vraiment adaptées à la situation présente. Enfin, ces projections ne sont disponibles qu'à l'horizon 2020.

3.1.2.3. Justification et discussion des choix effectués

Le choix fait pour la présente étude a été celui d'une référence statique historique. Tous les potentiels d'atténuation sont ainsi calculés relativement aux émissions de référence pour l'année 2010. Ce choix nous permet de nous référer aux émissions et aux méthodes de calculs des derniers inventaires disponibles publiés par le CITEPA (CITEPA, 2012). En outre, l'année 2010 a l'avantage de n'être pas une année trop "atypique" dans la période récente.

L'établissement d'un jeu de projections correspondant au scénario « sans mesures additionnelles » dépasse le cadre de la présente étude. Aucune des projections disponibles ne remplissant l'ensemble des critères requis (disponibilité et complétude des données à l'horizon et la résolution nécessaire, cohérence d'ensemble, absence de mesures d'atténuation), il a été décidé d'examiner les conséquences des actions d'atténuation à l'aune de la situation prévalant en 2010.

Ce choix a trois avantages principaux. En premier lieu, il permet de s'appuyer sur des données accessibles constituant une base solide et complète pour l'instruction des actions et limitant le nombre d'hypothèses nécessaires. De plus, il assure par construction une cohérence d'ensemble entre les assolements, les volumes de production et de consommation et le système de prix, et donc entre les actions examinées. Enfin, dans un contexte de fortes incertitudes sur les options qui seront retenues en matière de politique agricole, il permet de ne pas ajouter à l'incertitude qui entoure l'effet propre des

mesures d'atténuation à celle inhérente à la construction du scénario de référence. Il facilite ainsi l'interprétation et la communication des résultats.

Ce choix requiert toutefois quelques précautions dans l'interprétation des résultats. Il est clair que le contexte de 2030 – même sans mesures additionnelles d'atténuation – sera différent de celui de 2010. Il faut donc comprendre les potentiels et les coûts d'atténuation contenus dans ce rapport comme l'effet des mesures d'atténuation examinées à *contexte technologique et système de prix constants*.

Compte tenu des évolutions projetées par les exercices mentionnés ci-dessus, il est vraisemblable que ce choix est conservateur en termes de potentiel d'atténuation. Aucun des scénarios identifiés ne projette en effet d'augmentation des émissions du secteur agricole français. Il est donc envisageable que des changements (indépendants de toute politique d'atténuation) dans le contexte technique et économique des exploitations entre 2010 et 2030 contribuent à ce que la baisse effective des émissions soit encore plus marquée entre 2010 et 2030. L'effet sur les coûts et le classement des actions est plus ambigu et devra faire l'objet d'analyses de sensibilité.

3.2. L'estimation du potentiel d'atténuation des émissions des actions

3.2.1. Le périmètre et les émissions prises en compte

Les actions et sous-actions sélectionnées pour faire l'objet d'une instruction approfondie l'ont été au titre d'une atténuation attendue des émissions de GES intervenant sur l'exploitation agricole. La mise en œuvre de cette action ou sous-action est cependant susceptible, du fait d'une modification des intrants utilisés ou des produits issus de l'activité agricole concernée, de modifier les émissions à l'amont et à l'aval de l'exploitation. La question qui se pose alors est celle de la délimitation du système sur lequel vont porter les calculs d'atténuation. Plusieurs démarches d'évaluation des émissions de GES liées à l'activité agricole existent, qui se distinguent surtout par le périmètre du système considéré (GES'TIM, 2010). Deux approches sont classiquement mises en œuvre :

- l'approche de type "source-puits", qui répertorie et quantifie les émissions nettes intervenant physiquement sur un territoire clairement délimité (par exemple une exploitation agricole, ou le territoire national), sans considérer les émissions liés à la fabrication à l'amont ou au devenir à l'aval de biens ou services utilisés ou produits sur ce territoire dès lors que ces émissions ont lieu physiquement à l'extérieur de celui-ci. L'inventaire national des émissions de GES, réalisé par le CITEPA, correspond à ce type d'approche. Les émissions intervenant sur le territoire national sont inventoriées et quantifiées, puis agrégées par grand secteur d'activité, dont l'agriculture.
- l'approche de type "analyse cycle de vie" (ACV), qui évalue les impacts environnementaux (dont la contribution au réchauffement global via l'émission de GES) d'un système à l'origine d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du produit jusqu'à son traitement en fin de vie. Développée pour l'industrie dans les années 70 (Hunt et al., 1974), cette approche a été normalisée (normes ISO 14040 à 14045, 2006), et est utilisée dans le domaine agricole depuis les années 90 (Brentrop et al., 2001). Elle est la méthode de référence pour l'affichage environnemental des produits, destiné à sensibiliser les consommateurs sur les impacts environnementaux des produits qu'ils achètent. Les approches de type "empreinte carbone" s'apparentent à l'ACV, mais en privilégiant l'impact sur le changement climatique (les émissions sont exprimées en équivalent CO₂), contrairement à l'ACV qui est multicritère.

Bien qu'elles puissent être mises en œuvre pour des problématiques communes (par exemple l'analyse des conséquences de l'activité agricole sur les émissions de GES), ces deux approches apportent des réponses à des questions clairement distinctes, puisque le contour des systèmes considérés diffère radicalement. Elles sont complémentaires, mais pas facilement interopérables.

L'approche de type "source-puits" est plus facile à mettre en œuvre dans la mesure où elle s'intéresse aux émissions intervenant sur un périmètre géographique délimité. Elle a été retenue pour beaucoup d'études visant à évaluer les conséquences de scénarios d'évolutions de l'agriculture sur les émissions de GES. Sa limite dans le cadre d'une étude telle que celle mise en œuvre ici est qu'elle ne considère pas les émissions induites à l'amont et/ou l'aval du périmètre défini. Si celui-ci est le territoire national, ou la part de celui-ci dédié à l'activité agricole, cela a du sens dans le cadre d'un objectif de réduction des émissions au sens de l'inventaire national en vue du respect d'engagements internationaux. Se limiter à cette approche devient cependant rapidement contestable si les actions proposées pour réduire les émissions sur le territoire national se traduisent par une augmentation des émissions à d'autres endroits du globe, du fait par exemple de changements induits d'affectation des terres. Une vision plus large est nécessaire dans le contexte de la problématique des gaz à effet de serre et du changement climatique qui sont des problématiques globales par essence.

A l'inverse l'approche de type "analyse cycle de vie" considère l'ensemble des émissions liées à l'élaboration d'un produit ou d'un service quel que soit l'endroit du globe où elles se produisent. Cette vision "filière" plutôt que "territoriale" a cependant l'inconvénient dans l'état actuel de la méthode de mal relier l'impact d'une activité avec le contexte territorial dans laquelle elle est mise en œuvre. Elle se heurte à de nombreuses difficultés théoriques et méthodologiques, liées notamment aux échelles d'espace et de temps considérées et à la délicate question de "l'allocation" des émissions et donc des impacts aux différents produits issus d'une activité. Cette approche fait l'objet d'un effort de recherche actif.

Dans le cadre de cette étude, une analyse de type "source-puits", mise en œuvre aussi pour l'inventaire national des émissions de GES, a été privilégiée. Le périmètre des systèmes considérés, les postes d'émission renseignés et les modalités de calcul des atténuations escomptées ont été choisis de telle sorte qu'il soit possible de se référer aux catégories d'émissions et aux valeurs calculées dans le cadre de l'inventaire.

Ces calculs ont cependant été complétés par des informations sur les modifications importantes des émissions induites à l'amont et à l'aval du système considéré. Sans viser l'exhaustivité et la précision d'une approche de type ACV, ces informations permettent de discuter les limites du chiffrage réalisé selon la méthodologie "source-puits", notamment dans le cas où ces effets induits sont importants.

Dans cette logique, deux types de modifications des émissions ont été distinguées (figure 3, encadré 1, section 2.1.2) :

- les modifications des émissions **intervenant sur le périmètre de l'exploitation agricole** (dites **émissions directes**) et **dans les espaces qui lui sont physiquement liés** (dites **émissions indirectes**). Les émissions directes sont les émissions nettes de N₂O, CH₄ et CO₂ (incluant les émissions de CO₂ liées à l'utilisation d'énergies fossiles sur l'exploitation et les variations de stock de carbone dans les sols et la biomasse) intervenant sur le périmètre de l'exploitation. Les émissions indirectes dans les espaces physiquement liés à l'exploitation agricole sont par exemple les émissions de N₂O intervenant à l'aval des exploitations agricoles (fossés, zones humides...) après lixiviation des ions nitrates (NO₃⁻) ou volatilisation d'ammoniac (NH₃) et transformations ultérieures dans le cadre de la cascade de l'azote (Galloway et al., 2003, 2008). Le regroupement (en les distinguant) de ces deux catégories d'émissions a été fait dans un souci de cohérence avec l'inventaire national, puisque ces deux catégories d'émissions sont comptabilisées dans les émissions agricoles (catégorie 4D).

- celles affectant les émissions **induites à l'amont ou à l'aval de l'exploitation**, du fait de la mise en œuvre de l'action proposée. A l'amont, il s'agit par exemple des émissions de CO₂ liées à l'énergie consommée pour la fabrication des engrais minéraux azotés ou des aliments du bétail achetés. A l'aval, ce sont par exemple les émissions de CO₂ évitées grâce à l'énergie produite sur l'exploitation (cas de la méthanisation) et valorisée à l'extérieur.

Les modifications des émissions directes et indirectes ont été inventoriées et chiffrées le plus précisément possible ; celles induites à l'amont ou à l'aval de l'exploitation ont été inventoriées et chiffrées lorsqu'elles étaient majeures en utilisant des valeurs de référence disponibles dans des bases de données (voir section suivante).

3.2.2. Le mode de calcul du potentiel unitaire

Les étapes de calcul du potentiel d'atténuation unitaire ont été les suivantes :

- l'identification du sous-système de l'exploitation agricole concerné par l'action ou, le plus souvent, la sous-action (surface cultivée, atelier animal, etc.),
- l'inventaire de tous les postes émetteurs de GES qui sont modifiés par l'action ou la sous-action, et les gaz concernés (CO₂, CH₄, N₂O), en les distinguant selon les 2 grandes catégories indiquées dans la section 3.2.1. : émissions intervenant sur l'exploitation agricole (émissions directes) ou dans les espaces qui lui sont physiquement liés (émissions indirectes); émissions induites à l'amont ou à l'aval.

L'unité choisie pour exprimer le potentiel unitaire est adaptée à la nature de l'action (émission par hectare, par animal, par unité de masse d'effluent ou de surface de bâtiment...). Les émissions de N₂O et de CH₄ sont exprimées en "équivalent CO₂" (CO₂e), en tenant compte de leur pouvoir de réchauffement global (PRG).

Pour les émissions correspondant à la première catégorie (**émissions directes et indirectes**), une quantification aussi précise que possible a été faite pour l'ensemble des postes émetteurs modifiés et l'ensemble des gaz (différence entre les émissions avec action et les émissions sans action). Deux calculs ont été effectués :

- un calcul utilisant la méthode, les équations et les paramètres utilisés pour l'inventaire national des émissions 2010 réalisé par le CITEPA, conformément aux lignes directrices du GIEC publiées en 1996. L'intérêt de ce premier calcul est de pouvoir

se référer aux valeurs d'émission de l'inventaire 2010, et resituer les atténuations calculées dans ce cadre, sans que la comparaison soit biaisée par les modalités de calcul. Sa très forte limite est que dans certains cas, les équations mises en œuvre ne permettent pas, par construction, de rendre compte de l'atténuation escomptée de certaines actions (cas des actions portant sur le non-labour, ou l'alimentation animale par exemple) ; Par souci de conformité avec l'inventaire CITEPA, ce calcul a été effectué avec les valeurs de PRG issues du second rapport du GIEC ($PRG_{CH_4} = 21$ et $PRG_{N_2O} = 310$) ;

- un calcul, proposé par les experts ayant instruit l'action (ci-après noté calcul "expert"), correspondant à ce que l'on peut faire de mieux compte tenu de l'état des connaissances et des références disponibles dans la littérature. Dans certains cas, il peut s'agir d'un calcul conforme aux lignes directrices publiées par le GIEC en 2006-2007, ou qui s'en inspire partiellement. Il peut aussi s'agir d'un calcul plus élaboré, basé sur le travail bibliographique réalisé par les experts. L'intérêt de ce deuxième calcul est qu'il permet d'évaluer l'atténuation escomptée liée à la mise en place des actions proposées le plus justement possible en l'état actuel des connaissances. Dans la mesure où les données le permettent, les estimations tiennent compte de la diversité des situations, en distinguant par ex. des classes de prairies sur une base régionale, ou des catégories d'animaux selon leur régime alimentaire. Ce second calcul présente l'intérêt d'évaluer l'atténuation escomptée des actions le plus justement possible, mais rend délicates les comparaisons avec les émissions calculées dans l'inventaire. Ce calcul "expert" a été réalisé avec les valeurs de PRG actualisées en 2006 ($PRG_{CH_4} = 25$ et $PRG_{N_2O} = 298$).

Pour les émissions correspondant à la deuxième catégorie (modifications **d'émissions induites à l'amont et à l'aval**), la quantification n'a été faite que pour les postes d'émissions les plus importants et modifiés de façon majeure, pour lesquels les ordres de grandeur des modifications d'émission impliquées étaient de nature à relativiser les conclusions issues des calculs réalisés sur les seuls postes d'émission correspondant à la première catégorie. Ces modifications induites à l'amont et à l'aval ont été estimées en utilisant des facteurs d'émissions standards liés à des produits ou services, provenant de bases de données de référence. Sauf cas particulier, les bases de référence utilisées ont été la Base Carbone® de l'Ademe pour les données générales (<http://www.basecarbone.fr/>), et la base de données Dia'terre®-Ges'tim pour les données agricoles. Pour ces émissions induites amont aval, il ne s'agit donc ni d'une évaluation exhaustive des postes d'émissions modifiés comme l'exigerait une ACV complète, ni d'une évaluation tenant compte des circuits réels d'approvisionnement des exploitations agricoles ou de transformation des produits puisque seules des valeurs de référence standards ont été utilisées.

Pour les actions donnant lieu à une atténuation des émissions reproductible annuellement (fertilisation, alimentation animale...), le potentiel d'atténuation unitaire a été exprimé en tCO_2e par unité et par an. Pour les actions donnant lieu à une cinétique d'atténuation au cours du temps (actions visant un stockage accru de carbone dans le sol ou la biomasse arborée) la durée relativement courte de la période considérée (20 ans) a permis d'effectuer une approximation linéaire des valeurs d'atténuation. Comme les précédentes, celles-ci ont donc également été exprimées en quantités constantes de CO_2e par unité et par an, ce qui facilite la comparaison entre actions. Bien entendu le caractère pérenne ou non de l'atténuation annuelle calculée au-delà de la période de 20 ans considérée pour cette étude a été indiqué pour chacune des actions.

3.3. L'estimation du coût des actions

3.3.1. Le périmètre et la nature des coûts pris en compte

Pour chaque (sous-)action est calculé la perte ou le gain pour l'agriculteur du fait des modifications techniques qu'il met en œuvre sur son exploitation. Cependant, le développement d'une action nécessite la mise en œuvre de mesures incitatives et réglementaires (réglementation, taxation, subvention...) qui peuvent constituer un coût pour la puissance publique ou des organismes semi-publics, privés ou associatifs (pour les étapes de conception, mise en œuvre, suivi, évaluation), mais aussi pour les agriculteurs eux-mêmes (temps passé pour s'informer, se former, remplir des documents administratifs...). Ces coûts sont appelés coûts de transaction et doivent normalement être inclus dans le coût total d'une politique pour en évaluer l'efficacité. Les premiers constituent des coûts de transaction publics ; ils ne sont pas calculés dans cette étude car ils sont largement fonction de l'instrument incitatif ou réglementaire choisi, dont la détermination ne fait pas l'objet de cette étude ; les seconds correspondent aux coûts de transaction privés ; ils dépendent également de l'instrument incitatif choisi mais dans une moindre mesure ; ils ont été estimés afin de compléter le calcul du coût pour l'agriculteur.

Les coûts (positifs ou négatifs) calculés pour les agriculteurs correspondent à des coûts unitaires **moyens** pour la "ferme France", et non à des coûts marginaux ou coûts d'opportunité de la dernière exploitation mettant en œuvre une action donnée. Ils sont calculés sans ré-optimisation des systèmes de production et sans considérer les répercussions indirectes que pourraient avoir les actions sur le fonctionnement des exploitations, les équilibres macroéconomiques à l'échelle de la France (modification de la ration du cheptel français, réorientation de la production végétale et donc effet sur les rapports de prix des produits agricoles), ou le comportement des agriculteurs (ré-ajustement des pratiques en réponse à la mise en place de l'action et ainsi réduction possible de certains manques à gagner).

3.3.2. Le mode de calcul des coûts unitaires

Par cohérence avec le scénario de base retenu, le système de prix utilisé est considéré comme exogène et correspond aux prix des intrants et extrants de l'année 2010. Pour chaque (sous)-action, les coûts considérés sont la perte ou le gain pour l'agriculteur, et les coûts de transaction privés pour l'agriculteur.

• **La perte ou le gain pour l'agriculteur** est exprimée en euros par an et par hectare de culture, tête de cheptel ou exploitation et considère :

- l'augmentation ou la diminution des charges variables (engrais, pesticides, aliments du bétail, travail, prestations par des tiers...),
- l'augmentation ou la diminution des rendements (lait, viande, culture) et donc des revenus associés,
- les pertes de revenu dues au changement d'activité (substitution de cultures par ex.),
- l'éventuelle création d'un nouveau revenu (rachat par EDF d'électricité produite par ex.),
- les investissements clairement identifiés (achat d'un méthaniseur...).

Cette perte ou ce gain incluent les subventions lorsqu'elles sont indissociables du prix payé ou reçu par l'agriculteur (prix de rachat subventionné de l'électricité produite par méthanisation, subventionné à hauteur de 0.8 €/MWh¹³, mais variant selon les années ; prix des carburants agricoles bénéficiant d'une défiscalisation à hauteur de 42,18 €/hectolitre). Il ne prend pas en compte les droits à paiement unique (DPU), les aides PAC couplées, ni les subventions optionnelles souvent d'origine locale. Le coût, qui permet d'étudier les actions dans le contexte de référence de 2010, est toutefois enrichi par un calcul sans subvention dans les cas où celle-ci modifie les résultats de façon majeure, ce qui permet une comparaison sans prise en compte des incitations déjà en place.

Les calculs diffèrent entre : d'une part les actions "annuelles", pour lesquelles les coûts et les gains se répètent à l'identique chaque année (l'ajustement de la fertilisation, par ex.), et d'autre part les actions nécessitant un investissement initial et ayant des coûts ou des revenus non réguliers ou différés (par exemple l'agroforesterie ou la méthanisation des effluents).

- Pour évaluer les coûts et les gains éventuels associés à la mise en œuvre d'une **action « annuelle »**, les modifications engendrées par celle-ci au niveau de l'exploitation ont été listées, par rapport à la situation ou à la pratique de référence. Après avoir quantifié ces modifications en unités par hectare, tête ou exploitation ($Q_{m,t}$), un prix unitaire leur a été associé (en €/unité) pour calculer le coût de l'action (CA) en € par an et par hectare, tête ou exploitation. Selon que la modification correspond à une dépense ou à un revenu, le prix indiqué est positif ou négatif. Ainsi, si CA est positif l'action coûte de l'argent à l'exploitant, tandis que si CA est négatif elle génère un revenu.

$$CA_t^{unitaire} = \sum_{m=1}^M Q_{m,t} * prix_{m,t}$$

Avec :

- $t \in [0, T]$ le temps et T la durée de l'action (correspondant par exemple à la durée de vie d'un méthaniseur)
- $m \in [0, M]$ les modifications techniques engendrées par l'action

- Dans le cas des **actions nécessitant un investissement initial et ayant des coûts ou des revenus non réguliers ou différés dans le temps**, est calculé la perte ou gain unitaire constant qui, sur la durée de l'action, serait équivalent pour l'agriculteur (annuité constante équivalente). Dans un premier temps est calculée la valeur actuelle nette associée à l'action (VANA), ce qui permet d'obtenir l'annuité constante équivalente sur la durée de l'action (ACEA), qu'il est possible de comparer aux coûts unitaires d'autres actions.

Ce calcul nécessite l'utilisation d'un taux d'actualisation dont le choix est difficile et controversé compte tenu de la stagnation de la croissance qui semble durable. Le taux retenu est celui de 4%, proposé par le Centre d'analyse stratégique (devenu Commissariat général à la stratégie et à la prospective) et mentionné par le Commissariat général au développement durable (CGDD).

$$VANA = \sum_{t=0}^T \frac{\sum_{m=1}^M Q_{m,t} * prix_{m,t}}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{CA_t^{unitaire}}{(1+i)^t}$$

Avec :

- $t \in [0, T]$ le temps et T la durée de l'action (correspondant par exemple à la durée de vie d'un méthaniseur)
- $m \in [0, M]$ les modifications techniques engendrées par l'action
- i le taux d'actualisation

¹³ Le tarif de rachat en 2010 était de 0.13 €/kWh alors que le "prix de gros" était d'environ 0.05 €/kWh.

$$ACEA = VANA * \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^T}}$$

• **Les coûts de transaction privés** pour l'agriculteur (CTP) correspondent en général au temps passé pour la mise en œuvre de la mesure (recherche d'informations, documents administratifs à remplir...). En raison des effets d'apprentissage, ces coûts tendent à diminuer au fil du temps, les exploitants agricoles tirant parti des expériences antérieures similaires (Dupraz et al. 2003, Ducos et al. 2009). Une approximation de ces coûts a été obtenue en adaptant des résultats d'une étude proposant une formule d'estimation basée sur la mise en œuvre des mesures agro-environnementales.

Le tableau 5 détaille les principaux postes de coûts de transaction tout au long de la vie d'une mesure agri-environnementale (MAE). Selon les opérations administratives concernées, ces coûts sont fixes ou variables avec le nombre de contractants pour les organismes administrateurs ou avec le nombre d'unité sous contrat au niveau des exploitations agricoles.

Tableau 5. Catégories de coûts de transaction des MAE (adapté de Falconer et al., 2001)

Catégories principales	Sous-catégories : opérations administratives	Coûts des organismes administrant les MAE		Coûts au niveau de l'exploitation agricole	
		Coûts fixes par mesure	Coûts variables avec le nombre de participants	Coûts fixes par mesure	Coûts variables avec le nombre d'unités sous contrats (ha, UGB, etc.)
Information	- analyse de l'objet et de la cible de la mesure dans son contexte géographique	√			
Elaboration	- élaboration du cahier des charges et définition de l'éligibilité - tests et finalisation de la mesure	√ √			
Mise en oeuvre	- promotion de la mesure auprès des agriculteurs éligible - instruction et négociation des contrats, renégociations et avenants - administration des contrats: suivi et paiements,	√	√ √ √	√ √ √	√
Contrôle et sanction	- vérification de la conformité des documents contractuels et inspections sur place		√	√	√
Evaluation	- suivi environnemental et financier, évaluation	√			

Dans cette étude les CTP ont été estimés pour chaque sous-action à l'aide d'un modèle issu du projet européen ITAES (Integrated Tools to design and implement Agro-Environmental Schemes), visant à améliorer l'élaboration et la mise en œuvre des mesures agro-environnementales (MAE). Ce projet a mesuré directement les coûts de transaction chez les agriculteurs ayant adopté une MAE, et indirectement au travers de l'analyse de l'adoption de ces mesures. Il a mis en évidence le poids des CTP dans le coût total du respect des mesures adoptées, et l'importance de leur anticipation par l'agriculteur dans la décision de ne pas adopter une MAE. Nous avons estimé les CTP des sous-actions comme si elles étaient mises en œuvre via une MAE. Néanmoins, quelle que soit la modalité de mise en œuvre, il y a toujours des CTP.

Le modèle élaboré pour estimer les CTP tient compte du niveau de formation générale du chef d'exploitation et de la taille de la production brute standard (PBS) concernée par la mesure ; les CTP diminuent quand le niveau de formation et la taille de la PBS augmentent. Ce modèle a été employé pour estimer le CTP moyen sur l'ensemble des exploitations puis par unité d'assiette, pour chaque sous-action. Les données de la base RICA 2010 (micro-données en ligne) ont été utilisées pour sélectionner les exploitations présentant des caractéristiques pertinentes pour l'action et calculer la PBS concernée par cette dernière. Cette méthode fournit une approximation grossière des CTP, tous les critères de sélection des exploitations n'étant pas renseignés dans le RICA d'une part, et toutes les actions n'appartenant pas au domaine de validation de la formule d'autre part. Il est toutefois intéressant de les prendre en compte, car ils peuvent être décisifs dans l'adoption, ou non, de certaines actions.

Nous avons utilisé la formule ci-dessous, adaptée des résultats du projet européen ITAES (FP6), pour approximer les coûts de transaction privés des actions. Elle intègre à la fois les coûts de transaction fixes et variables. Pour l'utiliser, il suffit d'exprimer l'ampleur de l'action en PBS2007, en utilisant le tableau joint en annexe fourni par le Ministère de l'agriculture. Ensuite les euros 2005 peuvent être convertis en euros 2010. Cette formule ne fournira bien sûr qu'une approximation très grossière des coûts de transaction privés.

In (coût de transaction par € de PBS2007 en euros 2005) = Avec :
• In : logarithme népérien

5,903 - 1,1*(dummy études supérieures au bac) - 1,033*ln(taille de la production en € de PBS2007 concernée par la mesure).

- PBS2007 : production brute standard (règlement (CE) N°1242 /2008 du 8 décembre 2008)
- 5,903 : constante ajustée pour le cas français représenté par la Basse-Normandie (Arnaud et Dupraz, 2006)

En annexes sont données la description détaillée des coûts de transactions, de leurs composantes et déterminants (annexe 5), et la méthode sur laquelle se base la formule de calcul que nous utilisons ci-dessus (annexe 6).

3.4. L'estimation du potentiel de diffusion des actions à l'échelle de la France et à l'horizon 2030

3.4.1. La détermination de l'assiette de l'action

Concernant l'assiette, deux grandeurs sont distinguées :

- **l'assiette théorique (AT)**, correspondant à l'assiette sur laquelle l'action peut être appliquée si l'on ne tient pas compte d'éventuels obstacles techniques pouvant s'y opposer. Par exemple pour une action sur l'alimentation des ruminants, l'assiette théorique est l'effectif total des cheptels de ruminants ; pour une action sur le non-labour, l'assiette théorique va être la totalité de la surface cultivée labourée ;

- **l'assiette maximale technique (AMT)**, inférieure à la précédente, sur laquelle l'action peut effectivement mise en œuvre dans des conditions techniquement acceptables, ni effet secondaire défavorable. Pour une action portant sur l'alimentation animale, l'assiette maximale technique va être par exemple limitée à certaines catégories d'animaux dont le régime alimentaire permet la mise en œuvre de l'action proposée dans des conditions techniquement acceptable par l'éleveur. Pour une action sur le non-labour ces différentes restrictions conduisent à soustraire de l'assiette du semis direct certains types de culture ou de sol : les plantes sarclées (qui nécessitent un travail du sol) et les sols hydromorphes (dont les émissions de N₂O augmentent en non-labour).

Autant que faire se peut, l'assiette maximale technique a été déterminée en faisant intervenir des critères uniquement techniques. Il ne s'agit pas d'une prévision de ce que sera la diffusion de l'action, dont on sait qu'elle dépendra de nombreux facteurs (contexte économique, résistance au changement des acteurs, etc.), mais d'un objectif qu'on considère atteignable d'un point de vue technique, dont on a chiffré le potentiel d'atténuation qu'il représenterait s'il était atteint et le coût pour l'atteindre. Pour certaines actions dont on sait que la diffusion sera forcément lente et ne permettra pas d'atteindre l'assiette maximale technique en 2030 (ex l'agroforesterie), l'estimation de l'AMT a été complétée par une (ou plusieurs) hypothèse(s) sur le pourcentage de cette AMT pouvant être raisonnablement atteint en 2030. (cf. infra).

3.4.2. Le scénario de diffusion de l'action

Le développement de l'action à l'échelle de la France s'apparente au phénomène de diffusion d'une innovation, dont il est montré par des travaux sur le secteur agricole que la vitesse, d'abord lente, augmente ensuite rapidement avant de ralentir et de s'annuler lorsque la diffusion est maximale (courbe sigmoïde). Le choix pour chaque (sous-)action d'un scénario de diffusion selon cette cinétique revient à déterminer quatre caractéristiques (Figure 11) :

- la situation de référence en 2010 (action X déjà mise en œuvre sur une partie de l'assiette, actions Y et Z marginales en 2010) ;
- le pourcentage de l'AMT pouvant raisonnablement être atteint en 2030 (action Z atteignant 60% de l'AMT en 2030) ;
- le moment où l'action commence effectivement à se développer (démarrage de la diffusion dès 2010 pour les actions X et Y, en 2018 pour Z) ;
- le moment où l'action atteint son maximum de diffusion (maximum atteint en 2030 pour les actions X et Y, dès 2028 pour Z).

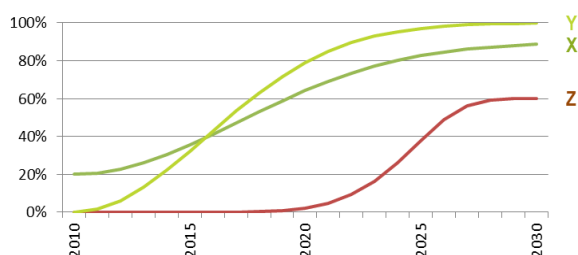


Figure 11. Différents scénarios de diffusion (sigmoïdes), atteignant ou non l'AMT en 2030

Ces caractéristiques de la diffusion sont définies, à dire d'expert, en tenant compte des nombreux facteurs susceptibles de ralentir, limiter ou différer l'adoption de la sous-action : un contexte économique défavorable, la non-disponibilité des équipements, la réticence face à un engagement à long terme (agroforesterie), des difficultés organisationnelles induites par

l'action sur l'exploitation, l'insuffisance de trésorerie limitant les investissements, des problèmes d'acceptabilité pour les citoyens ou les consommateurs (action exclue par certains labels)...

La construction de ce scénario de diffusion de l'action n'a pas pour objectif de réaliser une prévision, mais d'effectuer des calculs dans le cadre d'hypothèses aussi réalistes que possible. Toutefois, afin de déterminer un "potentiel" d'atténuation, les hypothèses de diffusion de l'action retenues sont intentionnellement plutôt "optimistes".

3.5. Données mobilisées pour réaliser les calculs

Les besoins de données associés aux trois principaux calculs à effectuer sont les suivants.

Les calculs d'atténuation unitaire des émissions nécessitent de connaître les pratiques culturales et de gestion des troupeaux, les coefficients d'émission et les équations de calculs utilisés par le CITEPA ou issus de la littérature, les émissions induites par les actions en amont/aval de l'exploitation agricole pour compléter le calcul en mode "source-puits".

Les calculs de coût unitaire des actions nécessitent de connaître les prix des intrants et des productions agricoles, les rendements animaux et végétaux, les marges à l'hectare de certaines productions agricoles (différence entre les recettes et les dépenses pour un hectare de production donnée), les coûts des interventions (main-d'œuvre, engins agricoles), le prix, la durée de vie et les coûts d'entretien des matériels spécifiques dans lesquels les exploitations doivent investir pour certaines actions.

Les calculs d'assiette nécessitent des données sur les surfaces des différentes productions végétales, la proportion des surfaces cultivées ayant des caractéristiques pédologiques compatibles avec les actions étudiées, les effectifs animaux, le nombre des exploitations agricoles ayant des caractéristiques pertinentes pour les actions étudiées.

Les sources de données nécessaires doivent être disponibles (existence et accessibilité) à l'échelle de la France métropolitaine (avec éventuellement une déclinaison régionale ou départementale) pour l'année de référence (2010), être homogènes entre les actions et cohérentes entre elles.

Les principales sources de données communes à toutes les actions sont :

- la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010,
- le Réseau d'information comptable agricole (RICA¹⁴) 2010. L'échantillon RICA est représentatif des grandes et moyennes exploitations agricoles ; il couvre 64% du nombre des exploitations agricoles, mais 93% de la superficie agricole (SAU) et 97% du potentiel productif (PBS).

La SAA ne contient aucune information sur les exploitations agricoles, ni sur la répartition des surfaces et effectifs animaux au sein des différentes catégories d'exploitations, contrairement au RICA. A chaque fois qu'une action ne concernait que les effectifs (surfaces ou animaux) d'un certain type d'exploitation, le pourcentage des effectifs nationaux correspondant a été déterminé à partir des données du RICA 2010, puis appliqué aux effectifs de la SAA.

Ni le RICA ni la SAA ne précisent les **pratiques culturales** (doses, fréquences et formes d'apport d'engrais azotés, par ex.) ou les **pratiques d'élevage** (rations distribuées aux animaux, modes de gestion des effluents...). Les experts ont utilisé l'enquête "Pratiques Culturales" (réalisée par les services statistiques du ministère de l'agriculture) de 2006 (les données de l'enquête 2011 n'étant pas encore disponibles lors de la réalisation de l'étude). Concernant les pratiques d'élevage, les experts se sont souvent basés sur l'expertise des Instituts techniques : utilisation de la typologie des rations des vaches laitières de l'Institut de l'Élevage, des données sur les systèmes d'alimentation porcins de l'Institut du Porc, de l'enquête "Bâtiments d'élevage" du ministère en charge de l'Agriculture pour le mode de gestion des effluents... De même des données sur les caractéristiques pédologiques des sols ont été utilisées pour déterminer certaines assiettes maximales techniques: Base de données géographiques des sols de France au 1/1 000 000 (BDGSF), et cartographie européenne d'occupation biophysique des terres (Corine Land Cover).

Pour les **émissions de GES** prises comme référence dans les calculs, les experts ont utilisé l'inventaire CITEPA pour l'année 2010 (paru en 2012), pour la France métropolitaine.

Concernant les **coûts**, le RICA contient des informations économiques, par exemple sur les volumes produits en quantité et en valeur, qui ont permis de calculer les prix 2010 pour les productions animales et végétales, et d'estimer les marges des

¹⁴ L'échantillon RICA est constitué par sélection d'exploitations agricoles dont la Production Brute Standard est supérieure ou égale à 25 000 euros. Le RICA est ainsi représentatif des grandes et moyennes exploitations agricoles, grâce à un coefficient d'extrapolation appliqué à chacune des observations. Il couvre 64% du nombre des exploitations agricoles, 93% de la superficie agricole (SAU) et 97% du potentiel productif (PBS).

principales cultures. Ont aussi été utilisés, plus ponctuellement : la base de données Eurostat pour le prix des engrais azotés, ou les barèmes d'entraide CUMA pour les coûts des opérations culturales (labour, épandage d'engrais...).

Les éléments de justification du choix des sources utilisées pour chaque type de donnée sont explicités ci-dessous pour chacun des calculs.

- **Assiette :**

- La source de données retenue pour les surfaces cultivées et les effectifs animaux de référence est la SAA 2010¹⁵. Certaines catégories de productions végétales et animales sont plus fines que celles du RICA. Par exemple, la surface en blé tendre est distinguée entre culture d'hiver et culture de printemps. Les émissions nationales de référence de gaz à effet de serre pour l'année 2010 (ligne de base) ont été calculées à partir de ces données, ce qui nous permet de mettre en perspective l'impact des actions retenues.

- La SAA ne contient toutefois aucune information sur les exploitations agricoles, ni sur la répartition des surfaces et effectifs au sein des différentes catégories d'exploitations, contrairement au RICA. A chaque fois qu'une action ne concernait que les effectifs (surfaces ou animaux) d'un certain type d'exploitation, nous nous sommes référés au RICA 2010 pour déterminer le pourcentage des effectifs nationaux correspondant, que nous avons ensuite appliqué aux effectifs de la SAA.

- **Atténuation unitaire :**

- Ni le RICA, ni la SAA ne fournissent de détails sur les pratiques culturales, comme par exemple les doses, fréquences et formes d'apport d'engrais azotés. Nous avons donc eu recours à l'Enquête sur les Pratiques Culturales 2006, l'enquête 2010 n'étant pas encore disponible quand nous avons effectué notre demande auprès du Comité du Secret. Si certaines actions nécessitaient par exemple de savoir quelle surface de telle culture était concernée par une pratique donnée au niveau national, nous avons appliqué le pourcentage calculé à partir de l'EPC 2006 à la surface de la culture dans la SAA 2010. Ceci revient à faire l'hypothèse que la répartition des pratiques en 2006 et en 2010 était la même.

- De même, nous ne disposons pas d'informations sur le mode de gestion des troupeaux dans le RICA, par exemple pour les rations ou la gestion des effluents en fonction des bâtiments. Dans la plupart des cas, nous nous sommes basés sur l'expertise des Instituts techniques. Ainsi, les rations de références des vaches laitières sont basées sur les 15 rations typées par sous-Otex par l'Institut de l'Élevage (IDELE) et ont été recalculées pour obtenir des rations annuelles cohérentes¹⁶. Le temps passé en bâtiment ou à l'extérieur a été déduit de ces rations. Nous avons appliqué la clé de répartition IDELE à nos effectifs de vaches laitières de la SAA. Concernant les bâtiments et le mode de gestion des effluents, nous avons utilisé la clé de répartition CITEPA 2010. Les données sur les systèmes d'alimentation porcins sont issues de l'Institut du Porc (IFIP).

- Pour le calcul des émissions de GES, nous avons utilisé l'inventaire CITEPA 2012 pour l'année 2010, pour la France métropolitaine. Les effectifs 1990-2010 ont été retravaillés à partir des données statistiques de la SAA. Les systèmes de gestion des déjections 1990-2010 sont estimés par le CITEPA sur la base des enquêtes bâtiments et de données complémentaires issues de l'IDELE notamment. Les facteurs d'excrétions 1990-2010 sont calculés par le CITEPA sur la base des documents CORPEN. Les facteurs d'émissions 1990-2010 liés à la fermentation entérique sont issus des travaux de 2008 de Vermorel. La description plus détaillée des méthodes de calcul est disponible dans OMINEA 9ème édition.

- Il avait été initialement prévu d'utiliser les données du RICA pour le calcul des assiettes. Cela devait assurer, en effet, la cohérence avec les estimations des émissions de GES initialement basées elles-mêmes sur le RICA. L'objectif était alors d'évaluer des émissions au niveau de chaque exploitation agricole pour obtenir des dispersions d'émission de GES au niveau individuel. L'accès tardif aux données du RICA via le CASD a nécessité le report de ce calcul, devenu incompatible avec les contraintes calendaires de cette étude. Le calcul de ces émissions a donc été basé sur les données de la SAA, de même que les autres travaux des experts.

- **Coût unitaire :**

- Le RICA contient des informations économiques, par exemple sur les volumes produits en quantité et en valeur, ce qui a permis de calculer les prix 2010 pour les productions animales et végétales, et d'estimer les marges¹⁷ des principales cultures. Nous avons utilisé les rendements du RICA par souci de cohérence avec les données économiques.

¹⁵ L'essentiel des données utilisées ont été extraites du site AGRESTE en avril 2012. Des données complémentaires (prairies, vignes et vergers) ont été extraites en octobre 2012 après mise à jour des bases AGRESTE.

<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>

¹⁶ Cf annexe ? pour plus de détail. Institut de l'élevage, 2012, Alimentation des bovins : rations moyennes et autonomie alimentaire

¹⁷ La méthode d'estimation des marges est détaillée en annexe du rapport.

- Le RICA ne fournit pas de prix de l'azote minéral ; nous avons donc utilisé celles de la base de données EUROSTAT¹⁸. Ces données sont des moyennes annuelles, pondérées par mois. Selon l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA), une part prépondérante de l'azote est utilisée sous forme de nitrate d'ammonium¹⁹. Les données d'Eurostat conduisent à estimer, pour 2010, le prix de l'azote à 85 euros les 100 kg. Ce prix est dans la moyenne des périodes récentes (65 en 2002, 125 en 2008).

- Les coûts des interventions (i.e. labour, épandage d'engrais, etc.) proviennent des barèmes d'entraide CUMA 2010-2011 et incluent le coût de la main-d'œuvre et le carburant.

- Nous avons enfin utilisé un taux d'actualisation de 4%, proposé par le CAS²⁰ et mentionné par le CGDD²¹

Les tableaux contenant les données transversales entre les actions sont fournis en annexe 7.

Le traitement des données via le CASD a été réalisé par Nathalie Delame et Jean-Baptiste Duclos (UMR d'économie publique) avec la contribution d'Elisabeth Samson et Sylvain Cariou (SMART).

Type de calcul	Besoins en données	Sources
Calculs d'atténuation	Pratiques culturales (fertilisation, travail du sol...)	Enquête "Pratiques culturales" 2006
	Rations alimentaires des animaux	Références des instituts techniques : Institut de l'élevage (IDELE), Institut du porc (IFIP)
	Equations et facteurs d'émission utilisés dans l'inventaire	CITEPA 2012
	Emissions induites amont/aval	Base Carbone® (ADEME) Dia'terre®-Ges'tim (Instituts techniques)
Calculs de coûts	Prix des productions végétales et animales	RICA 2010
	Prix des engrais	Eurostat
	Marges économiques	Réseau d'information comptable agricole (RICA) 2010
	Coût des interventions culturales (labour...)	Barème d'entraide CUMA 2010-2011
Calculs d'assiette	Superficies des productions végétales	Statistique agricole annuelle (SAA) 2010
	Effectifs animaux	
	Rendements	RICA 2010
	Caractéristiques et modes d'occupation des sols	Base de données géographiques des sols de France au 1/1 000 000 (BDGSF), et cartographie européenne d'occupation biophysique des terres (<i>Corine Land Cover</i>)

Tableau 3. Les sources de données utilisées par type de calcul

3.6. Le potentiel d'atténuation, du coût et de l'efficacité des actions

Les estimations précédentes, du potentiel d'atténuation et du coût unitaires, de l'assiette maximale technique et de la cinétique de diffusion, permettent d'évaluer le potentiel d'atténuation et le coût de mise en œuvre de l'action à l'échelle de la France sur la période 2010-2030, puis de déterminer son efficacité.

Le potentiel d'atténuation en 2030 d'une action est obtenu en multipliant son potentiel unitaire par l'assiette atteinte en 2030. Son potentiel cumulé sur la période 2010-2030 est la somme des atténuations annuelles, calculées en multipliant l'atténuation unitaire par la portion annuelle d'assiette convertie. L'atténuation est calculée avec la méthode du CITEPA, puis avec la méthode "expert", puis cette dernière est complétée avec les effets induits.

Le coût total annuel en 2030 d'une action est obtenu, de même, en multipliant son coût unitaire annuel par son assiette nationale pour l'année considérée. Son coût cumulé sur la période 2010-2030 est la somme des coûts annuels et tient donc

¹⁸ En France, l'INSEE recueille le prix des engrais pour la construction de l'IPAMPA (indices du prix d'achat des moyens de production agricoles). Les valeurs absolues ne sont pas publiées par l'INSEE. Elles sont par contre transmises à Eurostat qui les publie.

¹⁹ UNIFA 2011, Evolution des bilans régionaux de fertilisation en France de 1988 à 2010

²⁰ Centre d'analyse stratégique (2005), « Révision du taux d'actualisation des investissements publics », Rapport du groupe d'experts présidé par D. Lebègue

²¹ Notamment Études & documents n°42, Mai 2011, « Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat », Hardelin et Marical. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED42.pdf>

compte de la cinétique de diffusion. Il s'agit du coût pour "l'agriculteur" en l'absence d'aides publiques nouvelles, et sans prise en compte des coûts de transaction privés dont l'importance est discutée en Partie III.

Le coût, pour l'agriculteur, de la tonne de CO₂ évité permet une comparaison entre les actions, mais aussi avec le cours sur le marché du carbone. Compte tenu des multiples options de calcul possibles (calcul CITEPA ou "expert", avec ou sans les émissions induites, avec ou sans les coûts de transactions privés...) des choix ont été nécessaires pour permettre la comparaison entre actions. Le coût par tonne de CO₂ évité a été calculé avec la méthode "expert", hors émissions induites, hors coûts de transaction privés. L'effet de différentes modalités de calcul est cependant discuté.

Ces variables sont calculées par sous-action, puis déterminées à l'échelle de l'action lorsque les différentes sous-actions sont effectivement cumulables, en tenant compte des éventuelles interactions entre elles. Cette addition des effets et des coûts n'est en revanche pas réalisable entre plusieurs options techniques (non cumulables par définition).

Les deux variables classiquement retenues pour comparer les actions sont le potentiel d'atténuation annuel et le coût de la tonne de CO₂ évité ; un graphe représentant, pour chaque action, le potentiel d'atténuation (en abscisse) et le coût de la tonne de CO₂ évité (en ordonnée), permet alors de visualiser de manière synthétique les efficacités comparées.

3.7. La mise en perspective des résultats

L'objectif de ce dernier volet de l'analyse est de resituer et de mettre en perspective les résultats, en rappelant les "limites" de l'exercice, à ne pas oublier lors de l'interprétation des données quantitatives, et en mentionnant les éléments complémentaires qui interviendront dans la mise en œuvre de l'action.

La sensibilité des résultats aux hypothèses. Les estimations chiffrées étant tributaires des conditions considérées et des hypothèses retenues pour effectuer les calculs, il est important d'évaluer l'impact de ces choix, qui sont à l'origine des disparités des résultats voire des controverses à propos de l'intérêt que peut présenter une action. Cette "sensibilité" des résultats aux hypothèses a été explorée en effectuant les calculs avec des valeurs basse et haute pour certaines variables (émissions unitaires, niveaux de prix, assiettes...), ou en testant plus ponctuellement l'impact de la valeur retenue pour certains paramètres.

Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national. Cette comptabilisation de l'action nécessite d'abord que la méthode utilisée pour établir l'inventaire national comporte les règles de calcul et paramètres (facteurs d'émission...) permettant de prendre en compte et quantifier les effets de l'action. Mais la revendication de l'action par le pays suppose également la vérifiabilité de la mise en œuvre : celle-ci doit pouvoir être établie d'après une source de données fiable (statistiques officielles, déclarations PAC....) et être contrôlée/ contrôlable sur le terrain (contrôle des assolements par images satellitaires).

Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action. Si le cahier des charges de l'étude excluait l'élaboration de propositions de mesures, réglementaires ou incitatives, destinées à accroître l'adoption de l'action, il est intéressant de mentionner les contextes, économiques notamment (évolution des prix des intrants ou des productions...), ainsi que les politiques et mesures existantes (plans d'action environnementaux, mesures de la PAC...) susceptibles de favoriser cette adoption.

Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique. Ces caractéristiques sont également susceptibles de jouer, à plus ou moins long terme, sur l'intérêt et l'applicabilité des actions.

Les autres effets de l'action, hors GES. Ces autres impacts, environnementaux notamment, peuvent aussi renforcer l'intérêt d'une action (et contribuer à son financement), ou au contraire le relativiser.

Les "fiches" qui suivent (Partie II) présentent : l'action et les mécanismes qu'elle met en jeu, les hypothèses, règles de calcul et données retenues pour effectuer les estimations d'atténuation et de coût, les principaux résultats et des éléments de discussion.

Références bibliographiques citées

- Arnaud S., Dupraz P. (2006). Enquête sur les contrats agro-environnementaux des agriculteurs de Basse-Normandie : Premiers résultats. Rapport du projet FP6 – ITAES, INRA ESR Rennes de Janvier 2006. 23p.
- Bellarby, J., Tirado R., Adrian Leip, Franz Weiss, Jan Peter Lesschen, Pete Smith (2012) Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe, *Global Change Biology* DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02786.x
- Breen, J. (2008), 'Simulating a Market for Tradable Greenhouse Gas Emissions Permits amongst Irish Farmers' The 82nd Annual Conference of the Agricultural Economics Society conference', Dublin, Ireland.
- Brentrup F., Kusters J., Kuhlmann H., Lammel J. (2001). Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. *European Journal of Agronomy*
- Centre d'Analyse Stratégique, (2012). Trajectoires 2020–2050 vers une économie sobre en carbone. La Documentation française, Paris, France.
- CITEPA (2012). Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. CITEPA - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, France.
- CITEPA, édition de mars 2012, 'Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques', CITEPA - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, France. 1364 p.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2000), 'Emissions of greenhouse gases from agriculture: The heterogeneity of abatement costs in France', *European Review of Agricultural Economics* 27(3), 281–303.
- De Cara, S.; Houzé, M. & Jayet, P.-A. (2005), 'Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: A spatial assessment of sources and abatement costs', *Environmental and Resource Economics* 32(4), 551–583.
- De Cara, S. & Thomas, A. (coord.) (2008). Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020. INRA - Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Grignon, France, 194 p.
- De Cara, S. & Jayet, P.-A. (2011), 'Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost-effectiveness, and the EU non-ETS Burden Sharing Agreement', *Ecological Economics* 70(9), 1680–1690.
- Ducos, G., Dupraz P., Bonnieux F. (2009) Agri-environment contract adoption under fixed and variable compliance costs. *Journal of environmental planning and management*.
- Dupraz P., Vermersch D., De Frahan BH., Delvaux, L. (2003). The environmental supply of farm households - A flexible willingness to accept model. *Environmental and resource economics*.
- Durandeau, S.; Gabrielle, B.; Godard, C.; Jayet, P. & Le Bas, C. (2010), 'Coupling biophysical and micro-economic models to assess the effect of mitigation measures on greenhouse gas emissions from agriculture', *Climatic Change* 98(1–2), 51–73.
- Eagle, A. Lydia P. Olander (2012) Greenhouse Gas Mitigation with Agricultural Land Management Activities in the United States—A Side-by-Side Comparison of Biophysical Potential
<http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/land/greenhouse-gas-mitigation-with-agricultural-land-management-activities-in-the-united-states2014a-side-by-side-comparison-of-biophysical-potential>
- Eggleston, H.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. & Tanabe, K., ed. (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IGES, Japan.
- Forslund, A.; Colin, A.; De Cara, S.; Leban, J.-M.; Martin, M.; Mathias, E.; Guyomard, H. & Stengel, P. (2009). Projections d'émissions et d'absorptions de gaz à effet de serre du secteur Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt (UTCF) à l'horizon 2020 en France. Rapport final, INRA-IFN-CITEPA, Paris, France, 142 p.
- Galloway JN., Aber JD., Erisman JW., Seitzinger SP., Howarth RW., Cowling EB., Cosby BJ. (2003). The nitrogen cascade. *BIOSCIENCE*
- Galloway JN., Townsend AR., Erisman JW., Bekunda M., Cai Z., Freney JR., Martinelli LA., Seitzinger SP., Sutton MA. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions
- GES'TIM (2010). Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. Réalisé dans le cadre du projet «Gaz à Effet de Serre et Stockage de Carbone en exploitations agricoles» (CASDAR n°6147)
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.
- Golub, A.; Hertel, T.; Lee, H.-L.; Rose, S. & Sohngen, B. (2009), 'The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry', *Resource and Energy Economics* 31(4), 299–319.
- Houghton, J.; Filho, L. M.; Lim, B.; Treanton, K.; Mamaty, I.; Bonduki, Y.; Griggs, D. & Callender, B., ed. (1996), Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, Vol. 3, UK Meteorological Office, Bracknell, UK.
- Hunt, R.G., Franklin, W.E., Welch, R.O., Cross, J.A., Woodal, A.E., 1974. Resource and environmental analysis of nine beverage container alternatives. Midwest Research Institute for US EPA, 1974.
- Lengers, B. & Britz, W. (2012), 'The choice of emission indicators in environmental policy design: an analysis of GHG abatement in different dairy farms based on a bio-economic model approach', *Review of Agricultural and Environmental Studies* 93(2), 117–144.
- Lewandrowski, J., M. Peters, C.A. Jones, R. House, M. Sperow, M. Eve, and K.H. Paustian. 2004. Economics of sequestering carbon in the U.S. agricultural sector (Full Report). Technical Bulletin. No. 1909, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, D.C.
- Lydia P. Olander, Alison J. Eagle, Justin S. Baker, Karen Haugen-Kozyra, Brian C. Murray, Alexandra Kravchenko, Lucy R. Henry, and Robert B. Jackson (2011) Assessing Greenhouse Gas Mitigation Opportunities and Implementation Strategies for Agricultural Land Management in the United States, Durham, NC: Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University.
- Mathy, S.; Bibas, R. & Fink, M. (2010). Scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour la France. Rapport final, CIRED-Réseau Action Climat - France, Paris, France, 117 pp.

- MacLeod, M.; Moran, D.; Eory, V.; Rees, R.; Barnes, A.; Topp, C. F.; Ball, B.; Hoad, S.; Wall, E.; McVittie, A.; Pajot, G.; Matthews, R.; Smith, P. & Moxey, A. (2010), 'Developing greenhouse gas marginal abatement cost curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK', *Agricultural Systems* 103(4), 198--209.
- McCarl B. and U. Schneider, "Greenhouse Gas Mitigation in U.S. Agriculture and Forestry," *Science* 294, no. 5551 (2001): 2481--2482
- McKinsey & Co (2009), 'Pathways to a low-carbon economy.', Technical report, McKinsey & Co., 192 pp.
- Moran et al (2008) UK marginal cost curves for the agriculture, forestry, land-use and land-use change sector out to 2022 and to provide scenario analysis for possible abatement options out to 2050 – RMP4950 Report to The Committee on Climate Change & Defra <http://hmccc.s3.amazonaws.com/pdfs/SAC-CCC;%20UK%20MACC%20for%20ALULUCF;%20Final%20Report%202008-11.pdf>
- Moran, D.; MacLeod, M.; Wall, E.; Eory, V.; Pajot, G.; Matthews, R.; McVittie, A.; Barnes, A.; Rees, B.; Moxey, A.; Williams, A. & Smith, P. (2009), 'UK Marginal Abatement Cost Curves for the Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry Sectors out to 2022, with Qualitative Analysis of Options to 2050', Technical report, Research and Development Division, SAC, Edinburgh, UK, 168-p..
- Dominic M., Michael MacLeod., Eileen W., Vera E., Alistair McVittie, Andrew B., R. M. Rees, Cairistiona F. E. Topp, Guillaume Pajot, Robin Matthews, Pete Smith, Andrew Moxey. (2010) Developing carbon budgets for UK agriculture, land-use, land-use change and forestry out to 2022. *Climatic Change*
- Pérez Domínguez, I.; Britz, W. & Holm-Mueller, K. (2009), 'Trading schemes for greenhouse gas emissions from European agriculture: A comparative analysis based on different implementation options', *Review of Agricultural and Environmental Studies* 90(3), 287--308.
- Schneider, U. A. & McCarl, B. A. (2006), 'Appraising agricultural greenhouse gas mitigation potentials: effects of alternative assumptions', *Agricultural Economics* 35(3), 277--287.
- Schneider, U. A.; McCarl, B. A. & Schmid, E. (2007), 'Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry', *Agricultural Systems* 94(2), 128-140.
- Schulte, R. and Donnellan T. (2012) A marginal abatement cost curve for Irish agriculture, Teagasc submission to the National Climate Policy Development Consultation, Teagasc, Oakpark, Carlow, Ireland, march 2012
- Sixth Framework Programme Priority 8 Policy Oriented Research, Specific Targeted Research Project No SSPE-CT-2003-502070, Integrated Tools to Design and Implement Agro environmental Schemes (ITAES). Deliverable N° 15, Document number IATES WP6 P3D15, Analysis of Private Transaction Costs related to agri environmental schemes, IATES WP6 Consolidated Report, 2007, 128 p.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Solagro (2011). *Afterres2050: Scénario d'utilisation des terres agricoles et forestières pour satisfaire les besoins en alimentation, en énergie, en matériaux, et réduire les gaz à effet de serre*. Solagro, Toulouse, France.
- US-EPA, 2006: *Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases* United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-06-005, Washington, D.C. <http://www.epa.gov/nonco2/econ-inv/downloads/GlobalMitigationFullReport.pdf>
- Vermorel, M., Jouany, J.-P., Eugène, M., Sauviant, D., Noblet, J., Dourmad, J.-Y. (2008). Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Prod.Anim.* 21(5), 403-418
- Vermont, B. & De Cara, S. (2010), 'How costly is mitigation of non-CO₂ greenhouse gas emissions from agriculture? A meta-analysis', *Ecological Economics* 69(7), 1373--1386.
- Vert, J. & Portet, F. (coord.) (2010). *Prospective Agriculture Énergie 2030. L'agriculture face aux défis énergétiques*. Centre d'études et de prospective, SSP, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire, Paris, France.

Annexe 1. Récapitulatif des facteurs d'émission (EF) et variables d'activité (VA) retenus dans les inventaires du CITEPA (2012, pour l'année 2012)

	Variable d'activité (VA)		Facteur d'émission (EF)		Remarques
1A4c – Combustion					
Combustibles Liquides	136,661	PJ	73,9309	kgCO ₂ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	136,661	PJ	0,0049	kgCH ₄ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	136,661	PJ	0,0016	kgN ₂ O/GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
Gaz	9,240	PJ	0,0050	kgCO ₂ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	9,240	PJ	57,0000	kgCH ₄ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	9,240	PJ	0,0025	kgN ₂ O/GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
Biomasse	1,767	PJ	90,9826	kgCO ₂ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	1,767	PJ	0,0080	kgCH ₄ /GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
	1,767	PJ	0,0039	kgN ₂ O/GJ	VA consommation énergie Agr, sylv et pêche
4A – Fermentation entérique					
Bovins laitiers ^(a)	3,733	Mtêtes	118,7153	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut qui dépend des rendements
Bovins non laitiers	15,988	Mtêtes	50,2872	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut, 14 catégories
Ovins	7,979	Mtêtes	9,4709	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut, 4 catégories
Caprins	1,409	Mtêtes	11,8210	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut, 3 catégories
Chevaux	0,433	Mtêtes	21,7814	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut, 3 catégories
Anes et mulets	0,031	Mtêtes	12,1000	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut
Porcins	14,619	Mtêtes	0,8667	kgCH ₄ /tête	EF ≠ défaut, 4 catégories
4B – Gestion des effluents					
Bovins laitiers	3,733	Mtêtes	43,1575	kgCH ₄ /tête	MCF, VS, B ₀ = défaut; parts SGDA spécifiques ^(b)
Bovins non laitiers	15,988	Mtêtes	14,6923	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (14 cat.)
Ovins	7,979	Mtêtes	0,2790	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (4 cat.)
Caprins	1,409	Mtêtes	0,1791	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (3 cat.)
Chevaux	0,433	Mtêtes	2,0516	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (3 cat.)
Anes et mulets	0,031	Mtêtes	1,1379	kgCH ₄ /tête	Idem
Porcins	14,619	Mtêtes	15,3156	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (4 cat.)
Volailles	255,635	Mtêtes	0,1180	kgCH ₄ /tête	Idem + parts SGDA variables par animal (11 cat.)
Systèmes liquides	445,143	GgN	0,0013	kgN ₂ O/kgN	Nexcr.≠défaut et parts SGDA variables par anim.
Systèmes solides	581,948	GgN	0,0276	kgN ₂ O/kgN	Nexcr.≠défaut et parts SGDA variables par anim.
4C – Riziculture					
Riz irrigué	26,221	kha	200,0000	kgCH ₄ /ha	EF = défaut ; VA : surfaces Agreste
4D – Sols agricoles					
Engrais synthétiques	1882,163	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA : livraisons azote UNIFA
Effluents épandus	696,204	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA : part de l'azote des effluents
Plantes fixatrices d'azote	320,538	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA déduite de la prod. biomasse
Résidus de cultures	488,553	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA déduite de la prod. biomasse
Épandage de boues	18,940	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut
Épandage de compost	0,194	GgN	0,0196	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut
Effluents durant les pâtures	913,669	GgN	0,0316	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; Parts pâture variables par animal
Emissions indirectes (volat.)	569,289	GgN	0,0157	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA part volat. des apports tot. d'N
Emissions indirectes (less.)	1170,812	GgN	0,0393	kgN ₂ O/kgN	EF = défaut; VA part less. des apports tot. d'N
4F – Brûlage des résidus^(f)					
	387,663	GgMS	0,0030	kgCH ₄ /kgMS	EF = défaut, VA déduite de la prod. biomasse
	387,663	GgMS	0,0001	kgN ₂ O/kgMS	EF = défaut, VA déduite de la prod. biomasse

Notes du tableau : (a) Le facteur d'émission pour les vaches laitières varie avec les rendements laitiers selon la formule $EF_{FE,VL} = 55.7 + 0.0098 \times RL$ où RL est le rendement laitier annuel moyen (en l/tête). Voir CITEPA (2012, section OMINEA_4A_enteric fermentation). (b)

$$EF_{NMCH4,i} = VS_i \cdot 0.365 \cdot B_{0,i} \cdot 0.67 \cdot \sum_{jk} MCF_{jk} \cdot SH_{ijk}$$

Le facteur d'émission pour cette catégorie est obtenu grâce à la formule :

où i est un indice de l'animal, j un indice du système de gestion des déjections animales (SGDA) et k un indice du climat, VS_i est la quantité de solides volatiles excrétés quotidiennement (kg/jour), $B_{0,i}$ est la quantité maximale de méthane produite ($m^3/kgVS$), MCF est un facteur de conversion en méthane (%), et SH_{ijk} représente les parts de chaque SGDA pour chaque catégorie animale. Voir CITEPA (2012, section OMINEA_4B_manure management).

Annexe 2. Récapitulatif des émissions agricoles (hors UTCF) reportées dans les inventaires du CITEPA (2012, pour l'année 2010)

	Emissions (EM)	PRG 1995 ^(a)	PRG 2007 ^(b)
1A4c – Combustion			
Combustibles Liquides	10103,5 GgCO ₂	10103,5 GgCO _{2e}	10103,5 GgCO _{2e}
	0,7 GgCH ₄	14,1 GgCO _{2e}	16,8 GgCO _{2e}
	0,2 GgN ₂ O	68,3 GgCO _{2e}	65,6 GgCO _{2e}
Gaz	526,7 GgCO ₂	526,7 GgCO _{2e}	526,7 GgCO _{2e}
	0,0 GgCH ₄	1,0 GgCO _{2e}	1,2 GgCO _{2e}
	0,0 GgN ₂ O	7,2 GgCO _{2e}	6,9 GgCO _{2e}
Biomasse ^(c)	160,8 GgCO ₂	160,8 GgCO _{2e}	160,8 GgCO _{2e}
	0,0 GgCH ₄	0,3 GgCO _{2e}	0,4 GgCO _{2e}
	0,0 GgN ₂ O	2,2 GgCO _{2e}	2,1 GgCO _{2e}
4A – Fermentation entérique			
Bovins laitiers	443,1 GgCH ₄	9305,7 GgCO _{2e}	11078,2 GgCO _{2e}
Bovins non laitiers	804,0 GgCH ₄	16884,0 GgCO _{2e}	20100,0 GgCO _{2e}
Ovins	75,6 GgCH ₄	1587,0 GgCO _{2e}	1889,3 GgCO _{2e}
Caprins	16,7 GgCH ₄	349,8 GgCO _{2e}	416,4 GgCO _{2e}
Chevaux	9,4 GgCH ₄	197,8 GgCO _{2e}	235,5 GgCO _{2e}
Anes et mulets	0,4 GgCH ₄	7,8 GgCO _{2e}	9,3 GgCO _{2e}
Porcins	12,7 GgCH ₄	266,1 GgCO _{2e}	316,8 GgCO _{2e}
4B – Gestion des effluents			
Bovins laitiers	161,1 GgCH ₄	3383,0 GgCO _{2e}	4027,4 GgCO _{2e}
Bovins non laitiers	234,9 GgCH ₄	4933,0 GgCO _{2e}	5872,6 GgCO _{2e}
Ovins	2,2 GgCH ₄	46,8 GgCO _{2e}	55,7 GgCO _{2e}
Caprins	0,3 GgCH ₄	5,3 GgCO _{2e}	6,3 GgCO _{2e}
Chevaux	0,9 GgCH ₄	18,6 GgCO _{2e}	22,2 GgCO _{2e}
Anes et mulets	0,0 GgCH ₄	0,7 GgCO _{2e}	0,9 GgCO _{2e}
Porcins	223,9 GgCH ₄	4702,0 GgCO _{2e}	5597,6 GgCO _{2e}
Volailles	30,2 GgCH ₄	633,3 GgCO _{2e}	753,9 GgCO _{2e}
Systèmes liquides	0,6 GgN ₂ O	179,7 GgCO _{2e}	172,7 GgCO _{2e}
Systèmes solides	16,0 GgN ₂ O	4971,1 GgCO _{2e}	4778,7 GgCO _{2e}
4C - Riziculture			
Riz irrigué	5,2 GgCH ₄	110,1 GgCO _{2e}	131,1 GgCO _{2e}
4D – Sols Agricoles			
Engrais synthétiques	37,0 GgN ₂ O	11461,0 GgCO _{2e}	11017,4 GgCO _{2e}
Effluents épandus	13,7 GgN ₂ O	4239,4 GgCO _{2e}	4075,3 GgCO _{2e}
Plantes fixatrices d'azote	6,3 GgN ₂ O	1951,8 GgCO _{2e}	1876,3 GgCO _{2e}
Résidus de cultures	9,6 GgN ₂ O	2974,9 GgCO _{2e}	2859,8 GgCO _{2e}
Épandage de boues	0,4 GgN ₂ O	115,3 GgCO _{2e}	110,9 GgCO _{2e}
Épandage de compost	0,0 GgN ₂ O	1,2 GgCO _{2e}	1,1 GgCO _{2e}
Effluents durant les pâtures	28,9 GgN ₂ O	8962,7 GgCO _{2e}	8615,8 GgCO _{2e}
Emissions indirectes (volati.)	8,9 GgN ₂ O	2773,3 GgCO _{2e}	2665,9 GgCO _{2e}
Emissions indirectes (less.)	46,0 GgN ₂ O	14259,6 GgCO _{2e}	13707,6 GgCO _{2e}
4F – Brûlage des résidus			
	1,2 GgCH ₄	24,4 GgCO _{2e}	29,1 GgCO _{2e}
	0,0 GgN ₂ O	9,9 GgCO _{2e}	9,5 GgCO _{2e}
Emissions totales^(d)			
	10630,2 GgCO ₂	10630,2 GgCO _{2e}	10630,2 GgCO _{2e}
	2022,4 GgCH ₄	42470,8 GgCO _{2e}	50560,5 GgCO _{2e}
	167,7 GgN ₂ O	51977,5 GgCO _{2e}	49965,5 GgCO _{2e}
		105078,5 GgCO_{2e}	111156,2 GgCO_{2e}

Notes du tableau : (a) PRG_{CO2}=1, PRG_{CH4}=21 PRG_{N2O}=310 ; (b) PRG_{CO2}=1, PRG_{CH4}=25 PRG_{N2O}=298 ; (c) Les émissions de CO₂ dues à la combustion de biomasse sont comptabilisées dans la catégorie 1A mais ne sont pas incluses dans le total national ; (d) Hors émissions de CO₂ par la combustion de biomasse.

Annexe 3. Cahier des charges de l'étude (document du 11 mai 2012)

Le présent cahier des charges reprend les principales orientations définies par le Comité de Suivi concernant cette étude. Les détails méthodologiques sont susceptibles de subir des modifications au cours des travaux en fonction des choix du collectif d'experts scientifiques et des modalités d'accès aux données statistiques du ministère de l'agriculture.

1. Contexte et enjeux

La France est l'une des grandes puissances agricoles mondiales. En 2008, le poids de l'agriculture dans l'économie française représentait 3,5% du PIB, mais les émissions de gaz à effet de serre (GES) dues au secteur primaire (agriculture) constituaient 21% des émissions françaises totales, juste derrière le secteur des transports (26%) et devant le résidentiel-tertiaire (20%) (d'après le CITEPA en 2009). L'agriculture émet principalement du protoxyde d'azote N₂O (51%) et du méthane CH₄ (41%). Le dioxyde de carbone CO₂ représente 8% des émissions agricoles. Par rapport à d'autres secteurs, le secteur agricole est particulier car : les sources d'émissions sont très dispersées ; il faut intégrer des puits de carbone, notamment dans les sols ; des incertitudes persistent sur la mesure des émissions, du stockage et de l'évolution des stocks.

Par ailleurs, l'agriculture est à la fois un des secteurs les plus vulnérables aux changements climatiques et un contributeur net aux émissions anthropiques de GES. L'agriculture doit contribuer à l'objectif de réduction de 14% des émissions de GES du secteur « non Emission Trade System (ETS) » (résidentiel, transports et agriculture) que s'est fixée la France d'ici 2020 (par rapport aux émissions de 1990) et contribuer à l'horizon 2050 au facteur 4 de la France et au facteur 5 de l'UE (cf. feuilles de route UE et FR vers une économie décarbonée). Depuis 1990, on a pu observer une baisse de 11% des émissions agricoles. Des progrès sont toutefois encore possibles et sont nécessaires, via diverses mesures concernant l'énergie, la fertilisation, le changement d'affectation des sols... Le potentiel de séquestration du carbone dans les sols agricoles reste également mal valorisé.

En outre, ces mesures devraient permettre de faciliter la conception ou bien la réorientation de politiques publiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur agricole.

2. Objectifs de l'étude

- Proposer une dizaine d'actions permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre en agriculture par rapport à la situation sans incitation nouvelle (« si on ne fait rien »), et pouvant ultérieurement faire l'objet de mesures au sein de politiques publiques ou de mécanismes économiques incitatifs. Une action est une modification de pratique ou une innovation technologique mise en place au niveau de l'exploitation agricole (ex : ajustement de la fertilisation azotée, mise en place de méthaniseurs).
- Parvenir à un classement de ces actions sur la base de leur potentiel d'abattement et de leur coût à l'échelle de la France et à une échelle plus petite pour certaines actions si les données le permettent.
- Procéder à l'examen qualitatif des interactions potentielles entre actions choisies, et mettre en évidence des combinaisons d'actions favorables (synergies).

L'originalité de l'étude se situe dans le fait de mettre en place une méthodologie permettant d'aboutir à un cadre d'analyse d'actions d'atténuation renseignées sur des critères d'efficacité technique (potentiel d'atténuation), économique (coûts micro et macro) et de leurs ratios « coût-efficacité ».

3. Périmètre de l'étude

Le cadre spatial et temporel est le territoire métropolitain d'ici à l'horizon 2030.

L'ensemble des actions éligibles pour cette étude sont celles qui réunissent les deux conditions suivantes :

- L'action porte sur un choix technique relevant d'une décision de l'agriculteur.
- Une partie au moins de l'atténuation escomptée se situe sur l'exploitation agricole.

Les actions proposées doivent pouvoir être mises en œuvre sans modifications structurelles de l'agriculture française. Mais des actions plus structurelles pourront être mentionnées comme pistes possibles à plus long terme si elles s'avèrent pertinentes.

Il sera important de bien spécifier en introduction de l'étude que celle-ci ne cherche pas l'exhaustivité des actions mais constitue plutôt une première étape permettant d'obtenir des données chiffrées sur des actions choisies parmi les plus efficaces (coût/efficacité).

Sont exclues du périmètre de l'étude :

- La forêt,
- Les cultures énergétiques valorisées hors de l'exploitation,
- L'évaluation systématique (en termes d'émissions de GES) des mesures de politiques agricoles en cours d'élaboration. Mais les interactions éventuelles entre les actions proposées et les politiques existantes ou à venir (pressenties) seront étudiées.

Pour chaque action analysée, le système étudié est le système de production. Le travail d'expertise concerne les atténuations qui ont lieu dans les limites physiques de l'exploitation agricole. Cependant, étant donné l'importance des émissions amont ou aval induites par certaines actions, celles-ci seront mentionnées et chiffrées si les valeurs sont importantes et se trouvent dans des bases de données existantes (ex : l'introduction de légumineuses peut entraîner une moindre importation de soja et limiter ainsi les émissions liées à la déforestation au Brésil et au transport du soja).

4. Méthode et contenu

a. Conduite du travail

i. Sélection de la dizaine d'actions à étudier

- Sur la base d'une liste étendue d'actions envisageables, identifiées dans la littérature et dans des expertises similaires conduites dans d'autres pays (environ 50 actions décomposables en une centaine d'actions élémentaires) une dizaine d'actions sera sélectionnée sur les critères suivants :
 - **Potentiel d'atténuation** des émissions de GES, décomposable en un potentiel d'atténuation unitaire (ex : /ha, /animal, /serre ou /exploitation agricole), et une "assiette" sur laquelle l'action peut être mise en œuvre (nombre d'animaux, de serres, d'exploitations agricoles de tel type, surface, etc.)
 - **Coût de l'action** (manque à gagner pour l'agriculteur, celui-ci pouvant être négatif, c'est-à-dire que l'action génère un revenu à l'agriculteur même sans valorisation économique des tonnes de CO₂eq non émises ; et coûts de transaction pour l'agriculteur et pour l'Etat)
 - **Disponibilité en connaissances pour instruire** (ex : potentiel d'abattement, coûts, etc.) ou mettre en œuvre l'action
 - **Facilité de mise en œuvre, faisabilité technique, risque d'effets secondaires négatifs**
 - **Acceptabilité** par les agriculteurs et la société civile

ii. Rédaction d'une fiche pour chaque action :

Chaque fiche, d'environ 5 pages, comprendra :

- **Une présentation de l'action** (quelle modification technique, quelles zones géographiques concernées, quelle assiette potentielle maximale (en nombre d'animaux, d'exploitation agricole, en hectares, en serres, etc.)
- **Une estimation du potentiel d'atténuation unitaire** (mise en évidence des mécanismes sous-jacents, inventaire des effets de l'action sur les différents gaz à effet de serre, fourchette d'atténuation en équivalent CO₂ /ha, /animal, /serre, /exploitation agricole et par an avec références scientifiques, mention des incertitudes et prise en compte de l'effet du changement climatique sur l'efficacité de l'action si nécessaire et si les données sont disponibles).
- Un point spécifique sur les **méthodologies de comptabilisation dans l'inventaire national** et les améliorations possibles de cet inventaire afin qu'il puisse prendre en compte les réductions d'émissions liées à ce changement de pratiques.
- **Une estimation du coût unitaire pour les agriculteurs**, intégrant le manque à gagner ou le gain éventuels (inventaire des modifications engendrées par l'action sur l'exploitation, coût/gain de l'action pour l'agriculteur /ha, /animal, /serre ou /exploitation agricole et par an, estimation des incertitudes), et des coûts de transaction pour l'Etat (ordre de grandeur calculé en fonction d'une hypothèse sur le type de mesure et le mode de suivi).
- **Une estimation du ratio coût-efficacité** (coût par tonne de CO₂eq évitée ou C stocké) chaque année en faisant au préalable une hypothèse sur la cinétique de développement de l'action jusqu'à 2030 (avec et sans incitation), puis au total, au bout de 18 ans (en se plaçant en 2030) calcul de la surface totale convertie à l'action du fait de l'incitation, calcul de l'atténuation (ou stockage de carbone) et du coût à l'échelle de la France et calcul de l'efficacité (en euros / tonne de CO₂eq évitée ou C stocké).
- **Un examen qualitatif des autres impacts éventuels de l'action** (impact sur la production agricole, impacts environnementaux (éventuels fuites ou déplacements de pollution), interaction avec d'autres objectifs de politiques publiques, compatibilité et/ou antagonisme avec des mesures d'adaptation au changement climatique).
- Présentation possible des résultats sous la forme de courbes MACC.

iii. Analyse des interactions potentielles

- Mention des interactions potentielles (incompatibilité, synergie, etc.) entre actions retenues et signalement des combinaisons favorables, de manière qualitative.

Les travaux contiendront aussi une description de la méthodologie retenue : principales hypothèses de travail retenues, choix et méthode d'analyse de la dizaine d'actions, mention des actions non retenues et raisons de ce choix.

b. Sources documentaires

Les sources documentaires utilisées pour cette étude seront des publications scientifiques, des rapports et de la littérature technique. Le choix des documents est validé et justifié par les experts.

La qualité de l'étude dépendra des données disponibles. Si les experts devaient travailler sur les données disponibles en ligne au 20/01/2012 sur Agreste, qui sont partielles et agrégées, la méthodologie serait :

- **Une Ferme France :**
 - Les experts considéreraient l'exploitation France, en conservant l'allocation des terres relativement constante.
 - Ils n'utiliseraient que le RICA 2006 et l'enquête pratiques culturales 2006 en ligne (puisque ni 2010 et 2011 respectivement, ni le RGA 2010 ne sont disponibles).
- **Une Ferme par région :**
 - Les experts pourraient essayer d'appliquer la même méthode aux régions administratives, en travaillant toutes OTEX et CDEX confondues. Ils détermineraient différents itinéraires techniques de référence par culture, en se basant sur l'enquête pratiques culturales 2006 en ligne.

5. Produits attendus

- **Un rapport** regroupant l'ensemble des contributions et qui relève de la seule responsabilité des experts. Il sera disponible le jour du colloque en accès libre sur internet sur le site de l'INRA. Il contiendra les références bibliographiques, mais ne sera pas imprimé. Ce rapport sera soumis aux commanditaires pour réaction (adéquation avec le cahier des charges, lisibilité du rapport, robustesse des résultats) mais la responsabilité des experts sera respectée.
- **Une synthèse** de 40 pages maximum. Elle sera rédigée par l'équipe projet et validée scientifiquement par les pilotes et les experts. Elle sera finalisée un mois avant le colloque, ne contiendra pas de références bibliographiques, et sera imprimée. Cette synthèse sera soumise aux commanditaires pour réaction.
- **Un résumé de 8 pages**, document de communication de l'étude, réalisé à l'initiative de l'INRA. Il sera rédigé par la DEPE, validé sur le fond par les pilotes et les experts, et soumis pour avis aux commanditaires. Il sera disponible et imprimé le jour du colloque.

6. Comité Technique

Le Comité Technique est composé d'experts de terrain (Instituts techniques). Il sera consulté à plusieurs reprises au cours de l'étude sur la pertinence du choix d'actions proposées par le groupe d'experts et l'examen de la faisabilité des actions proposées. Il sera aussi sollicité pour la fourniture de données techniques pour alimenter les calculs de l'évaluation coût/efficacité.

7. Comité de Suivi

Le Comité de Suivi assure l'interface entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre. Il est composé à l'initiative des commanditaires. L'INRA y est associé au titre de son intérêt pour les retombées de l'étude pour la recherche. Les 2 copilotes scientifiques de l'étude et l'équipe projet y sont invités pour présenter l'avancement des travaux.

Annexe 4. Actions non-instruites et principaux motifs de non-instruction

Cette annexe recense les arguments qui ont amené le collectif d'experts à ne pas instruire certaines actions. Un argumentaire a été rédigé pour chaque action. Ces actions n'ont pas été retenues pour être instruites, selon les critères du cahier des charges de cette étude, mais ce choix n'invalide pas leur intérêt ou leur efficacité potentiels.

Les actions sont classées en 4 leviers :

- I. Production végétale et réduction des émissions de GES du sol
- II. Production végétale et stockage de carbone dans le sol et la biomasse
- III. Production animale et réduction des émissions de CH₄ (et de N₂O) des animaux
- IV. Gestion des effluents, production et consommation d'énergie sur l'exploitation

Les principaux motifs de non-instruction sont indiqués sommairement au début de chaque action. Ils peuvent être regroupés dans quatre grandes catégories :

- Hors périmètre
- Connaissances manquantes (scientifiques/techniques)
- Potentiel unitaire faible ou incertain/ assiette faible
- Acceptabilité faible (faisabilité technique, risques, acceptabilité sociale, antagonisme avec d'autres politiques)

I. Production végétale et réduction des émissions de GES du sol

I.1. Modifier les conditions physico-chimiques du sol pour défavoriser les réactions productrices de CH₄ et de N₂O

Connaissances scientifiques manquantes, faisabilité technique faible à grande échelle

Optimiser les conditions physico-chimiques du sol pour réduire les émissions de N₂O.

Exemples de sous-actions : optimisation du pH du sol à l'aide du chaulage, limitation de l'irrigation ou favorisation du drainage de sols où l'aération est déficiente, limitation du tassement du sol voire décompaction des sols

(C. Hénault)

L'optimisation du pH du sol peut permettre d'inhiber les microorganismes mis en jeu dans les processus de nitrification et de dénitrification. Par ailleurs, les pratiques améliorant l'aération des sols (diminution de l'engorgement et du tassement) limitent les processus de dénitrification.

Cependant, des informations manquent encore sur les sols concernés par de telles actions, et donc sur l'assiette potentielle, mais aussi sur les pratiques concrètes à recommander pour s'assurer de l'efficacité de l'atténuation.

Enfin, le suivi et la vérification de la mise en œuvre de ces pratiques afin de s'assurer de leur effet pourraient poser problème.

En effet, l'intensité des émissions de GES (N₂O, CH₄...) par les sols est la résultante du fonctionnement simultané de processus microbiens producteurs et de processus microbiens consommateurs de ces gaz. La régulation des équilibres entre processus producteurs et processus consommateurs n'est pas bien comprise actuellement.

Nous savons que les conditions physico-chimiques des sols influencent les activités des microorganismes présents dans les sols.

Les conditions d'aération des sols qui sont la résultante des propriétés intrinsèques des sols (conductivité hydraulique, capacité de rétention en eau...), des événements climatiques (pluviométrie...) et de l'activité humaine (travail du sol, drainage, irrigation) déterminent les métabolismes respiratoires (respiration aérobie vs respiration anaérobie) des microorganismes du sol dont certains génèrent la libération de GES.

Nous savons aussi que les conditions biogéochimiques des sols (pH, disponibilité en carbone) peuvent d'une part influencer la structure des communautés microbiennes de sols et d'autre part influencer leur activité.

Nous ne savons pas dans quelle mesure une variation de ces paramètres va modifier l'intensité des flux de N₂O qui sont la résultante de plusieurs processus en interaction.

C'est pourquoi, l'approche qui consiste à intervenir sur les propriétés physico-chimiques des sols pour gérer les émissions de N₂O par les sols est encore au stade de la voie de recherches.

Modifier les communautés microbiennes des sols en introduisant des microorganismes réduisant le N₂O en N₂ pour limiter les émissions de N₂O, ou identifier des plantes possédant des capacités d'inhibition des microorganismes de la nitrification.

Exemples de sous-actions et options techniques :

- Introduire dans les sols des bactéries efficaces pour réduire le N₂O en N₂.
- Identifier des plantes possédant des capacités d'inhibition de la nitrification.

(C. Hénault, P. Chemineau)

Certains sols présentent une faible capacité à réduire le N₂O en N₂. L'idée serait d'introduire dans ces sols des microorganismes spécifiques présentant une très forte capacité à réduire le N₂O en N₂ pour limiter les émissions de N₂O par ces sols.

Cependant, compte-tenu du nombre de microorganismes présents dans les sols et de leur diversité, l'introduction d'une souche spécifique d'intérêt dans un sol n'apparaît pas réaliste sauf si cette introduction est accompagnée, par exemple en introduisant une souche vivante en symbiose avec une plante hôte, celle-ci jouant alors le rôle de bioréacteur. Les cultures de légumineuses pouvant, dans certaines conditions, constituer alors des puits de N₂O.

Certaines souches spécifiques de *rhizobia*, symbiote des légumineuses, possèdent le gène NosZ codant la synthèse de l'enzyme N₂O réductase permettant la réduction de N₂O en N₂. Il s'agit alors de cultiver des légumineuses inoculées avec une souche présentant à la fois la propriété « classique » fixatrice d'azote (la culture n'aura pas besoin de fertilisation azotée) et la capacité « nouvelle » de réduire le N₂O en N₂. Dans le cas, par exemple, du soja inoculé avec la souche MSDJG49, homologuée en France, des expérimentations montrent qu'on peut observer une consommation de N₂O de l'ordre de 75 g N-N₂O par ha pendant le cycle cultural (Hénault & Revellin, 2011).

Des essais réalisés en serre et au laboratoire (Sameshima-Saito et al., 2006 ; Hénault et al., 2011) ont montré la capacité de ces cultures à transformer le N₂O en N₂. Cet effet n'étant, toutefois, pas démontré pour l'ensemble des légumineuses à graines cultivables en France (notamment le pois) et pour l'ensemble des conditions de culture, il n'a pas été instruit.

Il n'y a, à notre connaissance, pas d'autres exemples d'intervention sur la microflore des sols.

Il existe également des publications sur les capacités de graminées fourragères tropicales (*Brachiaria humidicola*) dont certaines lignées possèdent des racines qui synthétisent et libèrent dans le milieu des « inhibiteurs biologiques de nitrification » (BNI) agissant négativement sur l'activité des micro-organismes du sol responsables de la nitrification (Subbarao et al 2012). Mais ces recherches sont encore à un stade très amont et, à notre connaissance, aucune identification d'une activité du même type n'a encore été faite pour des espèces végétales tempérées.

Cette action n'a pas été instruite dans le cadre de cette étude, car des expérimentations ont été faites en laboratoire et en serre mais n'ont pas encore été testées en plein champ, l'effet attendu en conditions agricoles est donc encore incertain.

Sameshima-Saito et al., 2006, Symbiotic Bradyrhizobium japonicum reduces N₂O surrounding the soybean root system via nitrous oxide reductase, *Appl. Environ. Microbiol. April 2006 vol. 72*

Hénault et al., 2011, Inoculants of leguminous crops for mitigating soil emissions of the greenhouse gas nitrous oxide, *PLANT AND SOIL*
Subbarao GV, Sahrawat KL, Nakahara K, Ishikawa, T, Kishii M, Rao IM, Hash, CT, George TS, Rao, PS, Nardi P, Bonnett, D, Berry W, Suenaga K, Lata JC, 2012. Biological nitrification inhibition-a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. *Advances in Agronomy* 114, 249-302.

Assiette faible

Favoriser l'aération des sols de riziculture pour limiter les émissions de CH₄.

Exemples de sous-actions : diminuer la profondeur des rizières, éviter d'imbiber le sol, vider les rizières plusieurs fois durant la croissance du riz, maintenir le sol le plus sec possible durant l'intersaison

L'inondation des rizières crée un milieu pauvre en oxygène qui favorise les processus de fermentation et la production de méthane. La diminution de l'épaisseur de la lame d'eau, ou encore la vidange régulière des terrasses permettent une meilleure aération et une moindre production de méthane. Le potentiel d'atténuation unitaire de ces pratiques a été évalué à 4,0 à 4,9 tCO₂e/ha/an, ce qui en fait un des leviers d'atténuation les plus élevés dans les pays à forte production rizicole (McKinsey, 2009).

Dans le cas de la France, les surfaces ensemencées en riz couvraient 16 640 ha en 2008-2009 et 21 100 ha en 2009-2010 (FranceAgriMer, 2009). D'après l'atténuation unitaire estimée par McKinsey, l'atténuation potentielle maximale serait donc de l'ordre de 84 000 à 103 000 tCO₂e/an en France, ce qui reste peu important par rapport à d'autres actions potentielles.

I.2. Diminuer les apports de fertilisants azotés sur les cultures

Connaissances scientifiques manquantes

Améliorer l'efficacité de prélèvement et d'utilisation de l'azote par les plantes pour permettre la diminution des apports en fertilisants azotés et réduire les émissions de N₂O.

L'amélioration des plantes pourrait permettre d'augmenter leur efficacité dans l'utilisation de l'azote, par exemple en améliorant son assimilation ou en régulant la nitrification par les micro-organismes associés (Subbarao et al 2012). Une telle action rendrait possible une diminution de la fertilisation azotée sans affecter les rendements, grâce à une meilleure valorisation de l'azote disponible dans le sol. Cependant la mise en place de cette action nécessite un travail préalable de sélection pour créer de telles lignées ; les effets sur l'atténuation des émissions de N₂O ne peuvent donc pas être visibles dès aujourd'hui. Pour cette raison cette action n'a pas été instruite pour l'analyse dans le cadre de cette étude.

Subbarao GV, Sahrawat KL, Nakahara K, Ishikawa, T, Kishii M, Rao IM, Hash, CT, George TS, Rao, PS, Nardi P, Bonnett, D, Berry W, Suenaga K, Lata JC, 2012. Biological nitrification inhibition-a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. *Advances in Agronomy* 114, 249-302.

II. Production végétale et stockage de carbone dans le sol et la biomasse

II.1. Réduire les pertes de carbone en diminuant les flux allant de la biomasse et du sol vers l'atmosphère

Assiette faible et Connaissances scientifiques manquantes

Limitier l'exportation de matière organique hors des parcelles cultivées, pour limiter les pertes de carbone des sols.

Exemples de sous-actions : ne pas incinérer les déchets des cultures aux champs, restitutions des résidus de cultures

Dans le cadre de la conditionnalité des aides, les agriculteurs qui demandent les aides de la PAC sont tenus de ne pas brûler les résidus de paille ainsi que les résidus des cultures d'oléagineux, de protéagineux et de céréales, à l'exception de ceux des cultures de riz (article D615-47 du Code rural et de la pêche maritime). Le préfet peut autoriser à titre exceptionnel ce brûlage lorsqu'il s'avère nécessaire pour des motifs agronomiques ou sanitaires. Dans ce contexte réglementaire, la pratique du brûlage est aujourd'hui peu répandue et son potentiel d'atténuation associé est donc marginal.

Si l'on prend comme hypothèse une production de paille exportable de 7t/ha (en matière sèche), on obtient une économie moyenne de 2,4 tC/ha/an (essentiellement énergie fossile) si les pailles sont brûlées pour en tirer de l'énergie, comparée à une économie de 0,15 tC/ha/an (sur 20 ans) dans le cas où les pailles sont laissées sur le sol (stockage de carbone par restitution des résidus) (Arrouays, 2002, p. 133). En termes d'impact sur les émissions de GES, la valorisation en bio-énergie des résidus de culture offre donc un intérêt plus important que la restitution, c'est pourquoi cette action n'a pas été retenue dans cette étude (Arrouays et al., 2002).

La restitution des pailles, directement ou via le retour du fumier, peut permettre de maintenir les teneurs en C des sols, ou d'éviter leur décroissance, ce qui peut avoir un impact important en termes de propriété des sols : CEC, rétention d'eau et surtout stabilité structurale et sensibilité à l'érosion. Il apparaît donc risqué de recommander une exportation des pailles sans une estimation rigoureuse de l'évolution des stocks de C et donc de la quantité de pailles à restituer pour maintenir (augmenter) les teneurs en C des sols afin de se situer au-dessus de valeurs seuil en termes de battance et érosion. De telles valeurs seuil ne sont pas vraiment disponibles actuellement.

Arrouays et al. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective réalisée par l'INRA p.133
Saffih-Hdadi et Mary SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY, Volume: 40, Issue: 3, Pages: 594-607 DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.08.022
Published: MAR 2008

Éviter la culture de zones humides pour limiter le relargage de CO₂ stocké dans la matière organique.

Exemples de sous-actions : éviter de drainer les sols humides, voire remise en eau des tourbières et zones humides (accumulation de MO)

Afin d'être cultivées certaines zones humides peuvent être drainées. Ces zones contiennent une grande quantité de matière organique accumulée qui se dégrade alors après drainage, au contact de l'oxygène ce qui entraîne un dégagement de CO₂ et de N₂O. Éviter le drainage de ces sols ou rétablir une lame d'eau lorsqu'ils ont été drainés correspond à une atténuation unitaire élevée de 33,5 à 70,2 tCO₂e/ha/an, et une atténuation potentielle élevée à l'échelle de la planète (McKinsey, 2009).

En France, il existait en l'an 2000, 72 136 ha de « marais intérieurs » selon la typologie CORINE Land Cover. Si ils étaient tous mis en culture, ceci correspondrait à une émission évitée potentielle maximale de 2 417 000 à 5 064 000 tCO₂e/an, ce qui est comparable à d'autres actions potentielles agissant sur des assiettes plus larges. Il est donc fortement souhaitable que ces zones humides ne soient pas mises en culture.

Par ailleurs, ces zones humides rendent des services écosystémiques : préservation des biotopes, épuration des eaux, régulation des crues, etc, dont il est difficile d'apprécier la valeur exacte autrement qu'en estimant que ces services sont actuellement très menacés et donc renforce l'idée de leur non mise en culture.

Éviter cette action n'a pas été retenue pour les mêmes raisons.

En revanche, la remise en eau de zones anciennement humides et actuellement cultivées pourrait être une action intéressante, mais nous ne disposons pas actuellement des données nécessaires à une telle estimation et elle n'a pas *a priori*, été instruite pour cette raison.

McKinsey (2009). Pathways to a Low-Carbon Economy p.189

Surface de marais intérieurs, France métropolitaine, année 2000) : [http://www.data.gouv.fr/donnees/view/Occupation-du-territoire-\(source-CORINE-Land-Cover-1990-et-2000\)-411-Surface-des-marais-int%C3%A9rieurs-50432298?xtmc=marais+int%C3%A9rieurs&xtcr=1](http://www.data.gouv.fr/donnees/view/Occupation-du-territoire-(source-CORINE-Land-Cover-1990-et-2000)-411-Surface-des-marais-int%C3%A9rieurs-50432298?xtmc=marais+int%C3%A9rieurs&xtcr=1)

II.2. Augmenter les entrées de carbone par une production accrue de biomasse, en augmentant alors les flux de l'atmosphère vers la biomasse et le sol

Potentiel unitaire incertain, antagonisme avec d'autres politiques

Accroître la production de biomasse en optimisant les facteurs de production, pour augmenter le retour au sol de carbone.

Exemples de sous-actions : irrigation des terres cultivées, fertilisation des sols pauvres pour stimuler la production

(Claire Chenu)

L'accroissement de la production de biomasse par unité de surface peut permettre la restitution d'une quantité plus importante de matière organique au sol et donc d'une augmentation du stock de carbone de celui-ci.

Cependant, dans le cas d'une augmentation de la fertilisation pour augmenter la production de biomasse, cette action risque d'être en grande partie contrebalancée par une augmentation des émissions d'autres GES tels que le N₂O et le CO₂ énergétique pour la fabrication des engrais. Puis dans le cas d'une augmentation de la fertilisation cela pose le problème d'un accroissement de la consommation d'eau qui est déjà remis en question actuellement.

L'irrigation permet effectivement d'augmenter la biomasse et donc les restitutions organiques au sol et se traduisent le plus souvent par une augmentation des stocks de C dans le sol (fourchette estimée de -0,55–2,82 t CO₂e ha⁻¹ an⁻¹ (Eagle et al. 2012). Cependant :

- la minéralisation des matières organiques est également stimulée dans les sols cultivés, ce qui explique le faible potentiel de stockage ;
- les émissions de N₂O sont plus élevées en sol irrigué (0,7 t CO₂e ha⁻¹ an⁻¹, Liebig et al. 2005) car l'activité microbienne y est stimulée et les conditions anoxiques favorisées ;
- l'irrigation favorise la solubilisation des carbonates, ce qui émet du CO₂ (0,3 CO₂e ha⁻¹ an⁻¹ (Martens et al. 2005).

Enfin, certains sols pauvres ou peu cultivés remplissent des fonctions écologiques.

Martens, D.A., W. Emmerich, J.E.T. McLain, and T.N. Johnsen. 2005. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA. *Soil & Tillage Research* 83(1):95–119.

- Eagle, A., Olander, L., Henry, L.R., Haugen-Kozyra, k., Millar, N., Robertson, G.P., 2012. Greenhouse Gas Mitigation Potential of Agricultural Land Management in the United States A Synthesis of the Literature Companion Report to Assessing Greenhouse Gas Mitigation Opportunities and Implementation Strategies for Agricultural Land Management in the United States, Technical working group on agricultural greenhouse gases report. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions Report
- Liebig, M.A., Morgan, J.A., Reeder, J.D., Ellert, B.H., Gollany, H.T., Schuman, G.E., 2005. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. . Soil & Tillage Research 83, 25–52.

Potentiel unitaire incertain, faisabilité technique faible

Ajuster le choix des espèces cultivées pour accroître le retour au sol de carbone.

Exemples de sous-actions : cultures dérobées, plantes à enracinement profond ou pluri-annuelles, cultures à restitution plus importante (céréales au lieu de pomme de terre)

(Katja Klumpp, Aurelie Metay)

A la différence des Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate (CIPAN), les cultures dérobées ne restituent pas au sol l'azote capturé et lui restituent moins de carbone, la biomasse étant exportée (source : OPTABIOM, *Un guide pour vous aider à sélectionner pas à pas les cultures dérobées correspondant le mieux à votre cas*).

Les cultures à restitutions plus importantes ou les cultures dérobées peuvent cependant contribuer au stockage de carbone (environ 0.6 t ha⁻¹ an⁻¹; Freibauer et al. 2004) et peuvent également réduire les émissions de N₂O, par l'amélioration de la porosité du sol (Smith et al., 2008)

L'introduction de cultures dérobées et/ou pluri-annuelles est une option permettant d'accroître la production animale sans besoin de terre supplémentaire. Ces cultures permettent une production de biomasse à exploiter pour augmenter le stock des fourrages en évitant une pénurie en fin d'hiver. En cultures dérobées les mélanges proposés permettent une utilisation optimale des ressources disponibles, dans l'espace (racine et architecture aérienne) et dans le temps (espèces à croissance rapide et plus lente, Avoine, Pois, Féverole, Sorgho, Mais). L'effet de synergie est systématique et la production de biomasse augmente avec le nombre d'espèces dans le mélange (ex 2 à 4 espèces) et bénéficie de la présence de légumineuses. Les cultures dérobées sont aussi une option pour produire soi-même son fourrage avant l'hiver, mais ce n'est pas une solution miracle puisque la mise en place et la récolte ont un coût. Le choix des cultures adaptées au potentiel du sol, à l'altitude et à la période de semis est plus important que le choix des plantes à enracinement profond. De même, bien que ces cultures soient généralement moins exigeantes face aux contraintes climatiques, la production de fourrage en dérobé est risquée. La mise en place de cultures dérobées et plus particulièrement celles à croissance rapide, avec une bonne valeur alimentaire est adaptée au pâturage (ex Ray grass et colza) (Capitaine et al 2003). Le choix des parcelles pour implanter une culture dérobée est également important et restreint donc l'assiette sur laquelle elles sont implantables (ex culture suivante, privilégier les parcelles portantes).

En contrepartie, les cultures pluri-annuelles (ex prairie temporaire) offrent de très grandes possibilités d'accroître la production animale en tirant parti des plantes fourragères non utilisées dans les plantations et en optimisant les systèmes existants (voir action retenue sur les prairies).

Les cultures à restitution plus importante (céréales au lieu de pomme de terre) pourraient constituer une option intéressante, mais il est à exclure que le choix des espèces cultivées puisse être motivé par les quantités de carbone retournant au sol, sans prise en compte de leur rentabilité économique dans un contexte d'agriculture productive et compétitive.

L'assiette concernée par cette mesure est donc estimée faible *a priori*.

Capitain M, Corrot G, Gautier D, (2003) Gérer les prairies et implanter des cultures dérobées Institut de l'Elevage – Dossier Sécheresse 2003.

Freibauer, A; Rounsevell, MDA; Smith, P; et al (2004). Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. Geoderma. OPTABIOM, Un guide pour vous aider à sélectionner pas à pas les cultures dérobées correspondant le mieux à votre cas
Smith et al., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. Phil. Trans. R. Soc. B 27 February 2008 vol. 363 no. 1492 789-813

Assiette faible

Restaurer les sols dégradés pour augmenter la production de matière organique et stocker du carbone dans les sols.

Exemples de sous-actions : acidifiés, érodés, salés, etc.

(Denis Angers et Claire Chenu)

Du fait que le périmètre de l'étude ne concerne que les exploitations agricoles, il est probable que les surfaces de sols dégradés au sein des exploitations soient déjà valorisées à leur potentiel. S'il s'agit de sols pollués, cela peut concerner des sols de friches industrielles ou de sols antérieurement cultivés qui ne peuvent plus l'être en cultures alimentaires et sur lesquels on fait/pourrait faire des cultures non alimentaires. Par ailleurs, les sols de friches industrielles ou de leur périmètre immédiat ou encore les sols urbains représentent des surfaces faibles (à estimer plus précisément).

Le potentiel de stockage et donc d'atténuation à l'échelle de la France est faible.

Connaissances scientifiques manquantes, potentiel unitaire incertain

Epandre du carbone "inerte" sur les sols cultivés pour stocker du carbone.

Sous-actions : ajout de biochars dans les sols

(Denis Angers, Claire Chenu et Sylvie Recous)

Le biochar (bio-charcoal) est un charbon d'origine végétale. Il est obtenu par chauffage de biomasse dans un milieu sans oxygène (processus de pyrolyse à basse température). Cette pyrolyse convertit le bois, l'herbe ou les résidus de culture en charbon dont la teneur en carbone est deux fois plus élevée que la biomasse ordinaire. Intégré aux sols sous forme broyée, il pourrait constituer un stock de carbone. Contrairement au stockage de carbone dans la biomasse ou dans les sols qui sont des processus réversibles à l'échelle de l'année ou de la décennie, la durée potentielle de stockage du carbone dans le biochar pourrait être de l'ordre de la centaine d'années voire du millier d'années, même si cette durée est encore en débat (Lehmann, 2007).

D'après Lehmann, 2007, les émissions de CO₂ énergétique liées à la pyrolyse et à l'enfouissement des biochars peuvent être compensées par la valorisation énergétique des gaz émis par la biomasse lors de son réchauffement. Cependant les travaux publiés sur le sujet ne sont pas encore suffisants. Il existe une grande variabilité du temps de résidence des biochar en fonction de leur procédé de fabrication. De plus il existe des incertitudes sur le mode de mise en œuvre d'une telle action, et sur les conséquences qu'aurait l'utilisation de biochars sur les sols ou sur la production agricole. Des questions demeurent également sur le choix et la disponibilité des gisements de biomasse utilisée pour la production de biochar, et sur les conséquences de cette utilisation alternative des biomasses (moins de restitution de MO fraîches au sol). Cette action pourrait cependant être étudiée comme un cas particulier d'apport de matière organique d'origine non-agricole (action 32). Les volumes potentiellement concernés seront probablement faibles et la question des coûts et impacts environnementaux de leur transport des lieux de production vers les lieux d'épandage/incorporation soumis aux mêmes questionnements que pour d'autres produits organiques.

Cette action n'a pas été instruite car son potentiel unitaire est incertain, et les conséquences sur les sols et la production agricole ne sont pas connues actuellement.

Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. Nature

III. Production animale et réduction des émissions de CH₄ et de N₂O

III.1. Accroître la productivité animale pour diminuer les émissions de CH₄ et de N₂O par unité de produit

Connaissances scientifiques manquantes, potentiel d'atténuation faible ou incertain

Sélectionner des animaux sur les caractères de croissance, de production laitière, d'efficacité alimentaire, de fertilité, de prolificité, pour diminuer les émissions de CH₄ entérique par unité de produit.

Exemples de sous-actions : amélioration de l'assimilation, la réduction des émissions par litre de lait, accroissement de la production laitière par vache, de la prolificité

(Philippe Faverdin, Marc Benoît, Philippe Chemineau)

A priori, la sélection des animaux sur des caractères de croissance, de production laitière, d'efficacité alimentaire, de fertilité, de prolificité a pour effet d'augmenter la productivité des animaux (ex : quantité de viande et/ou de lait produite par animal par an). Une quantité égale d'aliments, dont la production et le transport induisent des émissions de GES, permet alors de produire plus de lait et/ou de viande pour une même quantité de GES émis. Cette sélection serait donc une action permettant de diminuer les émissions par unité de produit.

Cependant, en matière de bovins, cette évaluation est complexe et les résultats de la littérature encore contradictoires, certains voyant des effets très positifs de l'accroissement de production laitière des vaches (Capper et al 2009) d'autres beaucoup moins nets lorsque les conséquences sur la production de viande sont analysées (Cederberg 2003, Zetermeier 2012). De plus, les ressources utilisées sont modifiées par l'augmentation de productivité des animaux ce qui complexifie l'étude. Des marges de progrès sont sans doute possibles, mais l'analyse des 20 dernières années (Pfilmlin et al 2009) en France ne dresse pas un constat très positif de cette évolution dans les chiffres techniques de la production du troupeau bovin global. Des études spécifiques sur les scénarios des bovins semblent indispensables pour répondre à cette question et ne sont pas compatibles avec le cadre plus limité de cette étude.

Par ailleurs, les schémas de sélection actuels améliorent déjà ces paramètres depuis plusieurs années. Cette action ne pourrait donc sans doute pas donner lieu à des améliorations importantes par rapport à ce qui se fait déjà actuellement et ce qui se fera dans les années qui viennent.

Enfin, l'appui technique aux producteurs est assez généralement basé sur ces concepts de progrès techniques qui sont très corrélés aux résultats économiques. On peut considérer que d'une part les progrès sont relativement lents malgré les moyens qui y sont consacrés, d'autre part que des moyens supplémentaires n'auraient certainement pas d'effet significatif additionnel.

Connaissances scientifiques manquantes

Sélectionner génétiquement les bovins sur la consommation alimentaire résiduelle (RFI) ou directement sur la production de CH₄, pour diminuer les émissions de méthane.

Deux sous-actions et options techniques :

- Sélectionner les bovins sur l'efficacité alimentaire pour diminuer corrélativement les émissions de CH₄
- Sélectionner directement sur les émissions de CH₄

(Philippe Chemineau)

Compte tenu de la proportion importante des émissions entériques de CH₄ par les ruminants, en particulier les bovins, plusieurs équipes dans le monde s'intéressent à la possibilité de réduire les émissions en sélectionnant génétiquement (a) des animaux plus efficaces sur le plan de la transformation alimentaire qui pourraient, du fait de cette meilleure efficacité, émettre moins de CH₄ à la fois par animal et par kg de produit, (b) des animaux directement moins émetteurs de CH₄ en mesurant les émissions de ce gaz à l'étable et au pâturage.

1. La consommation résiduelle (en anglais Residual Feed Intake ou RFI) est un caractère génétiquement héritable (Nkrumah et al. 2006, Hergarty et al. 2007) et qui semble relié de manière inversement proportionnelle aux émissions de CH₄ (corrélation génétique de 0,6 ; De Haas et al., 2011 et 2012a) : plus la consommation résiduelle est faible et moins les animaux rejettent de CH₄. Cette approche est intéressante puisqu'une faible consommation résiduelle, chez les bovins comme dans les autres espèces, est généralement associée à une bonne rentabilité de l'élevage. Mais ce caractère n'est pas facile à quantifier, surtout chez les bovins à viande, puisqu'il faut pouvoir mesurer individuellement les consommations alimentaires et les relier aux performances des animaux.

Malgré cette difficulté, la sélection sur l'efficacité alimentaire à travers la mesure de la RFI est une réalité en bovins allaitants depuis des décennies en France, dans les stations de contrôle individuel des taureaux d'IA. De tels programmes se poursuivent dans le monde (Irlande) et en France (Renand et al. 2011, Eugène et al. 2011), actuellement.

Les grands pays producteurs de viande, Australie, USA, Canada, ont réévalué l'importance à accorder à une sélection sur la RFI en envisageant une approche génomique. Pour cela, il y a des discussions pour un rapprochement et la mise en commun des résultats de phénotypage de la RFI qui existent dans ces pays (généralement dans des installations de recherche) pour constituer une population de référence de quelques milliers d'animaux (7.900 au Canada, 4.500 aux USA, 3.500 en Australie). Tous ces animaux ont vocations à être génotypés avec la « puce 54K » dans le but de mettre en évidence les marqueurs à utiliser pour une valeur génétique moléculaire de la RFI. La disponibilité de 800 jeunes bovins Charolais de l'INRA de Bourges, phénotypés et génotypés avec la « puce 54K » mais également quelques centaines de taureaux d'IA passés en stations de contrôle individuel (donc phénotypés pour RFI) qui ont été typés par les entreprises de sélection, constituent un apport à ce programme, en cours de discussion.

En conclusion sur ce point : la sélection sur RFI est donc une réalité et elle va s'accélérer suite aux efforts de collaboration internationale.

Il reste à (in)valider la relation RFI / CH₄ mise en évidence dans les deux publications rapportées ci-dessus. C'est tout l'objet du projet BVE3, financé par la Région Centre et qui se déroule à l'INRA de Bourges avec la mesure de CH₄ au moyen des GreenFeed (voir ci-dessous), simultanément aux enregistrements des consommations. Ce projet vise essentiellement à mettre en évidence cette relation sur des génisses de 2 ans alimentées avec un régime à base d'ensilage d'herbe car c'est, sans doute, sur l'efficacité de cette phase de croissance des femelles de renouvellement que nous avons le plus à gagner en terme de réduction des émissions de méthane, si effectivement on confirme la relation mise en évidence sur des animaux à l'engrais.

2. Les méthodes de mesure directes des émissions de CH₄ par les bovins sont encore imparfaitement maîtrisées, font l'objet de discussions entre équipes et leur application dans les élevages laitiers et à viande n'en sont encore qu'au stade expérimental. Cependant, une mesure directe en salle de traite pour les bovins laitiers fait l'objet d'expérimentations intenses en Hollande et au Danemark (De Haas et al. 2012b ; Lassen et al., 2012) et des outils de mesure au pâturage sont en cours d'expérimentation dans plusieurs pays, dont en France à l'INRA de Bourges (Greenfeed <http://www.c-lockinc.com/introduction.php>). La mise au point prochaine de ces outils devrait permettre de disposer rapidement, si les résultats sont fiables, de valeurs de phénotypes individuels à assez large échelle débouchant sur une sélection génétique possible ; ce qui serait particulièrement intéressant notamment dans le cas des bovins allaitants. Dans le même temps, de tels outils pourraient aussi être utiles pour un meilleur pilotage alimentaire des lots d'animaux.
3. Les premières estimations des paramètres génétiques des émissions directes de CH₄ chez les bovins montrent une héritabilité moyenne (de l'ordre de 0,20 ; Lassen et al., 2012) qui devrait permettre d'envisager une sélection sur ce caractère. L'utilisation possible de la sélection génomique devrait permettre d'améliorer l'efficacité de la sélection (Calus et al., 2012) et d'associer ce caractère avec d'autres. Les premières simulations réalisées sur le troupeau bovin laitier néerlandais, en utilisant ces paramètres génétiques, montrent qu'il pourrait être théoriquement possible d'obtenir une réduction de l'ordre de 11 à 26% des émissions en dix ans de sélection (De Haas et al., 2011, 2012a). S'il se confirmait qu'il existe une corrélation génétique positive entre l'efficacité alimentaire et la réduction des émissions, une mesure directe et simple des émissions de CH₄ permettrait donc également de sélectionner sur ce caractère d'intérêt économique. Il faudra toutefois tester l'éventuelle existence de liens avec d'autres caractères d'intérêt (reproduction, longévité, croissance, etc) avant de proposer une sélection génétique directe sur l'émission de CH₄.

Malgré cet objectif particulièrement intéressant et ces résultats prometteurs, l'utilisation d'une sélection génétique indirecte ou directe sur l'émission de CH₄ par les bovins n'a pas été retenue dans la présente étude pour plusieurs raisons :

- La sélection sur la consommation résiduelle (RFI) est déjà engagée depuis plusieurs années en bovins ou/et fait partie des évolutions qui vont se produire dans un scénario « business as usual »
- Les travaux de recherche sur une sélection directe sur les émissions de CH₄ et sur les liens entre RFI et production de CH₄ sont encore à un stade très précoce
- Les outils de mesure directe des émissions dans les exploitations d'élevage ne sont pas encore disponibles
- La décision de mise en oeuvre d'une sélection génétique sur ce caractère, ainsi que son développement, dans l'espèce bovine, relèvent d'une approche collective de longue haleine, incompatible avec les objectifs de la présente étude.

Il nous semble cependant, compte tenu (a) de l'importance de l'atténuation potentielle des émissions (de l'ordre de 4Tg de CO₂e/an si baisse de 20% du CH₄ sur 7x10⁶ bovins), (b) des progrès rapides attendus au cours des prochaines années tant sur le plan des outils de mesure que sur l'estimation du contrôle génétique du caractère, (c) de l'existence d'un nombre d'équipes important travaillant dans le domaine, notamment en France (programme BVE3), (d) de la compétition entre ces équipes, que cette mesure devrait faire l'objet d'une ré-évaluation régulière.

- Calus MPL, de Haas Y, Veerkamp RF, 2012. Genomic prediction for new traits combining cow and bull reference populations. 63rd EAAP Annual Meeting, Bratislava, 27-31 August, Wageningen Academic Publishers, Book of abstracts, p. 90.
- de Haas Y, Crump R, Dijkstra J, Ogink N, 2012b. Monitoring strategies to breed environment-friendly cows. 63rd EAAP Annual Meeting, Bratislava, 27-31 August, Wageningen Academic Publishers, Book of abstracts, p. 226.
- de Haas Y, Dijkstra J, Ogink N, Calus MPL, Veerkamp RF, 2012a. Linking genomics to efficiency and environmental traits in dairy cattle. 63rd EAAP Annual Meeting, Bratislava, 27-31 August, Wageningen Academic Publishers, Book of abstracts, p. 186.
- de Haas Y, Windig JJ, Calus MPL, Dijkstra J, de Haan M, Bannink A, Veerkamp RF, 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. J. Dairy Sci. 94, 6122-6134.
- Eugene M, Martin C, Mialon MM, Krauss, D, Renand, G, Doreau, M, 2011. Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. Animal Feed Science And Technology, 166-167, 330-337.
- Hegarty RS, Goopy JP, Herd, RM, McCorkell, B, 2007. Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. J. Anim. Sci. 85, 1479-1486.
- Lassen J, Madsen J, Lovendahl P, 2012. Heritability estimates for methane emission in Holstein cows using breath measurements. 63rd EAAP Annual Meeting, Bratislava, 27-31 August, Wageningen Academic Publishers, Book of abstracts, p. 86.
- Nkrumah JD, Okine EK, Mathison GW, Schmid K, Li C, Basarab JA, Price MA, Wang Z, Moore SS, 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. J. Anim. Sci. 84, 145-153.
- Renand G, Krauss D, Thouly JC, 2011. Pour un élevage bovin-viande économiquement et écologiquement efficace. Projet d'intérêt régional, Région Centre. 23 pp.

Améliorer la conduite et la santé du troupeau pour accroître la productivité animale pour diminuer les émissions de CH4 entérique par unité de produit.

L'amélioration de la conduite du troupeau et de la santé des animaux permet de limiter les pertes d'animaux par maladie qui diminuent les performances globales à l'échelle du troupeau. L'amélioration de la conduite et de la santé permettent ainsi d'accroître la productivité des troupeaux et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre par unité de produit.

Cependant, ce travail sur la conduite et la santé des troupeaux est déjà mené actuellement. Cette action ne pourrait donc pas donner lieu à des améliorations importantes par rapport à ce qui se fait déjà actuellement et ce qui se fera dans les années qui viennent.

Interdiction réglementaire

Utiliser des produits augmentant la production (viande ou lait) par animal pour diminuer les émissions de CH4 par unité produite.

Exemples de sous-actions : Utilisation de la somatotropine bovine (diminution du CH4 émis par litre de lait)

(Michel Doreau)

De nombreux additifs alimentaires sont annoncés par les entreprises qui les commercialisent comme ayant un effet positif sur la production de lait ou de viande, le plus souvent parce qu'ils permettent dans certaines conditions une amélioration de la digestion dans le rumen. En fait, les réponses positives au niveau de la production sont le plus souvent aléatoires, ou liées à certains types de ration, et parmi les différentes classes d'additifs naturels (extraits de plantes et huiles essentielles, probiotiques) ou chimiques (substances tampon), aucune n'a comme propriété d'accroître de manière systématique la production de lait ou la vitesse de croissance des ruminants (Jouany et Morgavi, 2007).

Le seul additif dont l'efficacité ait été prouvée pour augmenter la production laitière (plus de 2 kg par jour, Chilliard et al., 1989) est la somatotropine bovine (BST). C'est une hormone de synthèse produite par génie génétique, à effet galactopoiétique. Lorsqu'elle est injectée régulièrement à des vaches laitières, elle contribue, comme son équivalent naturel, à orienter le métabolisme de la vache et les flux de nutriments énergétiques vers la glande mammaire. Son effet mime celui de l'hormone naturelle, et l'animal traité réagit comme s'il avait un potentiel génétique plus élevé, en particulier avec un accroissement des quantités ingérées et de la mobilisation des lipides corporels, une diminution des performances de reproduction, une plus grande sensibilité à certaines pathologies. Un article récent (Capper et al., 2009), reprenant les éléments d'un article de 1994, a montré que l'apport de BST réduisait l'émission des trois gaz à effet de serre, méthane, protoxyde d'azote et gaz carbonique. Cette étude était fondée sur les connaissances théoriques des effets de la BST sur la production laitière et l'ingestion, mais non sur la comparaison d'animaux traités ou non traités. La réduction de l'émission de méthane est logique, celle des deux autres gaz est en contradiction avec l'ensemble de la bibliographie qui montre que plus les animaux sont productifs, plus les intrants sont élevés, et plus les émissions liées à ces intrants le sont.

L'utilisation de la BST est interdite dans l'Union européenne depuis le 01/01/2000 afin d'assurer une meilleure protection de la santé et du bien-être des animaux (Journal Officiel des Communautés Européennes, 1999). Indépendamment des risques évoqués dans cette décision, une opinion prévalente dans la filière laitière européenne est que son usage aurait favorisé les grosses exploitations techniquement performantes aux dépens des petites exploitations, et était peu opportun, en particulier dans un contexte de quotas laitiers. Une telle action ne peut donc pas être mise en place en France, d'autant plus que l'interdiction de la BST, également en vigueur au Canada, au Japon, en Australie et en Nouvelle-Zélande, pourrait s'étendre aux Etats-Unis.

Capper, J.L., Cataneda-Gutierrez, E., Cady, R.A., Bauman D.E. 2008. The environmental impact of recombinant bovine somatotropin (rBST) use in dairy production. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:9668-9673.

Chilliard Y., Vérité R., Pflimlin A., 1989. Effets de la somatotropine bovine sur les performances des vaches laitières dans les conditions françaises d'élevage. *INRA Productions Animales*, 2, 301-312.

Dollé J.B., Agabriel J., Peyraud J.L., Faverdin P., Manneville V., Raison C., Gac A., Le Gall A., 2011. Les gaz à effet de serre en élevage bovin : évaluation et leviers d'action. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). *Dossier, INRA Prod. Anim.* 24, 415-432.

Jouany J.P., Morgavi D.P., 2007. Use of 'natural' products as alternatives to antibiotic feed additives in ruminant production. *Animal*, 1, 1443-1466.

Journal Officiel des Communautés Européennes, 1999. Décision du conseil du 17 décembre 1999 concernant la mise sur le marché et l'administration de la somatotropine bovine (BST) et abrogeant la décision 90/218/CEE (1999/879/CE), L331/71-L331/72.

Développer des races mixtes ou des croisements industriels chez les bovins pour diminuer les émissions de CH₄ par unité produite.

Deux sous-actions et options techniques :

- Mettre en place des croisements industriels de bovins lait et viande
- Développer les races mixtes produisant lait et viande

(Philippe Chemineau)

L'utilisation de croisements industriels de bovins ou de races mixtes produisant de la viande et du lait pourrait permettre de réduire les émissions de méthane par unité de produit. En effet un animal émet alors un ordre de grandeur comparable de CH₄ et de N₂O au cours de sa vie, mais pour deux productions différentes.

Cette action n'a pas été retenue pour trois raisons :

- 1 Un telle action impliquerait des changements très importants à l'échelle des systèmes de production, par exemple en diminuant sensiblement les effectifs de bovins allaitants au profit des bovins laitiers et/ou en proposant une uniformisation des génotypes mixtes que ce soit via l'adoption d'une race de ce type (ex Normande) ou d'un système de croisements industriels lait x viande.
- 2 Les premiers résultats des travaux de recherche en cours sur le sujet (Puillet et al. 2012a, 2012b), qui s'appuient sur une modélisation du troupeau national et des simulations mathématiques de scénarios contrastés mais permettant de maintenir la production nationale de 2010 en lait et viande, montrent que, malgré des changements considérables des effectifs relatifs des populations lait/viande/mixte, la réduction attendue maximale des émissions de GES n'atteint que 4% dans le meilleur des scénarios. Ces études ont, toutefois, été conduites en ne considérant que les émissions directes ; la prise en compte des émissions indirectes (qui reste à faire) modulerait certainement les résultats. Ces analyses montrent aussi que les compensations des effectifs entre troupeaux allaitant/laitier sont un levier fort qui peut gommer des marges de progrès réalisées à des niveaux infra.
- 3 Compte tenu de la lenteur d'évolution des systèmes bovins, même si une solution plus efficace pouvait être trouvée dans les travaux à venir, celle-ci ne pourrait s'appliquer qu'après un long délai, hors de ceux envisagés dans la présente étude.

Puillet L, Agabriel J, Peyraud JL, Faverdin P 2012. Intensification as a way to reduce greenhouse gas emissions : a question of scale. 63rd EAAP Annual Meeting, Bratislava, 27-31 August, Wageningen Academic Publishers, Book of abstracts, p. 143.

Puillet L, Agabriel J, Peyraud JL, Faverdin P 2012. Modéliser le cheptel français pour évaluer l'influence de choix techniques sur ses émissions de GES. Renc. Rech. Ruminants, 19, 53-56. (<http://www.journees3r.fr/spip.php?article3396>)

III.2. Agir sur le fonctionnement du rumen pour diminuer les émissions de CH₄ entérique

Interdiction réglementaire

Réguler les populations de méthanogènes du rumen à l'aide d'antibiotiques pour limiter les émissions de CH₄ entérique par les ruminants.

Exemples de sous-actions : ionophores (échangeurs d'ions s'insérant dans les membranes bactériennes, provoquant des déséquilibres ioniques puis la mort de la cellule)

(Michel Doreau)

L'utilisation d'antibiotiques peut permettre d'agir sur les communautés microbiennes de la panse des ruminants en éliminant par exemple une partie des micro-organismes. Les ionophores sont un exemple d'antibiotiques qui pourraient être utilisés de cette manière. Ce sont des échangeurs d'ions qui s'insèrent dans les membranes bactériennes, provoquent des déséquilibres ioniques, puis la mort des cellules. Des travaux sont encore nécessaires pour mieux évaluer le potentiel d'atténuation de l'utilisation d'antibiotiques et les effets que peuvent avoir leur utilisation sur la santé animale et humaine. Le monensin (antibiotique ionophore diminuant le méthane), comme tous les autres antibiotiques, a été interdit d'utilisation pour l'alimentation des ruminants dans l'UE en 2006. Cette action ne sera donc pas instruite.

Service Public fédéral de Belgique. Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire, et environnement. Informations sur les additifs dans l'alimentation animale :

<http://www.health.belgium.be/portal/AnimalsandPlants/animalhealth/animalnutrition/additives/index.htm?fodnlang=fr>

ou

Règlement 1831/2003/CE relatif aux additifs destinés à l'alimentation des animaux (.PDF).

Agir sur la flore du rumen en régulant les populations méthanogènes pour diminuer les émissions de CH₄ entérique.

Exemples de sous-actions et options techniques :

- Inoculer les ruminants avec des levures et bactéries non méthanogènes.
- Développer un vaccin anti-méthanogène (visant les microorganismes méthanogènes).
- Éliminer les protozoaires du rumen des ruminants.

La production de méthane entérique s'effectue dans la panse des ruminants par la digestion des glucides. Les bactéries et les protozoaires de la panse participent à la formation d'hydrogène à partir de ces glucides, puis les microorganismes méthanogènes transforment l'hydrogène en méthane. Les biotechnologies permettant de modifier l'écosystème microbien de la panse et notamment d'agir sur la population de méthanogènes sont donc une voie possible. Des essais préliminaires ont été probants mais les recherches sont en cours et ne sont pas applicables aujourd'hui (Doreau et al 2011). Par ailleurs, le développement d'un vaccin anti-méthanogène et a fortiori la défaunation (élimination des protozoaires) risquent de présenter une faible acceptabilité sociale. Pour ces raisons, cette action n'a pas été retenue dans le cadre de cette étude.

Doreau M, Martin C, Eugène M, Popova M, Morgavi DP, 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. INRA Prod. Anim. 24 (5), 461-474

III.3. Modifier la ration pour réduire les émissions de CH₄ et de N₂O

Modifier les caractéristiques nutritionnelles des fourrages en favorisant les composants non-méthanogènes pour limiter les émissions de CH₄ entérique.

Exemples de sous-actions et options techniques :

- Augmenter la teneur en sucres des fourrages
- Augmenter la teneur en tanins des fourrages

(M. Doreau)

La production de méthane par les fourrages dépend de leur digestibilité (plus elle est élevée, plus la production de méthane tend à être élevée), de l'équilibre des acides gras volatils produits entre producteurs d'hydrogène (acétate et butyrate) et consommateurs d'hydrogène (propionate), et de la présence de composés secondaires ayant une action inhibitrice sur la méthanogenèse. L'amélioration génétique des plantes ou la sélection d'espèces spécifiques pourrait ainsi permettre de favoriser des caractéristiques nutritionnelles diminuant production de méthane entérique. Deux pistes sont actuellement envisagées : augmenter la teneur en sucres ou la teneur en tanins.

Une augmentation en sucres des fourrages permettrait de diminuer la production de méthane in vivo (DEFRA, 2010). Inversement, une simulation montre que les fourrages riches en sucre ne diminuent pas le méthane (Ellis et al., 2012). Ces données contradictoires nécessitent des études complémentaires. Par ailleurs, malgré de une longue expérience de sélection de ray-grass riches en sucres, les promoteurs de cette innovation ne réussissent pas pleinement à assurer un rendement optimal et une teneur en sucres constante, ce qui limite le passage de cette technique sur le terrain.

La piste la plus étudiée est l'utilisation de plantes riches en tanins, qui ne nécessite pas d'amélioration génétique. Leur effet sur l'émission de méthane a été montré par méta-analyse (Archimède et al., 2011, Jayanegara et al., 2011) mais il s'agit principalement de plantes des zones tropicales. Par ailleurs les tanins ont généralement des effets négatifs sur la digestibilité des rations, la production fourragère est souvent limitée, et leur utilisation pratique est encore en question.

Cette action ne réunit donc pas les critères permettant de proposer sa mise en dès aujourd'hui, et n'a donc pas été instruite dans cette étude, mais mériterait sans doute d'être ré-examinée d'ici quelque temps.

Archimède H., Eugène M., Marie Magdeleine C., Boval M., Martin C., Morgavi D.P., Lecomte P., Doreau M., 2011. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. Animal Feed Science and Technology, 166-167, 59-64.

DEFRA, 2010. Ruminant nutrition regimes to reduce methane and nitrogen emissions. Report, Project AC0209, <http://randd.defra.gov.uk>, 37 pp.

Ellis J.L., Dijkstra J., France J., Parsons A.J., Edwards G.R., Rasmussen S., Kebreab E., 2012, Effect of high-sugar grasses on methane emissions simulated using a dynamic model, Journal of Dairy Science, 95, 272-285.

Jayanegara A., Leiber F., Kreuzer M., 2011. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., paru en ligne, doi: 10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x

IV. Gestion des effluents, production et consommation d'énergie sur l'exploitation

IV.1. Réduire le stockage des effluents ou leurs émissions de GES

Potentiel unitaire incertain

Optimiser le type d'effluent produit pour obtenir un équilibre CH₄/N₂O minimisant le pouvoir de réchauffement par unité de déjection.

Exemples de sous-actions : favorisation du fumier plutôt que du lisier afin d'augmenter le rapport C/N (stabilisation de l'azote), favorisation du compostage des effluents

La variabilité des émissions au sein des systèmes lisier ou fumier est plus importante que la variabilité entre la moyenne des émissions pour les systèmes lisier et la moyenne des émissions pour les systèmes fumier. Concernant le compostage, il doit être parfaitement maîtrisé pour que les pertes d'azote ne se fassent pas sous la forme de N₂O sous l'effet d'une aération insuffisante. Il existe donc encore des incertitudes sur le type d'effluent optimal en termes d'atténuation des émissions.

Les références concernant les systèmes fumiers sont encore trop peu nombreuses en systèmes bovins, alors que ce type de bâtiments prédomine. Les travaux des 5 dernières années donnent un peu plus de données montrant que les systèmes litières paillées accumulées pourraient être plus émetteurs de CH₄ que les systèmes lisiers (contrairement aux méthodes actuelles de calcul de l'IPCC). L'assiette à court terme est sans doute faible car elle est liée au taux de renouvellement des bâtiments, mais inversement, ces choix impactent les systèmes pour longtemps. Enfin, ce changement doit être associé à de nombreux scénarios du devenir de l'utilisation de la paille qui n'est plus utilisée dans les litières (enfouissement, biochar, bioénergie, alimentation... scénarios 33, 38...) et des conséquences sur les fonctionnements des sols.

IV.2. Produire de l'énergie à partir de biomasse ou d'effluents d'élevage

Connaissances scientifiques et techniques manquantes

Produire du dihydrogène à partir des effluents d'élevage par voie anaérobie et le valoriser énergétiquement, pour limiter les émissions de CH₄ et les émissions de CO₂ issues de la combustion d'énergie fossile.

Un grand nombre d'espèces microbiennes, issues d'environnements variés, peuvent produire du biohydrogène par voie fermentaire. Le potentiel des cultures mixtes microbiennes est particulièrement intéressant au regard de leur large flexibilité métabolique permettant d'envisager d'utiliser des ressources organiques complexes issues du traitement de la biomasse. Toutefois, la diversité microbienne des cultures mixtes est également source d'instabilité des procédés via la présence de métabolismes bactériens multiples pouvant conduire notamment à une reconsumation du bioH₂ produit. A ce jour, peu de moyens d'actions, et essentiellement des modifications physico-chimiques, permettent d'assurer l'optimisation des procédés continus de production de biohydrogène. Les recherches menées ont en particulier permis d'identifier puis d'utiliser des espèces-clés situées au cœur des réseaux métaboliques en tant que contrôleur biologique des écosystèmes microbiens, et ceci en améliorant la stabilité et les rendements de conversion en biohydrogène mais nécessitent encore quelques années avant de pouvoir être envisagées dans un contexte plus applicatif. Cette action n'est donc pas applicable dès aujourd'hui et n'a pas été retenue dans cette étude.

Plusieurs gros projets en lien avec le bioH₂ par voie anaérobie sont en cours actuellement :

- PROMETHEE "Compréhension et optimisation de la production par voie biologique en phase fermentaire de méthane et d'hydrogène à partir de la fraction organique des déchets des ménages" (projet ANR-PNRB 2006-2010),
- INGECOH "Ingénierie écologique d'écosystèmes microbiens producteurs de biohydrogène par voie fermentaire" (projet ANR-Bioénergie 2008-2011)
- ANABIO-H2: "Valorisation de coproduits agricoles et industriels via la production d'hydrogène en utilisant des souches microbiennes anaérobies mésophiles" (projet ANR-Bioénergie 2008-2011)
- DEFI H12 : "Production de bio-hydrogène par électrolyse microbienne" (projet ANR-Bioénergie 2009-2012)
- HYCOFOL_BV : "Production d'hydrogène par couplage de procédés de fermentation à l'obscurité et à la lumière appliqué à la biomasse végétale (projet ANR-Bioénergie 2010-2013)

Produire de l'énergie sur l'exploitation par combustion de biomasse pour diminuer les émissions de CO2 issues de la combustion d'énergie fossile.

Exemples de sous-actions : bois-énergie, valorisation des pailles en énergie, huile végétale pure pour les tracteurs

Une telle action relève des cultures énergétiques et est donc en dehors du périmètre de commande cette étude.

IV.3. Réduire la consommation d'énergie fossile sur l'exploitation agricole

Action sur l'aval

Utiliser l'énergie solaire pour le séchage des produits agricoles pour diminuer le recours à l'énergie fossile en aval de l'exploitation et les émissions de CO₂ énergétique associées.

Exemples de sous-actions et options techniques :

- Développer le préfanage de la luzerne au champ afin de diminuer les besoins énergétiques des usines d'agrofourmiture se situant en aval du processus qui déshydratent la luzerne afin de pouvoir la commercialiser.
- Diminuer le taux d'humidité des produits à la récolte (ex. : maïs) afin de diminuer l'énergie nécessaire au séchage des grains en aval, par exemple dans les coopératives.

L'impact du développement de ces pratiques pourrait avoir un effet non négligeable à l'échelle des filières et dans les analyses du cycle de vie des produits concernés. Cependant, malgré le fait que ces actions sont décidées par l'agriculteur, leur principal effet escompté se situe en aval de l'exploitation où moins de CO₂ d'origine fossile sera émis du fait d'un séchage nécessitant moins d'énergie. Ne visant pas une atténuation sur l'exploitation, cette action n'a pas été retenue pour l'analyse dans cette étude.

Annexe 5. Définition et Origine de la méthode de calcul des coûts de transaction des mesures d'atténuation des émissions de GES

L'introduction par la puissance publique de mesures visant à modifier des pratiques agricoles s'accompagne toujours de coûts de transaction pour l'ensemble des parties concernées. Ces parties sont les agriculteurs ciblés par la mesure et les différents services de l'administration publique chargés de la conception, de la mise en œuvre, du suivi et de l'évaluation de cette mesure. En outre elles incluent fréquemment des organismes semi-publics, privés ou associatifs chargés du conseil aux agriculteurs, d'expertise auprès des pouvoirs publics ou de missions de service public.

L'identification des coûts de transaction et des parties concernées par ces coûts peut être faite en retraçant les différentes étapes d'élaboration, de mise en œuvre et d'évaluation d'une mesure. Il est difficile d'être exhaustif dans cette comptabilité, notamment pour les mesures d'adoption volontaire par les agriculteurs, comme les mesures agri-environnementales (MAE). En effet, certains coûts de transaction sont dépensés sans succès et ne sont pas toujours enregistrés. Il s'agit par exemple des agriculteurs ayant participé à des réunions d'information ou de formation liées à l'introduction de nouvelles mesures, mais n'ayant finalement pas adopté l'une de ces mesures. L'autre grande difficulté provient de l'absence de comptabilité analytique dans beaucoup des organismes concernés, notamment de l'administration publique.

Le choix de l'instrument de politique est extrêmement important sur l'ampleur des coûts de transaction, leur part dans le coût total de la politique et l'identité de ceux qui les supportent. Cependant, d'un point de vue économique, ces indicateurs n'ont pas de sens en eux-mêmes. La seule chose qui compte en terme d'efficacité est le coût total de la politique rapporté à son impact environnemental, ici les tonnes d'équivalent CO₂ abattues. Cependant, ce coût total doit bien inclure les coûts de transaction. Considérons par exemple un relèvement de la taxe des produits pétroliers utilisés en agriculture et un ensemble de mesures d'aide à des pratiques agricoles économes en carburants, aboutissant au même abattement des émissions de GES. Les coûts de transaction du relèvement de la taxe sont négligeables, notamment si la taxe existe déjà. Le coût total est la perte de profit des agriculteurs liée au surcoût des carburants, diminuée du produit de la taxe qui est un simple transfert des agriculteurs aux contribuables. Dans le cas de MAE (réglage des moteurs, éco-conduite, réduction du nombre de passages de tracteurs de la préparation du sol à la récolte), les agriculteurs adoptant les mesures font théoriquement un profit positif ou nul coût de transaction compris, sinon ils n'adopteraient pas. Les contribuables financent l'ensemble des coûts d'abattement, le profit des adoptants et les coûts de transaction associés, sauf ceux liés au temps perdu par les agriculteurs non adoptants qui se sont intéressés à ces mesures. Les MAE ont donc des coûts de transaction beaucoup plus élevés pour l'administration et pour les agriculteurs. Elles peuvent s'avérer moins coûteuses globalement que la taxe, dans certains cas précis, en ciblant bien les gaspillages dont résultent des inefficacités faciles à réduire (au sens où cette réduction ne nécessite pas une augmentation significative d'autres facteurs de production). Au contraire de la taxe, les MAE n'entraînent pas de surcoût pour l'ensemble des consommateurs de carburants et donc pour leur production et leur compétitivité. Dans le cas général, où les objectifs d'abattement impliquent de nécessaires substitutions de facteurs et des ajustements de la production, la taxe est plus efficace que les MAE, c'est-à-dire moins coûteuse globalement. En effet, elle égalise sans coûts de transaction le prix du carburant à sa profitabilité marginale, tout en incitant également à la résorption des gaspillages.

Les coûts de transaction propres aux MAE

Le tableau suivant détaille les principaux postes de coûts de transaction au long de la vie d'une MAE. Les coûts des différentes étapes affectent soit les organismes chargés de l'administration des MAE, soit ces mêmes organismes et les exploitations agricoles adoptant ces mesures. Selon les opérations administratives concernées ces coûts sont fixes ou variables avec le nombre de contractants pour les organismes administrateurs ou avec le nombre d'unité sous contrat au niveau des exploitations agricoles.

Ce tableau omet certains déterminants des coûts de transaction dont l'importance a été montrée empiriquement. Il s'agit en premier lieu des effets d'apprentissage, tant au niveau des administrateurs (Faconer et al., 2001) que les exploitants agricoles (Dupraz et al. 2003 ; Ducos et al. 2009) qui réduisent les coûts de transaction en tirant parti des expériences antérieures similaires. Il omet également les coûts de transaction subis par les exploitants agricoles qui ont été touchés par les opérations de promotion des mesures, sans finalement les adopter. Ces derniers peuvent être limités en définissant soigneusement l'éligibilité à chaque mesure et la rémunération offerte pour l'adoption.

Catégories de coûts de transaction des MAE (adapté de Falconer et al., 2001)

Catégories principales	Sous-catégories : opérations administratives	Coûts des organismes administrant les MAE		Coûts au niveau de l'exploitation agricole	
		Coûts fixes par mesure	Coûts variables avec le nombre de participants	Coûts fixes par mesure	Coûts variables le nombre d'unités sous contrats (ha, UGB, etc.)
Information	- analyse de l'objet et de la cible de la mesure dans son contexte géographique	√			
Elaboration	- élaboration du cahier des charges et définition de l'éligibilité - tests et finalisation de la mesure	√			
Mise en œuvre	- promotion de la mesure auprès des agriculteurs éligible - instruction et négociation des contrats, renégociations et avenants - administration des contrats: suivi et paiements,	√	√ √ √	√ √ √	√
Contrôle et sanction	- vérification de la conformité des documents contractuels et inspections sur place		√	√	√
Evaluation	- suivi environnemental et financier, évaluation	√			

Les autres types de coûts de transaction supportés par les agriculteurs sont théoriquement couverts par cette rémunération. Les MAE étant adoptées volontairement, les agriculteurs n'ont pas intérêt à s'engager dans un contrat à perte. Les travaux sur l'adoption montrent que les CTP seraient plus élevés pour les non contractants que pour la population étudiée de contractants (Ducos et al., 2009). Les études ex-post montrent que certains agriculteurs ont perdu de l'argent avec leur MAE en raison de défauts d'anticipation sur les coûts d'opportunité qui dépendent des prix des productions et des facteurs ou sur les coûts de transaction eux-mêmes : tracasseries administratives inattendues.

Résultats du suivi des MAE en 2006 visant à mesurer et à prévoir les coûts de transaction privés (CTP) des contractants de plusieurs régions européennes (200), adossé à une enquête de plus de 2000 agriculteurs dont plus de 1000 contractants : résultats, tableau et figures de Mettepenningen et al. (2007)

Les résultats du suivi des contractants montrent que les coûts totaux des MAE sont en moyenne plus élevés que les paiements correspondants (figure 31) et 49% des 1000 contractants enquêtés seulement assurent que le paiement couvre de 50 à 100% des coûts totaux. Cela laisse penser que le suivi et l'enquête surestiment ces coûts par rapport à une hypothèse de rationalité des contractants, ou bien que seuls les non contractants ont correctement anticipés ces coûts.

La méthode distingue trois types de déterminants du montant des coûts de transaction découlant des MAE: l'agriculteur (formation, expérience des MAE, confiance dans les institutions, relations préétablie avec des organismes de conseil ou de développement), son exploitation (taille en travailleurs, taille en hectare, diversité des productions) et la MAE elle-même (nombre et types de sous-mesures, surface sous contrat, complexité et nouveauté du dispositif, investissements spécifiques).

Les résultats pour un type de déterminants dépendent évidemment des autres. Donc il est faisable, mais pas simple de construire une fonction de CTP ignorant un ou deux types de déterminants. Plus compliqué: la correspondance entre les mesures examinées dans ce suivi et celles que nous avons inventées pour l'étude GES (voir figure 25).

La méthode distingue trois types de coûts de transactions: les coûts de recherche, les coûts de négociation (en réalité ce sont les coûts de constitution des dossiers, car la plupart des contrats sont à prendre ou à laisser) et enfin les coûts de contrôle et de suivi du contrat, notamment les formulaires à remplir pour déclencher les paiements chaque année, les contrôles sur place étant limités à 5% des contrats.

Dans le cas où la mesure est imposée à un ensemble d'exploitation et compensée, on peut éliminer les coûts de recherche: l'agriculteur ne se pose pas la question de l'adoption. En revanche, les coûts de "négociation", de contrôle et de suivi restent si l'agriculteur doit faire la preuve de sa mise en oeuvre pour recevoir la compensation. En l'absence de compensation, une partie de ces coûts disparaît sans doute: l'agriculteur doit simplement s'assurer qu'il respecte la nouvelle règle, mais sans tracasseries vis-à-vis du calcul et du déclenchement de paiements.

Dans le rapport de Mettepenningen et al. (2007), les régressions effectuées expliquent 25 à 67% de la variabilité du temps passé par les agriculteurs contractant à la bureaucratie des MAE., ce qui est plutôt bien sur des données individuelles. Cependant le problème est de passer des jours de travail aux euros. Il paraît difficile de supposer un montant égal pour tous les types d'exploitations. le travail est valorisé par le revenu par travailleur de chaque exploitation selon un nombre de jours annuel standard (275 jours de 8 heures à vérifier).

Le modèle le plus simple et le plus significatif est le suivant (tableau 34), ln désignant le logarithme népérien et la constante ajustée pour le cas français représenté par la Basse-Normandie ($2,826+3,271=6,097$):

$\ln(\text{coût de transaction par ha en euros 2005})=6,097 - 1,1*(\text{dummy études supérieures au bac}) - 1,033*\ln(\text{surface concernée par la mesure})$, R carré de 67%

Le domaine de validité de la formule est assez vaste: le coût de transaction par ha ne s'annule qu'au delà de 366ha. Pour 30 ha sous contrat on trouve environ 12 euros soit environ 10% de la prime moyenne de l'étude de 2006 (Mettepenningen et al., 2007).

Avec le tableau 35, on peut ajuster le résultat selon le type de mesure - par exemple culture intermédiaire- (mais attention au domaine de validité: on est rapidement dans des valeurs négatives si on cumule deux ou trois mesure). La régression correspondante n'a un R carré que de 12,5%. La variable dépendante est **$(\text{coût de transaction par ha en euros 2005} - 50,24)=24,033 - 12,274*(\text{dummy études supérieures au bac}) - 26,668*(\text{dummy mesure culture intermédiaire}) - 3,08*\ln(\text{surface concernée par la mesure})$** . Ces résultats ne sont pas utilisés pour la présente étude car le R carré est faible et la régression dépend fortement d'une action particulière (mise en place d'une culture intermédiaire).

Pour adapter le modèle plus simple (tableau 34) à des mesures qui ne concernent pas seulement des surfaces nous proposons d'utiliser la conversion en production brute standard dite PBS2007 (le règlement (CE) N°1242 /2008 du 8 décembre 2008). Pour ce faire, il faut connaître les surfaces sous contrat qui ont servi à l'estimation. En Basse Normandie (Arnaud et Dupraz, 2006), il s'agissait environ pour deux tiers de terres arables (PBS2007 du blé = 957 €, maïs fourrage 81€ et prairie temporaire 64€) et pour un tiers de prairies permanentes (49€), soit une PBS2007 d'un hectare sous contrat d'environ 360€. La fonction de coût de transaction privé devient donc la suivante, exprimée en euros 2005 par € de PBS 2007 :

$\ln(\text{coût de transaction par € de PBS2007 en euros 2005})=6,097 - 1,1*(\text{dummy études supérieures au bac}) - 1,033*\ln(\text{taille de la production en € de PBS2007 concernée par la mesure}) + \ln(360) - 1,033 * \ln(360)$.

En simplifiant on obtient :

$\ln(\text{coût de transaction par € de PBS2007 en euros 2005})=5,903 - 1,1*(\text{dummy études supérieures au bac}) - 1,033*\ln(\text{taille de la production en € de PBS2007 concernée par la mesure})$.

Cette formule ne fournira bien sûr qu'une approximation très grossière des coûts de transaction privés.

Références bibliographiques

- Mettepenningen E., Verspecht A., Van Huylenbroeck G., D'Haese M., Aertsens J, Vandermeulen V. (2007). Analysis of private transaction costs related to agri-environmental schemes: ITAES WP 6Consolidated report. 128 p
- Arnaud S., Dupraz P. (2006). Enquête sur les contrats agro-environnementaux des agriculteurs de Basse-Normandie : Premiers résultats. Rapport du projet FP6 – ITAES, INRA ESR Rennes de Janvier 2006. 23 p.

Annexe 6. Méthode d'estimation des coûts de transactions privées des actions de l'étude

La méthode s'appuie sur les informations de la base du RICA 2010, microdonnées en ligne.

<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/reseau-d-information-comptable/rica-france-microdonnees/>

La méthode s'appuie aussi sur les travaux conduits dans le cadre du projet européen ITAES (2007). Le modèle des coûts de transaction est décrit par l'équation (1), estimé sur des données de 2005. Dans le modèle original, la taille de la production concernée par l'action environnementale était exprimée en ha de diverses cultures et prairies. Nous l'avons convertie en € de PBS 2007 afin de généraliser l'équation à des productions animales.

$$\ln(\text{coûts_Transaction_Privés}) = 5.903 - 1.1 * \text{DUMMY} - 1.033 * \ln(\text{taille de la production en € de PBS 2007}) \quad (1)$$

Avec

DUMMY=1 si la formation générale du chef d'exploitation est inférieure au baccalauréat,

DUMMY=0 si la formation générale du chef d'exploitation est supérieure ou au minimum égale au baccalauréat.

Les coûts de transactions privées sont estimés en euros 2005 par euro de PBS. Dans ce modèle, les variables explicatives sont d'une part le niveau de la production Brute Standard 2007 (PBS 2007) et le niveau de formation générale du chef d'exploitation. Les coûts de transactions privées diminuent quand le niveau de formation générale du chef d'exploitation est élevé et quand la taille de la PBS augmente.

Ce modèle est appliqué pour fournir une estimation moyenne des coûts de transactions privées liées à l'adoption de mesures visant une baisse des émissions de gaz à effet de serre au sein des exploitations. Pour chaque action, l'estimation des coûts de transactions privées retient des exploitations de la base RICA 2010, microdonnées, présentant certaines caractéristiques. La PBS 2007 n'est pas utilisée comme telle dans le modèle. Quand les actions ne touchent que spécifiquement certaines productions, la PBS de ces productions est reconstituée. Elle se base d'une part sur les coefficients de PBS 2007 par produit (Agreste 2011) et sur la taille de la production, en nombre d'hectares quand il s'agit de productions végétales et effectifs moyens d'animaux, nombre de tête d'animaux, quand il s'agit de productions animales. Pour les productions animales, nous retenons les effectifs moyens présents sur l'année conformément à la logique du coefficient de PBS d'Agreste.

Une PBS relative aux productions concernées est estimée pour chaque exploitation du RICA, celle-ci est une combinaison linéaire des coefficients de PBS unitaire et des surfaces ou des effectifs animaux i correspondants. La PBS permet d'estimer selon le modèle (1) les coûts de transactions privées relatifs aux productions concernées à l'échelle de l'exploitation (CTP). Ces coûts sont exprimés en euros par euro de PBS.

$$\text{PBS affectée (€)} = \sum S_i \text{PBS}_i \quad (2)$$

$$\text{CTP/ha} = \text{CTP en euros} * (\text{PBS affectée en euros/surface ou effectif}) * 1.09 \quad (3).$$

Le coefficient de 1.09 correspond au taux d'évolution de l'indice général des prix entre l'année 2005, année de base de l'estimation et l'année 2010.

Source : <http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/bsweb/theme.asp?id=06>.

Le programme estime en moyenne les CTP pour l'ensemble des exploitations retenues, en appliquant un coefficient de pondération relatif à la représentativité de chaque exploitation dans l'univers. Le coefficient de pondération du RICA est la variable extr2.

Variables du RICA utilisées :

Les variables présentes dans les microdonnées selon les fiches descriptives accompagnant la table des données sont

-la surface pour chaque culture décrite en classe de la manière suivante :

Classe 1 : /* classe de 1 a 5 ha */	Classe 11 : /* classe de 50 a 60 ha */	Classe 21 : /* classe de 150 a 160 ha */
Classe 2 : /* classe de 5 a 10 ha */	Classe 12 : /* classe de 60 a 70 ha */	Classe 22 : /* classe de 160 a 170 ha */
Classe 3 : /* classe de 10 a 15 ha */	Classe 13 : /* classe de 70 a 80 ha */	Classe 23 : /* classe de 170 a 180 ha */
Classe 4 : /* classe de 15 a 20 ha */	Classe 14 : /* classe de 80 a 90 ha */	Classe 24 : /* classe de 180 a 190 ha */
Classe 5 : /* classe de 20 a 25 ha */	Classe 15 : /* classe de 90 a 100 ha */	Classe 25 : /* classe de 190 a 200 ha */
Classe 6 : /* classe de 25 a 30 ha */	Classe 16 : /* classe de 100 a 110 ha */	Classe 26 : /* classe de 200 a 250 ha */
Classe 7 : /* classe de 30 a 35 ha */	Classe 17 : /* classe de 110 a 120 ha */	Classe 27 : /* classe de 250 a 300 ha */
Classe 8 : /* classe de 35 a 40 ha */	Classe 18 : /* classe de 120 a 130 ha */	Classe 28 : /* classe de 300 a 350 ha */
Classe 9 : /* classe de 40 a 45 ha */	Classe 19 : /* classe de 130 a 140 ha */	Classe 29 : /* classe de 350 a 400 ha */
Classe 10 : /* classe de 45 a 50 ha */	Classe 20 : /* classe de 140 a 150 ha */	Classe 30 : /* classe sup a 400 ha */

Pour chaque observation, nous avons approché la surface par le centre de la classe à laquelle l'observation appartient, et 425 pour la classe 30.

La variable FOGEN décrivant la formation générale du chef d'exploitation est retenue. Elle prend les modalités suivantes :

"FOGEN;0;Aucune formation générale";;
 "FOGEN;1;Certificat d'études primaires";;
 "FOGEN;2;Enseignement secondaire de cycle court";;
 "FOGEN;3;Enseignement secondaire de cycle long";;
 "FOGEN;4;Enseignement supérieur";;

Autres informations.

Sont aussi utilisées les tables des coefficients de marge brute en unités de compte européenne correspondant à ces cultures. L'information disponible est régionalisée mais dans l'estimation des coûts de transactions privées, l'estimation des coûts de transactions privées retient la PBS nationale.

SSP-SDSSR-BSPCA

Tableau récapitulatif des coefficients de Production Brute Standard (PBS) "2007"

Code	Intitulé	Unité	France Métropole
B_1_1_1	Blé tendre et épeautre	Euros par ha	946
B_1_1_2	Blé dur	Euros par ha	967
B_1_1_3	Seigle	Euros par ha	632
B_1_1_4	Orge	Euros par ha	812
B_1_1_5	Avoine	Euros par ha	593
B_1_1_6	Maïs grain (non irrigué)	Euros par ha	1 087
B_1_1_7	Riz	Euros par ha	1 321
B_1_1_99	Autres céréales	Euros par ha	625
B_1_2	Légumes secs et protéagineux - total	Euros par ha	690
B_1_2_1	Pois, fèves et lupins doux	Euros par ha	690
B_1_2_2	Légumes secs et cultures protéagineuses autres	Euros par ha	690
B_1_3	Pommes de terre (y c les primeurs et les plants)	Euros par ha	7 055
B_1_4	Betteraves sucrières (à l'exception des semences)	Euros par ha	2 441
B_1_5	Plantes sarclées fourragères (à l'exception des semences)	Euros par ha	158
B_1_6_1	Tabac	Euros par ha	9 413
B_1_6_2	Houblon	Euros par ha	7 776
B_1_6_3	Coton (déclaré NE)	Euros par ha	
B_1_6_4	Colza ou navette	Euros par ha	918
B_1_6_5	Tournesol	Euros par ha	663
B_1_6_6	Soja	Euros par ha	758
B_1_6_7	Lin oléagineux	Euros par ha	728
B_1_6_8	Autres plantes oléagineuses ou textiles	Euros par ha	728
B_1_6_9	Lin textile	Euros par ha	1 737
B_1_6_10	Chanvre	Euros par ha	2 530
B_1_6_11	Autres plantes textiles	Euros par ha	1 737
B_1_6_12	Plantes aromatiques, médicinales et condimentaires	Euros par ha	1 774
B_1_6_99	Autres plantes industrielles non mentionnées ailleurs	Euros par ha	1 774
B_1_7	Lég. frais, melons, fraises	Euros par ha	
B_1_7_1	Lég. frais, melons, fraises, de plein champ ou sous abri bas (non accessible)	Euros par ha	
B_1_7_1_1	Lég. frais, melons, fraises, culture de plein champ	Euros par ha	4 372
B_1_7_1_2	Lég. frais, melons, fraises, culture maraîchère	Euros par ha	24 360
B_1_7_2	Lég. frais, melons, fraises, sous serre ou sous autre abri (accessible)	Euros par ha	73 080
B_1_8_1	Fleurs et plantes ornementales (non compris pépinières) de plein air ou sous abri bas (non accessible)	Euros par ha	118 000
B_1_8_2	Fleurs et plantes ornementales (non compris pépinières) sous serre ou sous autre abri (accessible)	Euros par ha	198 000
B_1_9	Total fourrages	Euros par ha	

B_1_9_1	Prairies temporaires	Euros par ha	48
B_1_9_2	Plantes fourragères annuelles	Euros par ha	
B_1_9_2_1	Maïs fourrage	Euros par ha	82
B_1_9_2_2	Légumineuses	Euros par ha	116
B_1_9_2_99	Autres plantes fourragères annuelles	Euros par ha	82
B_1_10	Semences et plants de terres arables	Euros par ha	1 569
B_1_11	Autres cultures de terres arables	Euros par ha	750
B_1_12_1	Jachère non subventionnée	Euros par ha	0
B_1_12_2	Jachère subventionnée	Euros par ha	0
B_2	Jardins familiaux	Euros par ha	
B_3	Total prairies et pâturages permanents	Euros par ha	
B_3_1	Prairies permanentes hors pâturages pauvres	Euros par ha	36
B_3_2	Pâturages pauvres	Euros par ha	8
B_3_3	Prairies permanentes non exploitées à des fins de production et donnant droit au versement de subventions	Euros par ha	0
B_4_1	Plantations d'arbres fruitiers et baies	Euros par ha	
B_4_1_1	Espèces fruitières	Euros par ha	
B_4_1_1_1	Espèces fruitières d'origine tempérée	Euros par ha	9 714
B_4_1_1_2	Espèces fruitières d'origine subtropicale	Euros par ha	12 180
B_4_1_2	Baies	Euros par ha	15 797
B_4_1_3	Fruits à coque	Euros par ha	2 966
B_4_2	Agrumeraies	Euros par ha	8 201
B_4_3	Oliveraies	Euros par ha	2 191
B_4_3_1	Olives de tables (déclaré NS)	Euros par ha	2 191
B_4_3_2	Olives à huile (déclaré NS)	Euros par ha	2 191
B_4_4	Vignes-total	Euros par ha	
B_4_4_1	Vignes pour vins de qualité	Euros par ha	16 008
B_4_4_2	Autres vignes	Euros par ha	4 691
B_4_4_3	Vignes pour raisins de table	Euros par ha	8 400
B_4_4_4	Vignes pour raisins secs	Euros par ha	8 400
B_4_5	Pépinières	Euros par ha	16 500
B_4_6	Autres cultures permanentes	Euros par ha	1 510
B_4_7	Cultures permanentes sous serre	Euros par ha	66 000
B_6_1	Champignons	Euros pour 100 m ²	9 000
B_6_1	Champignons	Euros par récolte pour 100 m ²	1 500
C_1	Equidés	Euros par tête	921
C_2_1	Bovins de moins de 1 an	Euros par tête	608
C_2_2	Bovins mâles de 1 à moins de 2 ans	Euros par tête	360
C_2_3	Bovins femelles de 1 à moins de 2 ans	Euros par tête	400
C_2_4	Bovins mâles de 2 ans et plus	Euros par tête	181
C_2_5	Génisses de 2 ans et plus	Euros par tête	155
C_2_6	Vaches laitières	Euros par tête	1 981
C_2_99	Autres vaches	Euros par tête	642
C_3_1	Ovins total	Euros par tête	
C_3_1_1	Brebis	Euros par tête	131
C_3_1_99	Autres ovins	Euros par tête	66
C_3_2	Caprins total	Euros par tête	
C_3_2_1	Chèvres	Euros par tête	467
C_3_2_99	Autres caprins	Euros par tête	50
C_4_1	Porcelets d'un poids vif de moins de 20 kg	Euros par tête	207
C_4_2	Truies reproductrices de 50kg ou plus	Euros par tête	791
C_4_99	Autres porcs	Euros par tête	217
C_5_1	Poulets de chair	Euros pour 100 têtes	952
C_5_2	Poules pondeuses	Euros pour 100 têtes	1 271
C_5_3	Autres volailles	Euros pour 100 têtes	2 089
C_6	Lapines mères	Euros par tête	202
C_7	Abeilles	Euros par ruche	132

Source : Agreste - Production brute standard et classification des exploitations (SSP-SDSSR-BSPCA)

Exemple de calcul de CTP

Nous prenons le cas de l'introduction de légumineuses dans les prairies temporaires pour illustrer l'application de la formule (1) de calcul des coûts de transaction privés, car ce cas ne mobilise que qu'un seul type de production.

Dans le RICA 2010, nous avons sélectionné les exploitations exploitant dans prairies temporaires. Cet échantillon représente au total 136640 exploitations de l'univers du RICA, dont 107485 (78 %) avec un chef d'exploitation ayant un niveau d'éducation générale strictement inférieur au Baccalauréat (FOGEN<3) et 29155 (22 %) avec un niveau supérieur ou égal.

La formule (1) est appliquée à chaque observation du RICA 2010 dont la surface en prairies temporaires est non nulle. La taille de la production en € de PBS 2007 est cette surface multipliée par 48€/ha d'après la ligne de code B_1_9_1 du tableau précédent.

Prenons par exemple une exploitation dont la surface en prairie temporaire est de 25 ha.

La PBS correspondant à cette surface est 25 ha multipliée par 48 €/ha soit 1200 €.

- a) Si le chef de cette exploitation a un niveau d'éducation supérieur au Baccalauréat (FOGEN =3 ou FOGEN > 3), alors le coût de transaction par € de PBS est calculé par la formule (1) soit :**

$$\ln(\text{coûts_Transaction_Privés}) = 5.903 - 1.1 - 1.033 \cdot \ln(1200) = -2,52105$$

$$\text{coûts_Transaction_Privés} = \exp(-2,52105) = 0,08 \text{ € de 2005 par € de PBS 2007.}$$

Ainsi les coûts de transaction privés pour cette exploitation et cette action est estimé à 0.08 € de 2005 par € de PBS 2007 multiplié par 1200 € de PBS 2007, soit 96 € de 2005.

Cela correspond à $96 * 1,09 = 104,64$ € de 2010 et à 4,19 € de 2010 par hectare de prairie temporaire concerné.

- b) Pour une même surface de 25 ha de prairie concernée, si le chef d'exploitation a un niveau inférieur au Baccalauréat, la formule qui s'applique est :**

$$\ln(\text{coûts_Transaction_Privés}) = 5.903 - 1.033 \cdot \ln(1200) = -1,42105$$

$$\text{coûts_Transaction_Privés} = \exp(-1,42105) = 0,24 \text{ € de 2005 par € de PBS 2007.}$$

Ainsi les coûts de transaction privés pour cette exploitation et cette action est estimé à 0.24 € de 2005 par € de PBS 2007 multiplié par 1200 € de PBS 2007, soit 289,75 € de 2005.

Cela correspond à $289,75 * 1,09 = 315,83$ € de 2010 et à 12,63 € de 2010 par hectare de prairie temporaire concerné, soit 3 fois plus environ que dans le cas précédent. Cela illustre l'influence négative du niveau d'éducation sur les coûts de transaction.

La taille de la production a également un effet négatif sur les coûts de transaction unitaire. Ainsi selon le même calcul pour un chef d'exploitation n'ayant pas le Baccalauréat mais une surface de prairie concernée de 20 ha, les coûts de transaction s'élèvent à 15,90 € de 2010 par hectare de prairie temporaire concerné.

Une fois le calcul effectué pour chaque exploitation concernée de l'échantillon RICA 2010, nous calculons la moyenne pondérée par le coefficient d'extrapolation de chaque observation correspondante (38,90€/ha). Nous fournissons également les valeurs estimées minimale (0.40€/ha) et maximale (152€/ha) dans la section 5.4 et le tableau correspondant en annexe.

Références bibliographiques

Agreste, Ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire, Service de la Statistique et de la Prospective, sous-direction des synthèses statistiques et des revenus, Bureau des statistiques sur les productions et les comptabilités agricoles, (2011)

Production brute standard et nouvelle classification des exploitations agricoles, note documentaire,

http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_pbs.pdf

Agreste, base de données du RICA en ligne, microdonnées RICA 2010,

<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/reseau-d-information-comptable/rica-france-microdonnees/>

Sixth Framework Programme Priority 8 Policy Oriented Research, Specific Targeted Research Project No SSPE-CT-2003-502070, Integrated Tools to Design and Implement Agro environmental Schemes (ITAES). Deliverable N° 15, Document number IATES WP6 P3D15, Analysis of Private Transaction Costs related to agri environmental schemes, IATES WP6 Consolidated Report, 2007, 128 p.

Annexe 7. Le calcul de marges par hectare : estimations à partir du RICA

La marge (M_i) par hectare se définit comme la différence entre les recettes (R_i) et les dépenses (CI_i) pour un hectare de production donnée.

$$M_i = R_i - CI_i$$

Le RICA collecte de nombreuses données au niveau de chaque production (blé tendre, blé dur...) : on dispose du volume de production et de la superficie (dont on déduit un rendement Rdt_i), du produit des ventes en valeur et volume (dont on peut déduire le prix P_i) ainsi qu'une recette par hectare (R_i).

$$R_i = P_i \cdot Rdt_i$$

Par contre, les dépenses variables (CI), détaillées par nature [engrais (Y), produits phytosanitaires (Z), semences (X) et carburants(W)], restent globales au niveau de l'exploitation agricole et ne sont pas réparties selon les différentes productions. Il est donc impossible de calculer une marge pour chaque production à partir des données observées.

$$CI = Y + Z + X + W$$

Les marges utilisées ont été calculées en utilisant un modèle économétrique pour répartir les différentes dépenses entre les cultures. Le modèle retenu est simple : les dépenses d'engrais Y d'une exploitation f dépendent des espèces et du nombre d'hectares cultivés. En retenant une forme linéaire, on suppose que les terres d'un même agriculteur sont homogènes. L'hétérogénéité des terres entre agriculteurs est captée par le terme d'erreur e_f .

$$Y_f = a_1 \cdot S_{1f} + \dots + a_i \cdot S_{if} + \dots + e_f$$

Avec Y_f = engrais total pour l'exploitation f
 a_i : coût des engrais utilisés pour 1 ha de culture i
 S_i : superficie en culture i
 e_f : terme d'erreur
 f : indice de l'exploitation agricole

Liste des cultures i : blé tendre, blé dur, orge, maïs grain et semences, autres céréales, pommes de terre, betteraves, pois et fèves, tournesol, colza, autres oléagineux, autres grandes cultures, légumes plein champ, légumes sous verre, fleurs, pommes de table, fruits à coque, autres fruits, vigne, autres cultures permanentes, maïs fourrage, plantes sarclées fourragères, fourrages artificiels, prairies temporaires, prairies permanentes.

Cette équation est reprise successivement pour les dépenses que l'on peut affecter aux cultures :

les dépenses en produits phytosanitaires	$Z_f = b_1 \cdot S_{1f} + \dots + b_i \cdot S_{if} + \dots + k_f$
les dépenses en semences	$X_f = c_1 \cdot S_{1f} + \dots + c_i \cdot S_{if} + \dots + h_f$
et les dépenses en carburants	$W_f = d_1 \cdot S_{1f} + \dots + d_i \cdot S_{if} + \dots + g_f$

Une marge par hectare pour chaque culture i (M_i) peut alors être calculée de la façon suivante :

$$M_i = R_i - a_i - b_i - c_i - d_i$$

<i>Estimation de marges à partir du Réseau d'information comptable agricole</i>									
Végétaux	Rendement (100 kg/ha)	Prix (euros)	Produit (euros/ha)	Engrais (euros/ha)	Produits phyto- sanitaires (euros)	Semences (euros)	Carburants (euros)	Ensemble (euros)	Marge estimée (euros/ha)
	<i>Rdt_i</i>	<i>P_i</i>	<i>R_i</i>	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>c_i</i>	<i>d_i</i>		<i>M_i</i>
Céréales									
Total blé tendre	73	18	1 279	146	159	57	45	408	871
Total blé dur	52	21	1 112	174	174	124	43	515	597
Maïs grain	88	19	1 681	239	99	164	82	584	1 097
Total orge et escourgeon	62	15	923	229	109	88	58	483	440
Autres céréales non mélangées	47	18	850	102	47	55	82	286	563
<i>Pommes de terre</i>									
Betteraves industrielles	404	17	6 832	361	576	789	150	1 876	4 956
	839	3	2 267	412	188	330	128	1 058	1 210
Protéagineux									
Féveroles et fèves	38	19	734	0	210	74	47	331	404
Oléagineux									
Colza et navette	33	37	1 198	225	246	0	54	525	673
Tournesol	24	40	944	124	86	66	58	335	609
Autres oléagineux	22	42	935	94	159	0	55	308	627
Cultures permanentes									
Pommes de table	360	43	15 367	266	1 500	77	266	2 109	13 257
Autre fruits	107	86	9 188	313	499	76	151	1 039	8 149
Vignes	76	336	25 397	81	440	0	70	591	24 806

Source : Agreste - Rica, calculs INRA